

CENTRO NACIONAL DE PESQUISA EM ENERGIA E MATERIAIS |
CNPEM
ILUM - ESCOLA DE CIÊNCIA

PROJETO FINAL

**Metassuperfícies Programáveis por Polarização: Design e Otimização para
Holografia Multifuncional e Grades de Dammann**

**Polarization-Programmable Metasurfaces: Design and Optimization for
Multifunctional Holography and Dammann Gratings**

Vinícius André Oliveira Lima Moura (Pesquisador Principal)

Humberto B. Cavallaro Neto (Pesquisador Principal)

João Pedro Oliveira Casalli (Pesquisador Principal)

Gabriel F. Mendes de Brito e González (Colaborador)

Supervisor: Hugo Enrique Hernández Figueroa
FEEC/UNICAMP

5 de agosto de 2025
Campinas - SP | Brasil

Resumo

Metassuperfícies têm revolucionado a óptica ao permitirem um controle sem precedentes sobre a luz em nanoescala, viabilizando o design de dispositivos fotônicos ultracompactos e surgindo como candidatos perfeitos para integrar sistemas holográficos. A ideia de hologramas de alta fidelidade e complexidade permeia o imaginário popular a décadas e esses avanços retomam um tema contemporâneo que explora a criação de novas mídias e suas aplicações. Essa tecnologia possui um grande potencial de revolucionar diversas áreas da sociedade, nas artes, em realidades aumentadas e até mesmo na medicina. Logo, é necessário dedicar esforços na realização técnica desse dispositivo e na sua contextualização na modernidade. O projeto está pautado na proposta de design de uma metassuperfície com propriedades holográficas e, como complemento a essa função, que também possa agir como uma grade de Dammann, estrutura capaz de projetar uma nuvem de pontos tridimensionais. A mudança entre essas duas atuações deverá ocorrer com a alteração na polarização da luz incidente, caracterizando uma metassuperfície multiplexada, pois é capaz de integrar múltiplas funcionalidades por polarização. O desenvolvimento de tal dispositivo, no entanto, configura um complexo problema de design inverso: determinar a topologia nanométrica exata que produzirá os campos ópticos desejados. Para projetar esse aparato, a metodologia integra abordagens teóricas, experimentais e computacionais. A fundamentação do projeto incluirá uma etapa de caracterização morfológica de amostras existentes via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). O pipeline computacional principal envolverá a síntese de mapas de fase com o algoritmo de Gerchberg-Saxton e a construção de uma biblioteca de meta-átomos via simulações eletromagnéticas. Como etapa avançada e condicional, algoritmos genéticos (NSGA-II) serão explorados para otimização do design. A análise dos resultados será guiada pelas seguintes métricas de desempenho: coeficiente de correlação ($\rho \geq 0,98$), eficiência de difração ($DE \geq 70\%$), erro de uniformidade ($RMSE < 0,1$) e campo de visão ($FOV \geq 60^\circ$). O objetivo é entregar o design computacional completo holográfico multiplexado com sua performance óptica validada numericamente, incluindo a apresentação de soluções Pareto-ótimas.

Palavras-chave: *Metassuperfícies, Holografia, Grades de Dammann, Multiplexação por Polarização, Design Inverso, Nanofotônica, Algoritmos Genéticos Multiobjetivo.*

Abstract

Metasurfaces have revolutionized optics by enabling unprecedented control over light at the nanoscale, paving the way for the design of ultracompact photonic devices and emerging as perfect candidates for integrating holographic systems. The idea of high-fidelity and complex holograms has permeated the popular imagination for decades, and these advancements revisit a contemporary theme that explores the creation of new media and their applications. This technology holds great potential to revolutionize several areas of society, in the arts, in augmented reality, and even in medicine. Therefore, it is necessary to dedicate efforts to the technical realization of this device and its contextualization in modernity. This project is focused on the design proposal of a metasurface with holographic properties and, as a complement to this function, that can also act as a Dammann grating, a structure capable of projecting a three-dimensional point cloud. The switch between these two functionalities is to be achieved by changing the polarization of the incident light, characterizing a multiplexed metasurface, as it is capable of integrating multiple functionalities by polarization. The development of such a device, however, constitutes a complex inverse design problem: determining the exact nanometric topology that will produce the desired optical fields. To design this apparatus, the methodology integrates theoretical, experimental, and computational approaches. The project's foundation will include a morphological characterization stage of existing samples via Scanning Electron Microscopy (SEM). The main computational pipeline will involve the synthesis of phase maps with the Gerchberg-Saxton algorithm and the construction of a meta-atom library via electromagnetic simulations. As an advanced and conditional step, genetic algorithms (NSGA-II) will be explored for design optimization. The analysis of the results will be guided by the following performance metrics: correlation coefficient ($\rho \geq 0.98$), diffraction efficiency ($DE \geq 70\%$), uniformity error ($RMSE < 0.1$), and field of view ($FOV \geq 60^\circ$). The objective is to deliver the complete computational design of the multiplexed holographic metasurface with its optical performance numerically validated, including the presentation of Pareto-optimal solutions.

Keywords: *Metasurfaces, Holography, Dammann Gratings, Polarization Multiplexing, Inverse Design, Nanophotonics, Multi-objective Genetic Algorithms.*

1 Introdução

O avanço das ciências naturais e das engenharias frequentemente revoluciona a forma como vemos e interagimos com o mundo, fenômeno que ficou ainda mais evidente nos últimos séculos, com novas tecnologias de transporte e comunicação, que efetivamente diminuíram as distâncias entre as pessoas, e teorias como a quântica e a relatividade, que expuseram outras formas de olhar a natureza. Atualmente, pode-se facilmente fotografar e compartilhar algo, conversar em tempo real com alguém em outro país e acessar um espaço midiático cada vez mais aberto. Além disso, há esforços cada vez maiores em novas formas de interação utilizando inteligência artificial e holografia. Cada nova mídia surge com um impacto social, mudando a vida das pessoas.

Dentre todas as formas de comunicação visual, a holografia ganha destaque, pois, mesmo possuindo restrições técnicas fatais que impeçam sua presença no cotidiano, ainda se mostra presente no imaginário popular há muitas décadas. Podemos citar inúmeras obras de ficção que mostram hologramas como uma interface humano-máquina, além de também ser aplicado em muitos eventos de música, tendo exemplos onde o próprio artista é representado por uma imagem holográfica projetada no palco. Tudo isso nos indica que a introdução de um dispositivo holográfico eficiente e massivo é capaz de impactar profundamente a sociedade. Existe um precedente histórico se olharmos para como a fotografia e o filme mudaram o mundo, permitindo novas formas de expressão e transmissão de informações, ainda que circundados por polêmicas, com contemporâneos assustados com a possibilidade da desvalorização das artes clássicas e até mesmo por fortes emoções, vide a comoção causada nas primeiras exposições do cinema.

O debate sobre novas mídias constitui uma área muito importante de pesquisa no presente momento. Podemos citar alguns autores como Peter Weibel [1, 2], Charles S. Peirce [3], Giselle Beiguelman [4] e Vilém Flusser [5] que são fundamentais nesse contexto, ao abordarem desde a teoria da comunicação e linguagem, até as mudanças culturais e estéticas causadas pela tecnologia. A holografia constitui um cenário perfeito para articular essas ideias, mas também se estende para outros ramos de interesse, como a medicina, onde poderiam ser aplicadas para melhorar diagnósticos, planejamentos de cirurgias e na capacitação de profissionais da saúde [6, 7]. Visto a relevância da holografia, tanto social quanto científica, nossa pesquisa irá se debruçar sobre esse tema.

