

Simulador de Estruturas Periódicas para o Desenvolvimento de Processadores Ópticos

Rafael Garay Trindade, Claudio Schepke

¹Laboratório de Estudos Avançados em Computação (LEA)
Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) – Alegrete – RS – Brasil

{rafaeltrindade.aluno, claudioschepke}@unipampa.edu.br

Resumo. *A fotônica é a base para a concepção de processadores ópticos. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um simulador interativo capaz de gerar estruturas periódicas para o percorrido da luz, em duas e três dimensões, a partir de funções matemáticas. O objetivo do projeto é fornecer uma ferramenta computacional que possibilite a produção de padrões precisos e reprodutíveis, sem a necessidade de montagens experimentais complexas.*

1. Introdução

O desenvolvimento de estruturas periódicas em escala micro e nanométrica tem se mostrado fundamental para diversas aplicações em áreas como fotônica, plasmônica e no desenvolvimento de computadores ópticos [Joannopoulos et al. 2008]. Essas estruturas permitem controlar a propagação da luz, originando fenômenos como gaps fotônicos e ressonâncias plasmônicas, que podem ser explorados em dispositivos ópticos, sensores e computadores [John 1987, Sakoda 2005].

[de Menezes 2010]) demonstrou a viabilidade da fabricação dessas estruturas por meio da técnica de superposição de padrões de interferência produzidos por feixes de laser. A tese descreve a utilização de exposições múltiplas em fotorresina, que permitem a gravação de padrões periódicos bidimensionais e tridimensionais, aplicáveis a cristais fotônicos e sensores plasmônicos [John 1987]. Apesar da eficácia do método, a abordagem experimental requer montagens laboratoriais complexas, além de equipamentos de alto custo, o que restringe seu acesso principalmente ao meio acadêmico especializado.

Nesse contexto, este trabalho propõe uma alternativa computacional para a geração de estruturas periódicas em 2D e 3D. Foi desenvolvido um simulador interativo, acessível via aplicação web, que utiliza funções matemáticas para reproduzir os padrões gerados experimentalmente em laboratório. A proposta visa oferecer uma ferramenta acessível a estudantes e pesquisadores, possibilitando a visualização, exploração e compreensão desses fenômenos sem a necessidade de infraestrutura experimental. Além de reduzir custos e tempo, o simulador também permite maior flexibilidade no estudo de diferentes configurações geométricas e parâmetros de entrada.

2. Metodologia

O desenvolvimento do simulador foi conduzido e realizado pela equipe em etapas bem distribuídas, com um grande foco na implementação de uma aplicação web acessível. A seguir, são descritos os principais passos seguidos.

O sistema foi implementado em Python, utilizando o microframework Flask para a construção da aplicação web. Para a visualização gráfica, foram empregadas bibliotecas como Matplotlib e NumPy, que possibilitam a geração de gráficos bidimensionais e tridimensionais de alta qualidade, além de garantir um maior poder matemático. A interface web foi desenvolvida com HTML5, CSS3 e JavaScript, garantindo responsividade e compatibilidade com diferentes dispositivos e navegadores.

A função básica utilizada para gerar os padrões de interferência é dada por:

$$I(x, y) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot \sin(2\pi f_i x + \phi_i) \quad (1)$$

onde A_i representa a amplitude, f_i a frequência e ϕ_i a fase de cada onda componente. Para estruturas tridimensionais, a equação foi expandida para:

$$I(x, y, z) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot \sin(2\pi(f_{xi}x + f_{yi}y + f_{zi}z) + \phi_i) \quad (2)$$

A aplicação recebe como entrada funções matemáticas que descrevem a superposição de ondas, de forma análoga à interferência de feixes de laser. O usuário pode ajustar os parâmetros como frequência, amplitude e fase, de modo a visualizar diferentes padrões periódicos, mudando em tempo real o gráfico. A interface permite o ajuste fino de cada parâmetro através de controles deslizantes e campos numéricos, com validação em tempo real dos valores inseridos.

Após a definição dos parâmetros, o sistema processa as funções e gera representações gráficas em 2D e 3D. Os gráficos são exibidos diretamente na interface web, permitindo ajustes em tempo real e experimentação interativa. Além de conseguir rotacionar em qualquer direção, permitindo um maior entendimento da interferência dos feixes. O sistema utiliza algoritmos de renderização acelerada para garantir tempos de resposta adequados mesmo para estruturas complexas.

Para validar os resultados, foram comparados os padrões simulados com a projeção da mesma função em 2D, que ressalta a profundidade baseada na coloração. Essa comparação garantiu a coerência entre os padrões gerados computacionalmente e os arranjos que podem ser obtidos em laboratório. Adicionalmente, foram realizados testes de desempenho para avaliar o tempo de processamento em diferentes configurações de hardware.

A arquitetura do sistema segue o padrão MVC (*Model-View-Controller*), separando claramente a lógica de negócio, a interface do usuário e o controle da aplicação. O backend foi implementado em Flask, responsável pelo processamento matemático e geração dos gráficos. O frontend utiliza Bootstrap para garantir uma interface responsiva e intuitiva. A comunicação entre frontend e backend é realizada através de APIs RESTful, permitindo a atualização assíncrona dos gráficos sem recarregamento completo da página.