Esse conceito foi primeiramente proposto por Dennis Gabor em 1948 [8], sendo reconhecido como um marco na busca pelo controle preciso da luz, impulsionada desde a consolidação da teoria eletromagnética por James Clerk Maxwell no século XIX. Sua proposta consistia em utilizar um arranjo óptico complexo para registrar e reconstruir imagens tridimensionais usando a interferência da luz. No entanto, a holografia enfrenta um desafio fundamental: um detector óptico, como uma câmera, registra facilmente a intensidade – o “brilho” – da luz, mas perde a informação de sua fase – o alinhamento relativo das ondas de luz. Ambas são essenciais para reconstruir uma cena 3D.

Essa lacuna gerou o chamado “problema de recuperação de fase”, e a solução passou para a esfera computacional. Algoritmos iterativos como o de Gerchberg-Saxton (GS) [9] e suas variações utilizam princípios da óptica de Fourier para calcular o “mapa de fase” — um projeto ou uma espécie de “planta baixa” que instrui como a fase da luz deve ser manipulada em cada ponto de uma superfície para formar a imagem desejada. Mesmo na chamada holografia digital [10], que se caracteriza pela utilização de aparatos óptico-digitais, e com os avanços subsequentes em moduladores espaciais de luz (SLMs) e processamento por unidade de processamento gráfico (GPU), erros, baixa resolução e ineficiência ainda permeiam a holografia.

Um novo paradigma para a manipulação da luz emergiu com os metamateriais: objetos artificiais com propriedades únicas, determinadas apenas pela sua estrutura interna microscópica. A unidade básica desses materiais são os meta-átomos, não átomos no sentido químico, mas pequenas estruturas engenheiradas capazes de modular localmente a fase, amplitude e polarização da luz incidente [11]. Quando esses meta-átomos são organizados de maneira plana, formam metassuperfícies. Tal “óptica plana” tem viabilizado a miniaturização de componentes e a realização de duas ou mais funções ópticas distintas em um mesmo equipamento [12], ou seja, uma multiplexação.

Neste projeto, exploramos uma técnica específica chamada multiplexação por polarização: a capacidade de fazer com que a metassuperfície realize uma função quando iluminada com luz polarizada verticalmente e outra função completamente diferente quando a luz está polarizada horizontalmente [13, 14]. As metassuperfícies tornaram-se, assim, candidatas promissoras para o design de hologramas de alta resolução, como demonstram trabalhos recentes (e.g., [15, 16]), que exploram desde o espectro visível ao infravermelho próximo.

Outro conceito muito próximo e complementar ao do holograma são as grades de Dammann, propostas em 1971 por Hans Dammann e Karl Görtler [17]. São dispositivos capazes de manipular a frente de onda, podendo ser empregados para projetar uma nuvem de pontos estruturada e uniforme, essencial para aplicações de sensoriamento 3D e reconhecimento facial, como as usadas em smartphones modernos. Assim, uma metassuperfície multiplexada por polarização poderia alternar entre a projeção de imagens holográficas figurativas e uma grade de Dammann. Isso é possível ao se projetar meta-átomos com anisotropia, ou seja, que possuem uma geometria assimétrica (por exemplo, retangular em vez de quadrada), fazendo com que respondam de maneira diferente dependendo da orientação da luz incidente. Essa dupla funcionalidade, ilustrada na **Figura 1**, permitiria exibição óptica e percepção de profundidade simultâneas, miniaturização do componente e melhora em parâmetros-chave, como o campo de visão (FOV).

Apesar do enorme potencial, o design de uma metassuperfície com dupla funcionalidade é um desafio considerável. A necessidade de otimizar a geometria e a disposição dos meta-átomos configura um problema de design inverso: sabemos o resultado que queremos (as duas imagens projetadas), mas precisamos descobrir a causa (a estrutura física exata da metassuperfície), uma

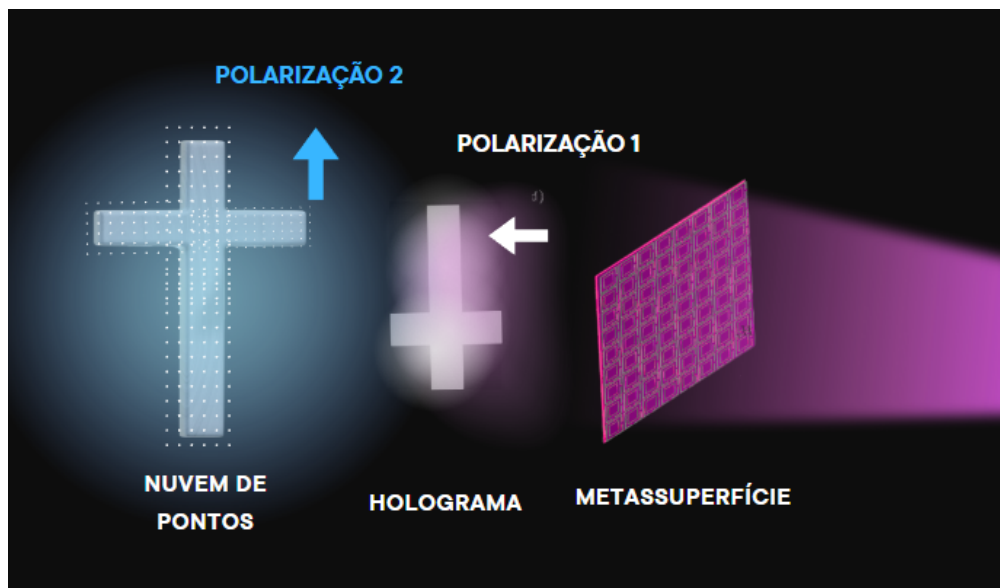


Figura 1: Diagrama de uma metassuperfície multiplexada por polarização que alterne entre propriedades holográficas e uma grade de Dammann.

tarefa que requer métodos de otimização avançados. Esse cenário impulsionou a integração de técnicas de inteligência artificial (IA) e aprendizado de máquina (doravante AM/ML, do inglês *Machine Learning*) no ciclo de design, inaugurando uma era de “design inverso inteligente” [18, 19, 20]. Redes neurais convolucionais (CNNs) e generativas (GANs) têm sido empregadas para mapear de uma funcionalidade óptica desejada para um layout de metassuperfície [21, 22, 23, 24], enquanto algoritmos evolutivos otimizam multifuncionalidades complexas [25, 26, 27].

Para enfrentar esse desafio de design inverso, nossa abordagem será primariamente computacional e dividida em etapas. Paralelamente, o projeto incluirá uma etapa de caracterização experimental de amostras de metamateriais já existentes, visando enriquecer a fundamentação teórica com uma valiosa experiência prática. Primeiro, por meio de simulações eletromagnéticas, criaremos uma “biblioteca” que cataloga a resposta óptica de diversas geometrias de meta-átomos, que servirão como nossos “blocos de montar”. Em seguida, com os mapas de fase alvo em mãos (um para o holograma, outro para a grade de Dammann), desenvolveremos um pipeline para montar o mosaico final, selecionando o melhor meta-átomo de nossa biblioteca para cada pixel da superfície. Por fim, como etapa opcional e a depender do cronograma, exploraremos o uso de otimização evolutiva (algoritmos genéticos) para refinar o design e buscar soluções ainda mais eficientes. Nosso objetivo primário, portanto, é entregar o design computacional completo de uma metassuperfície com as características enunciadas, validando numericamente sua performance e contextualizando o potencial deste aparato como uma nova mídia.

2 Objetivos

Este projeto visa o design, a simulação e a análise de uma metassuperfície holográfica multiplexada, culminando na entrega de um protótipo computacional com performance validada numericamente.

2.1 Objetivo Geral

Projetar, simular e analisar computacionalmente uma metassuperfície holográfica dielétrica, multiplexada por polarização, capaz de alternar entre duas funcionalidades distintas:

- A projeção de uma imagem holográfica, tendo como meta de fidelidade um coeficiente de correlação de Pearson $\rho \geq 0.98$.
- A geração de uma nuvem de pontos tridimensional, visando uma eficiência de difração (DE) $\geq 70\%$.

O projeto culminará na entrega dos seguintes artefatos computacionais: (i) os mapas de fase otimizados para ambas as funções; (ii) uma biblioteca de meta-átomos dielétricos anisotrópicos que mapeia suas geometrias à resposta óptica completa (fase e amplitude) para cada polarização; (iii) o design final do mosaico da metassuperfície com sua performance validada por simulação, potencialmente incluindo a apresentação de soluções Pareto-ótimas caso a etapa de otimização genética seja executada.

2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos, com seus respectivos entregáveis e metas (quando aplicável), serão perseguidos:

1. Fundamentação Teórica e Caracterização Experimental:

- Realizar a caracterização morfológica de ao menos duas amostras de metamateriais (e.g., metalentes, biossensores) por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) no LNNano/CNPEM, para consolidar o entendimento prático das estruturas nanométricas que compõem estes dispositivos.

2. Desenvolver o pipeline de design da metassuperfície holográfica:

- Gerar os perfis de fase alvo (mapas de fase) para as duas funcionalidades (holograma e nuvem de pontos), empregando o algoritmo de Gerchberg-Saxton (e suas variantes,

- e.g., WGS) com propagação pelo método do espectro angular, visando um coeficiente de correlação de Pearson (ρ) da imagem reconstruída em relação à imagem-alvo de $\rho \geq 0.98$.
- Construir uma biblioteca computacional com pelo menos 150 geometrias únicas de meta-átomos dielétricos anisotrópicos, através de simulações eletromagnéticas (e.g., em CST Studio Suite®). Essa biblioteca irá mapear as geometrias dos nanopilares (L_x, L_y, H, P) às suas respostas de fase e amplitude para duas polarizações ortogonais em $\lambda_0 = 1064$ nm, assegurando cobertura completa do espaço de fase ($0 - 2\pi$) com erro de desvio de fase por meta-átomo inferior a 5° e alta transmitância média (meta: $> 80\%$).
 - Implementar um pipeline computacional para gerar o layout físico (e.g., em formato GDSII) de uma metassuperfície de alta densidade (e.g., 1024×1024 meta-átomos), selecionando para cada pixel o meta-átomo da biblioteca que melhor satisfaça, simultaneamente, os requisitos de fase quantizada para as duas polarizações.

3. Verificar numericamente o desempenho óptico da metassuperfície projetada:

- Realizar simulações numéricas da metassuperfície completa para caracterizar sua performance óptica, avaliando a qualidade da imagem holográfica (meta: $\rho \geq 0.98$) e as características da nuvem de pontos, com as seguintes metas: eficiência de difração $DE \geq 70\%$; erro de uniformidade (RMSE, definido como a raiz-média-quadrática da diferença normalizada entre as intensidades simulada e alvo) < 0.1 ; e campo de visão (FOV) $\geq 60^\circ$.
- Comparar os resultados simulados com os benchmarks de desempenho declarados e com resultados relevantes da literatura (e.g., artigos publicados sobre o tema entre 2023-2025).

4. Explorar otimização avançada do design (condicional ao cronograma):

- Se o cronograma permitir, investigar a aplicação do algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II para otimizar os parâmetros geométricos dos meta-átomos, visando múltiplos critérios como fidelidade de fase, eficiência de transmissão e robustez a erros de fabricação (meta: variação de fase $< 5\%$ para desvios de ± 10 nm nas dimensões críticas).
- Consolidar e analisar a fronteira de Pareto resultante para identificar os compromissos (*trade-offs*) entre as diferentes metas de otimização (e.g., fidelidade vs. eficiência).

3 Metodologia

O presente projeto de pesquisa será estruturado para realizar o design e a análise de uma metasuperfície holográfica multiplexada. O percurso metodológico inicia-se com o estudo e exposição dos *Fundamentos Físico-Matemáticos* (3.1), detalhando o “porquê” de nossas escolhas teóricas, através dos princípios da óptica de Fourier, recuperação de fase, grades de Dammann e o conceito de meta-átomos anisotrópicos para multiplexação por polarização. Na sequência, o *Pipeline Computacional* (3.2) descreve o “como”, ou seja, as etapas práticas para a síntese dos mapas de fase e a construção da biblioteca de meta-átomos via simulações eletromagnéticas. Finalmente, a seção de *Otimização Bio-inspirada e Perspectivas em Aprendizado de Máquina* (3.3) propõe como podemos refinar nosso design com Algoritmos Genéticos (NSGA-II).

3.1 Fundamentos Físico–Matemáticos

Para a compreensão plena dos meta-materiais, é imprescindível um entendimento claro dos conceitos físicos e matemáticos que regem essas estruturas. Portanto, é de suma importância que seja realizada uma revisão aprofundada nas teorias eletromagnética, óptica e ondulatória, pois esses fundamentos regem a interação luz-matéria em nanoescala e informarão as estratégias de design do dispositivo. A concretização da metassuperfície holográfica multiplexada ancora-se nos seguintes pilares: (i) o conceito de meta-átomos com anisotropia geométrica para o controle independente da fase de polarizações ortogonais da luz; (ii) a teoria da difração escalar e os algoritmos iterativos para recuperação de fase holográfica; e (iii) os princípios de design de grades de Dammann para a geração eficiente de nuvens de pontos uniformes. Esta seção, portanto, fornecerá o embasamento teórico para justificar os métodos e as métricas de performance escolhidos nos objetivos.

3.1.1 Modelagem de Campo Óptico e Recuperação de Fase Holográfica

A Óptica de Fourier [28] é um campo da física que estuda sistemas ópticos considerando ondas como a superposição de ondas planas, se valendo da ferramenta matemática denominada Transformada de Fourier (FT), capaz de decompor qualquer sinal ou imagem em uma soma de ondas senoidais (senos e cossenos) com diferentes frequências, amplitudes e fases. Assim, é possível converter uma função no domínio do tempo ou espaço para o domínio da frequência, permitindo a análise de quais frequências e padrões estão presentes em uma captação e com que intensidade.

A transformada de Fourier do domínio real para o domínio da frequência é dada por:

$$F(u, v) = \iint_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (1)$$

onde u e v são as frequências espaciais horizontal e vertical, respectivamente. A transformada inversa de Fourier (FT^{-1}), por sua vez, é escrita como:

$$f(x, y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} F(u, v) e^{j2\pi(ux+vy)} du dv \quad (2)$$

Esses conceitos são fundamentais para a holografia, pois, quando queremos representar um objeto por meio de um holograma, precisamos tanto da amplitude quanto da fase da luz refletida, mas, em geral, conhecemos apenas a amplitude no plano da imagem, fazendo-se necessária a recuperação de fase, e para isso é frequentemente empregado algoritmos iterativos como o de Gerchberg–Saxton (GS) [9]. O GS alterna entre os planos do holograma e da imagem por meio de transformadas de Fourier direta e inversa, aplicando restrições de amplitude e fase, funcionando em quatro etapas, conforme ilustrado no fluxograma da **Figura 2**.

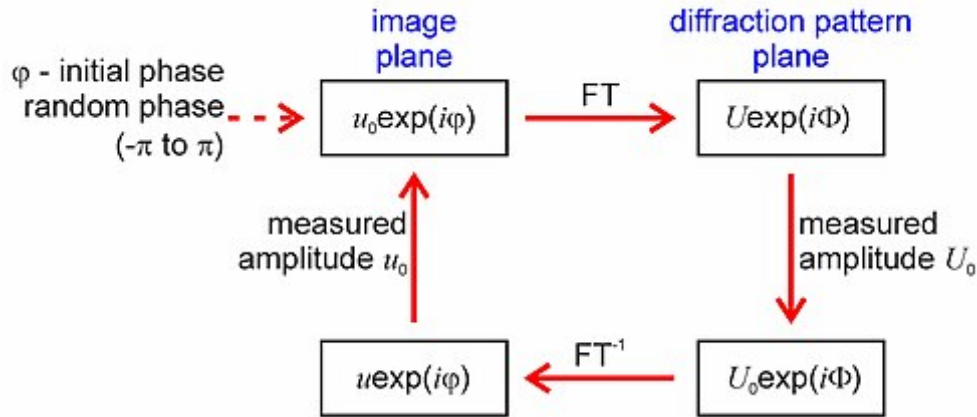


Figura 2: Fonte: GERCHBERG, R.; SAXTON, W. Gerchberg–Saxton algorithm. *Wikimedia Commons*, 2021. Disponível em: commons.wikimedia.org. Acesso em: 24 jun. 2025. Licença: CC BY-SA 4.0 [9].