3. Resultados e Discussão

Os testes realizados demonstraram que o simulador foi capaz de gerar padrões periódicos em 2D e 3D de maneira eficiente e interativa. A interface web se mostrou intuitiva, permitindo que usuários sem experiência prévia em programação conseguissem explorar diferentes parâmetros e visualizar os resultados.

Entre os principais resultados, destacam-se:

- Geração de padrões periódicos em 2D, representando interferências de duas ou mais ondas senoidais;
- Visualização de estruturas tridimensionais formadas a partir da composição de múltiplas funções, semelhantes aos arranjos descritos por Menezes (2010);
- Flexibilidade na escolha de parâmetros, permitindo simulações diversas em pouco tempo e sem custo adicional;
- Tempo médio de processamento de 2.3 segundos para estruturas 3D complexas;
- Interface responsiva compatível com dispositivos desktop e móveis.

Como exemplo, a Figura 1 ilustra um padrão gerado pelo simulador, obtido a partir da combinação de funções senoidais com parâmetros pré-definidos.

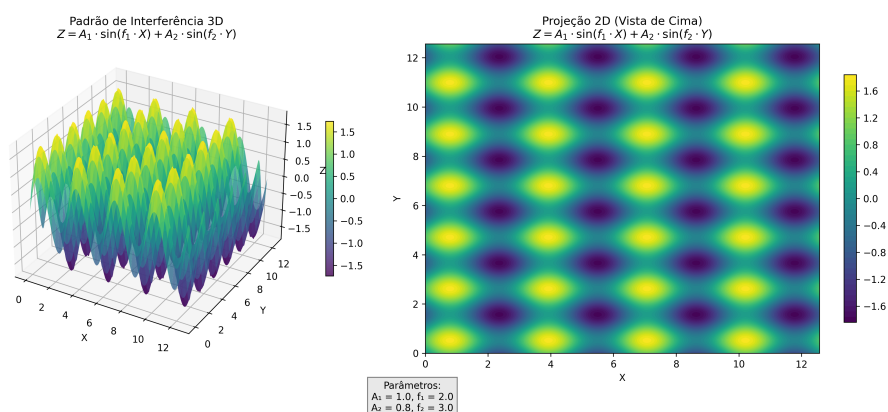


Figura 1. Exemplo de padrão periódico gerado pelo simulador através da superposição de múltiplas funções senoidais. A imagem mostra a visualização 3D (esquerda) e a projeção 2D correspondente (direita).

3.1. Análise de Desempenho

Foram realizados testes de desempenho para avaliar a eficiência do sistema em diferentes configurações. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para a geração de estruturas com complexidade crescente.

Os resultados demonstram que o sistema mantém tempos de resposta adequados mesmo para estruturas tridimensionais complexas, tornando-o viável para uso interativo. O consumo de memória também se mantém dentro de limites razoáveis para a maioria dos dispositivos computacionais atuais.

3.2. Comparação com Trabalhos Relacionados

Quando comparado a outras soluções existentes, nosso simulador apresenta vantagens significativas em termos de acessibilidade e usabilidade. Diferente de softwares comerciais

Tabela 1. Tempos de processamento para diferentes complexidades de estruturas

Tipo de Estrutura	Resolução	Tempo (s)	Uso de Memória (MB)
Simple 2D	256x256	0.4	45
Complex 2D	512x512	0.8	82
Simple 3D	64x64x64	1.2	125
Complex 3D	128x128x128	2.3	285
Muito Complex 3D	256x256x256	4.7	890

como COMSOL Multiphysics ou Lumerical, que requerem licenças caras e treinamento especializado, nossa solução é de código aberto e pode ser executada diretamente em navegadores da web, sem necessidade de instalação adicional.

Além disso, a interface intuitiva torna o sistema adequado para uso educacional, permitindo que estudantes visualizem conceitos abstratos de interferência e formação de padrões periódicos de forma concreta e interativa.

4. Conclusão

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um simulador interativo para a geração de estruturas periódicas em 2D e 3D. A ferramenta mostrou-se eficaz na visualização de padrões formados a partir de funções matemáticas, servindo como alternativa computacional à abordagem experimental baseada em lasers.

Em comparação com os métodos descritos por Menezes (2010), a solução proposta não substitui os experimentos laboratoriais, mas oferece uma alternativa de baixo custo e alta acessibilidade para o estudo inicial desses fenômenos. Assim, o simulador pode ser empregado tanto em atividades de pesquisa quanto em práticas didáticas, facilitando a compreensão de conceitos relacionados à interferência e a formação de estruturas periódicas.

Como trabalhos futuros, pretende-se ampliar a biblioteca de funções matemáticas disponíveis, incluir a possibilidade de exportação dos modelos em formatos compatíveis com softwares de CAD/CAE e investigar a aplicação da ferramenta no ensino de óptica em nível de graduação. Adicionalmente, planeja-se implementar funcionalidades de colaboração em tempo real, permitindo que múltiplos usuários trabalhem simultaneamente na mesma simulação.

Referências

- de Menezes, J. W. (2010). *Fabricação e caracterização de estruturas periódicas utilizando superposição de padrões de interferência produzida por feixes de laser de picosegundos*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.
- Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., and Meade, R. D. (2008). *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*. Princeton University Press, 2 edition.
- John, S. (1987). Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Physical Review Letters*, 58(23):2486–2489.
- Sakoda, K. (2005). *Optical Properties of Photonic Crystals*. Springer, 2 edition.