Começa-se com uma amplitude conhecida u_0 no plano da imagem e atribui-se a ela uma fase aleatória $\phi \in [-\pi, \pi]$, formando $u_0 e^{i\phi}$. Aplica-se a transformada de Fourier para obter o campo óptico no plano de difração, resultando em $U e^{i\Phi}$. Mantendo essa nova fase, troca-se a amplitude simulada U pela amplitude real medida U_0 . Realiza-se a transformação de Fourier inversa e, por fim, substitui-se a amplitude u por u_0 . As letras u e U estão sendo usadas para indicar o plano da imagem e o plano de Fourier, respectivamente. Esse processo é repetido até que a diferença entre as amplitudes simuladas e medidas em ambos os planos seja mínima, para o qual é comumente usada a métrica do coeficiente de correlação de Pearson. Valores elevados (e.g., $\rho \geq 0,98$) indicam alta fidelidade, pois um valor de $\rho = 1$ significaria uma correspondência perfeita entre a imagem reconstruída e o alvo. A meta de 0,98 é um limiar de excelência adotado em trabalhos de referência na área [13, 29].

Como um adendo benéfico ao GS, para propagar o campo entre os planos durante as iterações, utilizaremos o Método do Espectro Angular (ASM), uma técnica para simular a propagação de ondas no espaço livre, decompondo o campo inicial em ondas planas com diferentes direções com a transformada de Fourier e cada componente do espectro recebendo um fator de fase que representa a propagação ao longo de uma distância.

3.1.2 Multiplexação por Polarização via Meta-Átomos Anisotrópicos

Embora os meta-átomos possam ser de vários tipos, como as nanoantenas (que operam primariamente por reflexão), este projeto foca em nanopilares, que são otimizados para o regime de transmissão, essencial para aplicações de projeção. O controle independente de duas funções ópticas por meio da polarização da luz incidente é viabilizado pelo uso de meta-átomos com anisotropia geométrica [11], estruturas em nanoescala com bases assimétricas (e.g., retangulares ou elípticas) com dimensões distintas ao longo de eixos ortogonais (e.g., $L_x \neq L_y$) que interagem de forma diferente com componentes de luz polarizadas linearmente ao longo desses eixos, impondo fases ϕ_x e ϕ_y independentes [15, 13]. Devido à infinidade de nanopilares possíveis e distintos, o design da metassuperfície envolve a criação de uma biblioteca de meta-átomos, onde cada geometria (L_x, L_y) é mapeada para um par de respostas ópticas fase-amplitude ($\phi_x, A_x; \phi_y, A_y$). A seleção de um meta-átomo para cada pixel da metassuperfície, que realize as fases alvo ϕ_H para a função holográfica e ϕ_D para a função grade de Dammann, é feita minimizando uma função de custo, tal como:

$$\Delta(L_x, L_y) = \left| \hat{E}_{xx}(L_x, L_y) - A_H e^{i\phi_H} \right| + \left| \hat{E}_{yy}(L_x, L_y) - A_D e^{i\phi_D} \right|,$$

onde \hat{E} representa a transmissão complexa simulada e A as amplitudes desejadas. Esta função de custo mede o erro total de forma simples e direta: soma-se o erro absoluto para a polarização x (holograma) com o erro absoluto para a polarização y (Grade de Dammann), buscando o meta-átomo que minimiza essa soma. A construção desta biblioteca requer simulações eletromagnéticas detalhadas, conforme descrito em 3.2.

3.1.3 Princípios das Grades de Dammann para Nuvens de Pontos

Grades de Dammann são elementos de fase otimizados para dividir um feixe incidente em múltiplas ordens de difração com intensidades uniformes, formando uma nuvem de pontos [30]. O design multinível pode aumentar a eficiência e a uniformidade [31]. A condição de amostragem $p \leq \lambda/(2 NA)$ (onde p é o passo da célula unitária e NA a abertura numérica) é crucial para evitar aliasing espacial e garantir a correta reconstrução das ordens difratadas [28].

A função de transmissão complexa da grade pode ser representada como $t(x, y) = e^{i\phi(x, y)}$, onde $\phi(x, y)$ é a modulação de fase discreta aplicada em cada célula. A amplitude das ordens difratadas

no plano de Fourier é dada pela transformada de Fourier da função de transmissão, $T(u, v)$. É interessante que essa amplitude seja aproximadamente constante para todos os pontos.

A performance é caracterizada pela eficiência de difração (DE) e pelo erro quadrático médio (RMSE) da uniformidade. A DE nos diz quanto da luz incidente é aproveitada para formar os pontos desejados, enquanto o RMSE quantifica a uniformidade do brilho entre esses pontos. Idealmente, queremos ambos os valores otimizados, mas eles frequentemente competem entre si. Por isso, Figuras de mérito (FoM) que combinam DE e RMSE, como $FoM = (1 - DE) + RMSE$ [13], orientam a otimização para padrões de alta qualidade, unindo os dois objetivos em um único valor a ser minimizado.

3.1.4 Caracterização de Metamateriais

A caracterização, nesse contexto, refere-se ao processo de analisar e medir a morfologia de dispositivos reais para conectar o design computacional à realidade da fabricação. A investigação dos detalhes morfológicos e estruturais do objeto, que será realizada utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), é crucial. Os metamateriais serão fornecidos pelo orientador, entre duas ou três unidades previamente fabricadas e destinadas a outras finalidades (metalentes e biossensores). Por sua vez, o MEV será feito no LNNano/CNPEM. Esta etapa prática de observação direta visa fornecer uma intuição valiosa sobre as formas, escalas e imperfeições inerentes à nanofabricação, enriquecendo o processo de design virtual.

3.2 Pipeline Computacional

Esta seção detalha o “como fazer”: o fluxo de trabalho computacional que materializa os conceitos da seção anterior em um design de metassuperfície validado. O pipeline abrange desde a síntese dos mapas de fase ideais até a simulação do dispositivo completo.

3.2.1 Síntese e Quantização dos Mapas de Fase

Os mapas de fase alvo, ϕ_H para o holograma e ϕ_D para a nuvem de pontos, serão gerados em *MATLAB* utilizando o algoritmo iterativo de Gerchberg-Saxton (GS), com propagação entre planos realizada pelo método do espectro angular (ASM) [28]. Serão empregadas técnicas de *zero-padding* (adição de zeros em torno de um sinal ou imagem para expandir seu tamanho antes de aplicar uma transformada) para aumentar a resolução no domínio espectral e um filtro passa-baixa espacial $(f_x^2 + f_y^2) \leq (NA/\lambda)^2$ para considerar as limitações da abertura numérica (NA) do sistema. Na prática, o filtro remove componentes espaciais de alta frequência que o sistema óptico não conseguiria captar de qualquer forma, tornando a simulação mais realista. A convergência

do GS será aceita quando o coeficiente de correlação de Pearson entre a intensidade da imagem reconstruída e a imagem alvo atingir $\rho \geq 0,98$ [13, 29].

As fases contínuas resultantes serão então quantizadas. Embora o número de níveis de fase possa ser variado (e.g., de 4 a 16 níveis), iniciar-se-á com 8 níveis, valor que representa um bom compromisso entre alta eficiência de difração e viabilidade de fabricação para metassuperfícies dielétricas [15, 11]; menos níveis são mais fáceis de fabricar, mas menos eficientes, enquanto mais níveis aumentam a complexidade de fabricação drasticamente. Os layouts de fase quantizados serão exportados no formato GDSII, padrão para a fabricação litográfica.

3.2.2 Construção da Biblioteca de Meta-Átomos e Montagem do Mosaico

A biblioteca de meta-átomos será construída através de simulações eletromagnéticas (p.ex., *CST Studio Suite®/COMSOL Multiphysics®*), utilizando o solver de Integrais Finitas no Domínio da Frequência (FIT-FD).

- **Materiais e Geometria Base:** Diversos campos de pesquisa, desde biomédicas até telecomunicações, aplicam lasers que operam no infravermelho próximo (e.g., $\lambda_0 = 1064$ nm), o que torna esses aparelhos difundidos e de fácil manuseio. Assim, é interessante iniciarmos com o estudo de materiais dielétricos de alto índice de refração e baixa perda nessa região do espectro eletromagnético, como silício amorfo (a-Si) ou dióxido de titânio (TiO_2), sobre substrato de sílica (SiO_2). O alto índice é crucial, pois permite uma forte interação com a luz, possibilitando o controle de fase desejado (02π) com estruturas de altura razoável (aspect ratio). Os meta-átomos consistirão em nanopilares (e.g., de seção transversal elíptica ou retangular para induzir anisotropia).
- **Parâmetros Geométricos a Varrer e Fixar (Exploratório):** A altura (h) dos nanopilares será explorada numa faixa (e.g., 400 nm a 800 nm) e o passo (P) da célula unitária (e.g., 350 nm a 500 nm), buscando otimizar a cobertura de fase 2π e a transmitância média. As dimensões transversais (L_x, L_y) dos pilares variarão numa faixa ampla (e.g., 50 nm a 350 nm). A escolha dos ranges e dos valores eventualmente fixados será guiada por estudos paramétricos preliminares e pela literatura [13, 11]. Os parâmetros geométricos detalhados, incluindo subvariações e combinações específicas exploradas na varredura paramétrica, poderão ser apresentados em apêndice para maior clareza.
- **Configuração da Simulação (Célula Unitária):** Condições de contorno periódicas (PBC) serão aplicadas nas faces laterais da célula unitária para tratar essa célula como um “azulejo” que se repete infinitamente, permitindo simular uma estrutura extensa no plano transversal com o custo computacional de apenas uma unidade. A excitação será realizada por portas

de Floquet, que são a ferramenta matemática ideal para analisar sistemas periódicos, decompondo o campo em “modos” e facilitando a análise vetorial das ondas refletidas e transmitidas. Considera-se uma onda plana incidente normal à superfície, com polarização linear nas direções x e y . Serão extraídos os coeficientes complexos de transmissão $S_{21,xx}$ e $S_{21,yy}$, correspondentes à transmissão da componente do campo elétrico nas mesmas direções de polarização da onda incidente, possibilitando a caracterização espectral e polarimétrica da estrutura. Será utilizada malha adaptativa com refinamento local em torno das estruturas para garantir a convergência e a precisão dos resultados numéricos.

Para cada pixel (j, k) da metassuperfície, o meta-átomo (L_x, L_y) da biblioteca, que ao minimizar a função de custo $\Delta(L_x, L_y)$ (definida em 3.1) para as fases quantizadas $\phi_{H,q}^{(j,k)}$ e $\phi_{D,q}^{(j,k)}$, será selecionado, compondo o mosaico final.

3.2.3 Validação Numérica, Recursos de HPC e Extensões Futuras

A validação da performance da metassuperfície completa será realizada propagando-se numericamente (via ASM) os campos complexos transmitidos por cada meta-átomo (conforme dados da biblioteca) até os respectivos planos de observação — um método rápido que assume que cada meta-átomo opera de forma isolada. Adicionalmente, simulações full-wave de pequenos arranjos de meta-átomos (e.g., 5×5 supercélulas) no software de simulação poderão ser realizadas para avaliar o impacto de acoplamentos entre vizinhos próximos, utilizando excitação por feixes gaussianos, ondas eletromagnéticas com perfil de intensidade transversal em formato de gaussiana. As metas de desempenho para a nuvem de pontos visarão uma eficiência de difração (DE) inicial $\geq 70\%$, com um objetivo estendido (*stretch goal*) de alcançar valores superiores a 90% (considerando perdas intrínsecas simuladas), e um RMSE de uniformidade $< 0,10$, inspirados em benchmarks de alta performance [13]. Para o holograma, o alvo será $\rho \geq 0,98$.

A construção da biblioteca de meta-átomos será executada no cluster HPC da Ilum/CNPEM. A necessidade de tal recurso computacional se justifica pela alta demanda do processo: a criação de uma biblioteca com 150 geometrias, por exemplo, pode envolver milhares de simulações individuais que, em processamento sequencial, consumiriam centenas de horas. Scripts em *Python* e *MATLAB* (com possível integração via *LiveLink™ for MATLAB®*) automatizarão o fluxo. O desenvolvimento futuro poderá incorporar algoritmos genéticos (detalhados em 3.3) para otimizar geometrias fora da varredura paramétrica inicial e, posteriormente, redes neurais [29, 25, 27, 19] para aprendizado do mapeamento fase-geometria, alinhando-se à busca por diversidade formal e eficiência.

3.3 Otimização Bio-inspirada e Perspectivas em Aprendizado de Máquina

Enquanto o design via biblioteca é eficaz, ele é limitado aos “blocos de montar” que definimos previamente. Para explorar todo o espaço de soluções e potencialmente encontrar geometrias não-intuitivas e de performance superior, propomos, como etapa subsequente, o emprego de Algoritmos Genéticos (AGs). Esta abordagem evolutiva é particularmente vantajosa para problemas de otimização complexos e multimodais em nanofotônica [18, 19].

3.3.1 Algoritmo Genético Multicritério (NSGA-II) para Design de Meta-Átomos

Um AG, especificamente o NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) [32] — um algoritmo considerado padrão-ouro para otimização com múltiplos objetivos conflitantes —, com uma população de, por exemplo, $N = 100$ indivíduos por geração, será utilizado para otimizar os meta-átomos, buscando soluções que representem os melhores compromissos entre múltiplos objetivos conflitantes. O cromossomo de cada indivíduo no AG codificará os parâmetros geométricos do meta-átomo: $\mathbf{c} = [L_x, L_y, h, p, \theta]$, onde L_x, L_y são dimensões laterais, h a altura, p o passo da célula, e θ um ângulo de rotação no plano do meta-átomo (relevante para explorar simetrias adicionais ou quando os eixos principais do meta-átomo não estão alinhados com os eixos da célula unitária, ou para meta-átomos com geometrias mais complexas do que retangulares/elípticas). A população inicial poderá ser semeada com as soluções promissoras da varredura paramétrica para acelerar a convergência.

Os objetivos de otimização (a serem combinados na função de fitness ou tratados como vetor no NSGA-II) incluirão:

1. **Fidelidade de Fase:** Minimização do desvio entre as fases efetivas ($\phi_{x,eff}, \phi_{y,eff}$) e as fases alvo (ϕ_H, ϕ_D) (garantir que o dispositivo produza a imagem correta).
2. **Eficiência de Transmissão:** Maximização da amplitude da luz transmitida para cada polarização (garantir que a imagem seja brilhante).
3. **Robustez a Erros de Fabricação:** Minimização da sensibilidade da performance óptica a perturbações nos parâmetros geométricos (e.g., $\pm 5\%$ em L_x, L_y, h), avaliada via simulações Monte Carlo sobre geometrias selecionadas [33] (garantir que o dispositivo funcione mesmo com as imperfeições do mundo real).
4. **Métricas Adicionais:** Como a uniformidade (RMSE) para a nuvem de pontos.

O NSGA-II é escolhido por sua eficácia em encontrar um conjunto diversificado de soluções Pareto-ótimas [34, 35]. A fronteira de Pareto resultante oferecerá um espectro de designs com diferentes balanços entre os objetivos, permitindo uma “curadoria algorítmica” [5] na seleção final. Serão

empregados operadores genéticos padrão: seleção por torneio, cruzamento como Simulated Binary Crossover (SBX) e mutação polinomial, adequados para parâmetros reais [36, 34]. Os critérios de parada incluirão um número máximo de gerações (e.g., 200-500) ou a estagnação da fronteira de Pareto. A avaliação de cada indivíduo exigirá simulações eletromagnéticas (e.g., CST Studio Suite®).

3.3.2 Modelos Substitutos e Aprendizado Profundo como Horizonte de Investigação

Como a otimização por AG exige milhares de simulações eletromagnéticas de alto custo computacional, os dados gerados (geometria \rightarrow performance) são extremamente valiosos. Eles poderão constituir um repositório para o treinamento futuro de modelos substitutos (*surrogate models*) — essencialmente, uma IA que aprende a prever o resultado de uma simulação de forma quase instantânea, acelerando drasticamente futuros ciclos de design [25, 23, 26, 27, 21]. A interpretabilidade desses modelos, utilizando técnicas como SHAP (SHapley Additive exPlanations) [37], poderia ser investigada para extrair insights de design. Esta etapa configura-se como uma perspectiva de trabalho futuro, condicionada à obtenção de um volume de dados suficiente e ao escopo de projetos subsequentes.

4 Forma de Análise dos Resultados e Gestão de Dados

A análise dos resultados deste trabalho será conduzida de forma verificar numericamente a performance do design proposto por meio simulações de desempenho, onde as metas já foram previamente estabelecidas de acordo com outras pesquisas realizadas e publicados nessa área[13, 29] e em benchmarks de alta performance [13].

Análise Quantitativa e Resultados Ópticos Esperados

Do ponto de vista técnico, os resultados primários serão os perfis de fase ϕ_H e ϕ_D gerados pelo algoritmo de Gerchberg-Saxton, e a biblioteca de meta-átomos $(L_x, L_y) \mapsto (\phi_x, A_x; \phi_y, A_y)$ obtida via simulações eletromagnéticas (p.ex., CST Studio Suite®). Espera-se que os mapas de fase alcancem alta fidelidade em relação às imagens-alvo. A biblioteca de meta-átomos deverá demonstrar capacidade de cobrir o espaço de fase 2π com alta transmitância para ambas as polarizações ortogonais no comprimento de onda de operação ($\lambda_0 = 1064$ nm), utilizando geometrias de nanopilares dielétricos (e.g., a-Si ou TiO_2) com dimensões e passo compatíveis com as técnicas de nanofabricação exploradas na literatura [15, 11]. Os resultados da biblioteca serão reportados como mapas de resposta de fase e transmitância em função das dimensões (L_x, L_y) e histogramas de desempenho.

A metassuperfície final, montada a partir da seleção otimizada de meta-átomos, será avaliada numericamente pela propagação dos campos complexos transmitidos. Para a função de holograma, o alvo é a reconstrução da imagem figurativa com $\rho \geq 0,98$ em relação ao alvo. Para a função de nuvem de pontos (gerada pela grade de Dammann), os resultados esperados incluem uma eficiência de difração (DE) inicial $\geq 70\%$, com um objetivo aspiracional de alcançar valores superiores a 90% (considerando perdas intrínsecas simuladas), e um erro quadrático médio (RMSE) de uniformidade inferior a $0,1$.

Caso a etapa de otimização com Algoritmo Genético (NSGA-II) [32] seja implementada, os resultados incluirão um conjunto de soluções Pareto-ótimas para os meta-átomos, demonstrando os trade-offs entre fidelidade de fase, eficiência de transmissão e robustez a erros de fabricação (p.ex., desvio de fase $\leq 5\%$ do valor 2π para variações de $\pm 10\text{ nm}$ nas dimensões críticas). Pretende-se que o AG identifique soluções geométricas que superem, em alguns desses critérios, aquelas obtidas pela varredura paramétrica inicial. A análise desta fronteira de Pareto será fundamental para a “curadoria algorítmica” da solução final.

4.1 Gestão dos Dados

4.1.1 Armazenamento, Versionamento e Preservação

A gestão dos dados gerados seguirá as melhores práticas de ciência aberta e reprodutibilidade, utilizando as seguintes plataformas:

- **Armazenamento Colaborativo:** Os dados brutos, resultados de simulações e documentos de trabalho serão armazenados e compartilhados entre a equipe através do **Microsoft OneDrive**, a plataforma de armazenamento em nuvem institucional da Ilum, garantindo segurança e acesso controlado.
- **Controle de Versão de Código:** Todos os scripts desenvolvidos em MATLAB e Python para simulação, análise e otimização serão versionados em um repositório privado na plataforma **GitHub**. Isso assegura a rastreabilidade das alterações, facilita a colaboração no desenvolvimento e previne a perda de código.
- **Preservação a Longo Prazo:** Após a conclusão do projeto e eventuais publicações, os conjuntos de dados finais e os códigos-fonte relevantes serão depositados no repositório público **FigShare**, recebendo um Identificador de Objeto Digital (DOI) para garantir sua citação e preservação a longo prazo.

4.1.2 Questões Éticas e de Propriedade Intelectual

Todos os autores listados assumem responsabilidade pelo conteúdo e pela condução ética deste trabalho. A concepção do projeto foi realizada conjuntamente por Humberto B. Cavallaro Neto, João Pedro Oliveira Casalli e Vinícius André Oliveira Lima Moura, com a colaboração de Gabriel Felipe Mendes de Brito e González e a orientação de Hugo Enrique Hernández Figueroa. A segurança dos dados será garantida por senhas de acesso nos equipamentos, controle de permissões no OneDrive e no repositório GitHub. Qualquer forma de divulgação dos resultados, como publicações ou apresentações em congressos, será realizada em comum acordo entre os autores e o orientador, e seguirá as diretrizes da Comissão de Pesquisa da Ilum (nep@ilum.cnpem.br).

5 Cronograma

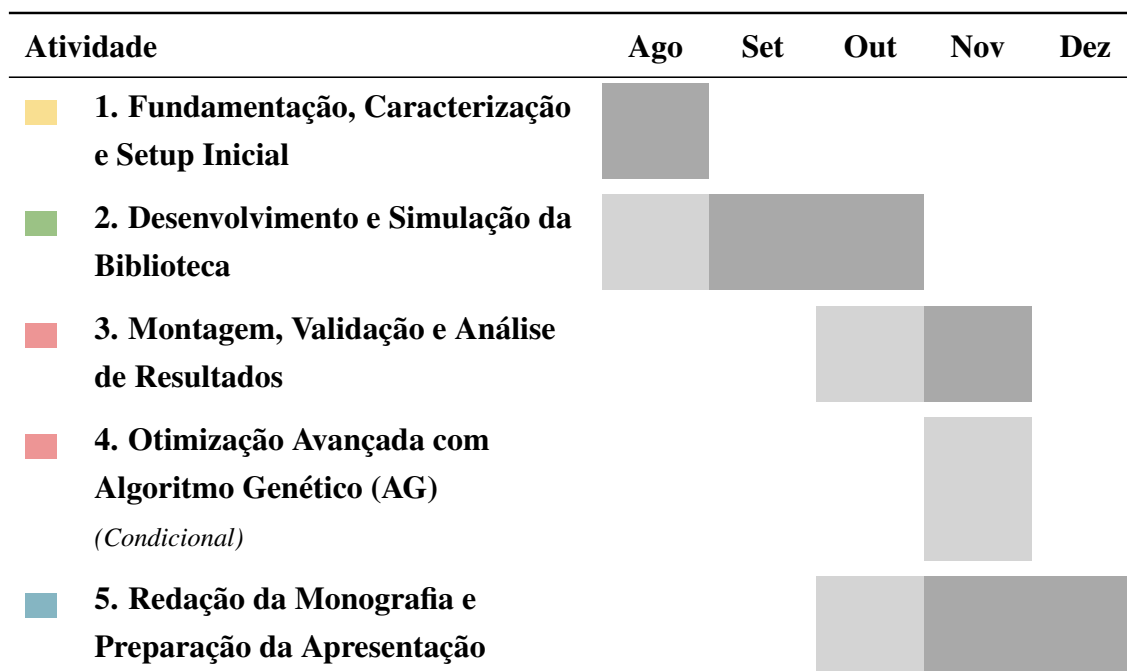


Figura 3: Cronograma de Execução Otimizado (5 meses). As barras mais claras indicam atividades secundárias ou em fase de transição. O plano reflete um fluxo de trabalho com paralelismo, onde a construção da biblioteca (gargalo do projeto) se inicia junto à fundamentação teórica, e a redação começa assim que os primeiros resultados são consolidados.

6 Descrição da Equipe e Divisão de Tarefas

A equipe do projeto é composta por pesquisadores com habilidades complementares, garantindo a cobertura de todas as áreas necessárias para o sucesso do trabalho, desde a fundamentação

teórica até a implementação computacional e a análise de viabilidade experimental.

- **Humberto B. Cavallaro Neto:** Graduando em Ciência e Tecnologia (UFABC), em intercâmbio na Ilum. No presente projeto, Humberto será responsável pela **gestão do pipeline computacional e pela análise de performance do sistema óptico**. Seu interesse em Engenharia Aeroespacial, que envolve a integração de sistemas complexos e a análise rigorosa de desempenho, será fundamental para orquestrar as diferentes etapas de simulação e para a validação final do dispositivo projetado.
- **João Pedro Oliveira Casalli:** Graduando em Ciência e Tecnologia (UFABC), em intercâmbio na Ilum. João Pedro atuará como o principal responsável pela **fundamentação físico-matemática do projeto**. Seu interesse em física teórica o posiciona como a pessoa ideal para aprofundar e aplicar os conceitos de óptica de Fourier, teoria da difração e os algoritmos de recuperação de fase, assegurando o rigor teórico que embasa toda a metodologia.
- **Vinícius André Oliveira Lima Moura:** Graduando em Ciência e Tecnologia pela Ilum - Escola de Ciência (CNPEM). Como voluntário de **Iniciação Científica na Ilum**, investiga a “Engenharia Inversa e Aprimoramento Estrutural de Metamateriais Inspirados em Origami via Aprendizado de Máquina e Modelagem Avançada”. Dada sua experiência direta com computação científica e metamateriais, Vinícius liderará a **implementação das simulações eletromagnéticas para a construção da biblioteca de meta-átomos e o desenvolvimento da otimização via algoritmos genéticos (NSGA-II)**.

– Currículo Lattes disponível em: [Lattes](#).

- **Gabriel Felipe Mendes de Brito e González (Colaborador):** Graduando em Ciência, Tecnologia e Inovação (Ilum/CNPEM). Foi bolsista de **Iniciação Científica pela UFRN no programa Aristides Leão (PAPL)**, onde analisou dados da missão espacial TESS. Com sua sólida experiência em modelagem 3D, manufatura aditiva e instrumentação científica, Gabriel será responsável por duas frentes cruciais: a **visualização 3D das estruturas projetadas e a análise da viabilidade de fabricação** dos meta-átomos. Além disso, contribuirá no **planejamento do arranjo experimental (setup) hipotético** para a caracterização óptica do dispositivo.

7 Orçamento Resumido

A tabela a seguir apresenta uma estimativa dos custos associados à execução deste projeto de pesquisa. Ressalta-se que muitos dos recursos computacionais e de software serão disponibilizados

pela instituição de ensino/pesquisa do supervisor **Hugo Enrique Hernández Figueroa**, a Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, via parceria interinstitucional com a Ilum - Escola de Ciência. Os valores são apresentados em Reais (BRL).

Tabela 1: Estimativa Orçamentária do Projeto

Rubrica Orçamentária	Valor Estimado (R\$)	Fonte Prevista
Software (Licenças especializadas/plugins)	0.00	Institucional / Recursos do Projeto
Recursos Computacionais (Custo estimado de uso de Cluster HPC)	0.00	Institucional
Microscópio Eletrônico de Varredura	0.00	Institucional
Aquisição de Livro Técnico: “Introduction to Fourier Optics” (J. Goodman)	893.00	Recursos do Projeto
Aquisição de Livro Teórico: “Filosofia da caixa preta: ensaios para uma futura filosofia da fotografia” (V. Flusser)	65.90	Recursos do Projeto
TOTAL ESTIMADO	958.90	

Observações sobre o Orçamento:

- **Software e Recursos Computacionais:** O acesso principal a softwares como MATLAB e CST Studio Suite®, bem como ao cluster HPC, é considerado como infraestrutura já disponível na instituição, não gerando custo direto ao projeto listado.
- **Aquisição de Livros:** Inclui a compra de obras fundamentais para o embasamento técnico (“Introduction to Fourier Optics” de Joseph W. Goodman) e teórico-conceitual (“Filosofia da caixa preta: ensaios para uma futura filosofia da fotografia” de Vilém Flusser) do projeto. Os preços são estimativas baseadas em consulta ao mercado (e.g., Amazon Brasil em maio de 2025) e podem variar.

Este orçamento é uma estimativa preliminar e está sujeito a ajustes conforme a variação de preços no mercado e a disponibilidade de recursos.

Referências

- [1] Peter Weibel. “The Intelligent Image: Neurocinema or Quantum Cinema?” Em: *The Intelligent Image*. Ed. por Peter Weibel. Cambridge, MA: MIT Press, 2007, pp. 594–601. ISBN: 978-0262232570.
- [2] Peter Weibel. “El mundo como interfaz”. Em: *Elementos: Ciencia y Cultura* 7.40 (2001). Publicado no período de Dezembro de 2000 a Fevereiro de 2001. Acesso em: 29 maio 2025, pp. 23–33. URL: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=29404003>.
- [3] Charles Sanders Peirce. *Collected Papers of Charles Sanders Peirce*. Ed. por Charles Hartshorne e Paul Weiss. Vol. 1–6. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1931–1935.
- [4] Giselle Beiguelman. *Políticas da imagem: vigilância e resistência na dadosfera*. São Paulo: Edições Sesc São Paulo, 2021. ISBN: 978-85-7995-264-5.
- [5] Vilém Flusser. *Filosofia da caixa preta: ensaios para uma futura filosofia da fotografia*. São Paulo: É Realizações Editora, 2018. ISBN: 978-85-8033-334-3.
- [6] S. Y. Lee e M. R. Salama. “Hologram—the future of medicine – From Star Wars to clinical imaging”. Em: *Trends in Biotechnology* 39.11 (2021). Accessed: June 11, 2025, pp. 1149–1151. DOI: [10.1016/j.tibtech.2021.04.006](https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2021.04.006). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167779921000895>.
- [7] R. Anand et al. “Holography applications toward medical field: An overview”. Em: *Indian Journal of Radiology and Imaging* 30.1 (2020). Accessed: June 11, 2025, pp. 21–25. DOI: [10.4103/ijri.IJRI_201_19](https://doi.org/10.4103/ijri.IJRI_201_19). URL: <https://www.ijri.org/article.asp?issn=0971-3026;year=2020;volume=30;issue=1;spage=21;epage=25;aulast=Anand>.
- [8] Dennis Gabor. “A New Microscopic Principle”. Em: *Nature* 161.4098 (1948), pp. 777–778. DOI: [10.1038/161777a0](https://doi.org/10.1038/161777a0).
- [9] R. W. Gerchberg e W. O. Saxton. “A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures”. Em: *Optik* 35.2 (1972), pp. 237–246.
- [10] Ulf Schnars e Werner Jueptner. *Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques*. Berlin: Springer, 2005. ISBN: 3-540-21934-X.
- [11] Nanfang Yu e Federico Capasso. “Flat Optics with Designer Metasurfaces”. Em: *Nature Materials* 13 (2014), pp. 139–150. DOI: [10.1038/nmat3839](https://doi.org/10.1038/nmat3839).
- [12] Suyeon Choi et al. “Time-multiplexed Neural Holography: A Flexible Framework for Holographic Near-eye Displays with Fast Heavily-quantized Spatial Light Modulators”. Em: *SIGGRAPH ’22 Conference Proceedings*. SIGGRAPH ’22. New York, NY, USA: ACM, ago. de 2022. DOI: [10.1145/3528233.3530734](https://doi.org/10.1145/3528233.3530734).
- [13] Shuhan Guo et al. “Polarization-controlled metasurface for simultaneous holographic display and three-dimensional depth perception”. Em: *Nanophotonics* 14.2 (2025), pp. 197–207. DOI: [10.1515/nanoph-2024-0509](https://doi.org/10.1515/nanoph-2024-0509).
- [14] Yongyao Yin et al. “Multi-Dimensional Multiplexed Metasurface Holography by Inverse Design”. Em: *Advanced Materials* 36.21 (2024), e2312303. DOI: [10.1002/adma.202312303](https://doi.org/10.1002/adma.202312303).
- [15] Augusto Martins et al. “Broadband c-Si metasurfaces with polarization control at visible wavelengths: applications to 3D stereoscopic holography”. Em: *Optics Express* 26.23 (2018), p. 30740. DOI: [10.1364/OE.26.030740](https://doi.org/10.1364/OE.26.030740).
- [16] Xumin Ding et al. “Metasurface holographic image projection based on mathematical properties of Fourier transform”. Em: *Photonix* 1.1 (2020), p. 16. DOI: [10.1186/s43074-020-00016-8](https://doi.org/10.1186/s43074-020-00016-8).

- [17] Hans Dammann e Karl Görtler. “High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms”. Em: *Optics Communications* 3.5 (1971), pp. 312–315.
- [18] Sean Molesky et al. “Inverse design in nanophotonics”. Em: *Nature Photonics* 12.11 (2018), pp. 659–670. DOI: [10.1038/s41566-018-0246-9](https://doi.org/10.1038/s41566-018-0246-9).
- [19] Zhaoyi Li et al. “Empowering Metasurfaces with Inverse Design: Principles and Applications”. Em: *ACS Photonics* 9.7 (2022), pp. 2178–2192. DOI: [10.1021/acsp Photonics.1c01850](https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.1c01850).
- [20] Zoran Jakšić. “Synergy between AI and Optical Metasurfaces: A Critical Overview of Recent Advances”. Em: *Photonics* 11.5 (2024), p. 442. DOI: [10.3390/photonics11050442](https://doi.org/10.3390/photonics11050442).
- [21] Zhaocheng Liu et al. “Generative Model for the Inverse Design of Metasurfaces”. Em: *Nano Letters* 18.10 (2018), pp. 6570–6576. DOI: [10.1021/acs.nanolett.8b03171](https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b03171).
- [22] Wei Wei et al. “End-to-end design of metasurface-based complex-amplitude holograms by physics-driven deep neural networks”. Em: *Nanophotonics* 11.12 (2022), pp. 2921–2929. DOI: [10.1515/nanoph-2022-0111](https://doi.org/10.1515/nanoph-2022-0111).
- [23] Maksym V. Zhelyeznyakov, Steve Brunton e Arka Majumdar. “Deep Learning to Accelerate Scatterer-to-Field Mapping for Inverse Design of Dielectric Metasurfaces”. Em: *ACS Photonics* 8.2 (2021), pp. 481–488. DOI: [10.1021/acsp Photonics.0c01468](https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.0c01468).
- [24] Ruichao Zhu et al. “Direct field-to-pattern monolithic design of holographic metasurface via residual encoder-decoder convolutional neural network”. Em: *Opto-Electronic Advances* 6.8 (2023), p. 220148. DOI: [10.29026/oea.2023.220148](https://doi.org/10.29026/oea.2023.220148).
- [25] Wei Ma et al. “Pushing the Limits of Functionality-Multiplexing Capability in Metasurface Design Based on Statistical Machine Learning”. Em: *Advanced Materials* 34.16 (2022), e2110022. DOI: [10.1002/adma.202110022](https://doi.org/10.1002/adma.202110022).
- [26] Romulo de Paula et al. “Multi-objective optimization of SOI-based Mach-Zehnder modulators employing deep neural networks and a non-dominant genetic algorithm”. Em: *2024 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN)*. Cancun, Mexico: IEEE, 2024, pp. 1–2. DOI: [10.1109/omn61224.2024.10685246](https://doi.org/10.1109/omn61224.2024.10685246).
- [27] Arthur Clini de Souza et al. “Back-propagation optimization and multi-valued artificial neural networks for highly vivid structural color filter metasurfaces”. Em: *Scientific Reports* 13.1 (2023), p. 21352. DOI: [10.1038/s41598-023-48064-x](https://doi.org/10.1038/s41598-023-48064-x).
- [28] Joseph W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*. 4^a ed. New York: W. H. Freeman e Company, 2017. ISBN: 978-1-319-11916-4.
- [29] Zhixiang Fan et al. “Holographic multiplexing metasurface with twisted diffractive neural network”. Em: *Nature Communications* 15.1 (2024), p. 9416. DOI: [10.1038/s41467-024-53749-6](https://doi.org/10.1038/s41467-024-53749-6).
- [30] H. Dammann e K. Görtler. “High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms”. Em: *Optics Communications* 3.5 (1971), pp. 312–315. DOI: [10.1016/0030-4018\(71\)90095-2](https://doi.org/10.1016/0030-4018(71)90095-2).
- [31] Weiqiang Yang et al. “Light-Driven Liquid Crystal Circular Dammann Grating Fabricated by a Micro-Patterned Liquid Crystal Polymer Phase Mask”. Em: *Polymers* 9.8 (2017), p. 380. DOI: [10.3390/polym9080380](https://doi.org/10.3390/polym9080380).
- [32] Kalyanmoy Deb et al. “A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II”. Em: *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6.2 (2002), pp. 182–197. DOI: [10.1109/4235.996017](https://doi.org/10.1109/4235.996017).

- [33] Arthur Baucour, Myungjoon Kim e Jonghwa Shin. “Data-driven concurrent nanostructure optimization based on conditional generative adversarial networks”. Em: *Nanophotonics* 11.12 (2022), pp. 2865–2873. DOI: [10.1515/nanoph-2022-0005](https://doi.org/10.1515/nanoph-2022-0005).
- [34] Kalyanmoy Deb. *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. Chichester: John Wiley e Sons, 2001. ISBN: 978-0-471-87339-6.
- [35] N. Srinivas e Kalyanmoy Deb. “Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms”. Em: *Evolutionary Computation* 2.3 (1994), pp. 221–248. DOI: [10.1162/evco.1994.2.3.221](https://doi.org/10.1162/evco.1994.2.3.221).
- [36] David E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989. ISBN: 0-201-15767-5.
- [37] Scott M. Lundberg e Su-In Lee. “A unified approach to interpreting model predictions”. Em: *Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017)*. Ed. por I. Guyon et al. Long Beach, CA, USA: Curran Associates, Inc., 2017, pp. 4765–4774. URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/hash/8a49aa2650399ee7c07599940791883b-Abstract.html>.