



GRUPO LEMAC

Relatório de Progresso: Metassuperfícies Holográficas

Versão 1.0

Vinícius A. O. L. Moura
João Pedro Oliveira Casalli
Humberto Cavallaro

`vinicius23011@ilum.cnpem.br/v199593@g.unicamp.br`
`joao25042@ilum.cnpem.br`
`humberto25043@ilum.cnpem.br`

Orientador: Prof. Dr. Hugo Enrique Hernandez Figueroa

August 27, 2025

1 Objetivos da semana anterior

No início destas últimas duas semanas, estabelecemos os seguintes objetivos principais:

- Concluir a importação de resultados do CST Studio (amplitude e fase complexas para modos TE e TM) e armazená-los em uma *meta_library* em formato CSV.
- Implementar o algoritmo de Gerchberg–Saxton (GS) acoplado ao método ASM no MATLAB para gerar um mapa de fase; integrar métricas de correlação de Pearson e de bordas (Canny).
- Criar um *script* de varredura (*sweep*) no CST para automatizar a simulação de 64 meta-átomos variando os parâmetros geométricos a , b , h e períodos p_x e p_y .
- Iniciar a revisão bibliográfica sobre holografia, transformadas de Fourier e metassuperfícies a fim de fundamentar a monografia.

Status dos objetivos

- **Importação de resultados do CST: concluído.** Foram exportados oito arquivos ASCII para cada meta-átomo simulando os coeficientes de dispersão entre os modos TE e TM. A importação para o MATLAB foi automatizada.
- **Implementação do GS/ASM: concluído.** O script MATLAB gera um mapa de fase a partir do alvo escolhido e aplica restrições de amplitude em cada iteração. As métricas de erro foram calculadas por iteração, gerando curvas de convergência.
- **Automação de varredura no CST: em andamento.** A construção de um macro enfrenta problemas de permissão e exportação de curvas; como alternativa, optamos por varrer parâmetros manualmente com *Parameter Sweep* do CST e exportar os ASCII diretamente.
- **Revisão bibliográfica: em progresso.** Já foram redigidas seções sobre transformadas de Fourier, algoritmo de Gerchberg–Saxton e princípios básicos de holografia e metassuperfícies, a partir da revisão teórica disponível.

2 Resultados obtidos

2.1 Biblioteca de meta-átomos

A tabela a seguir resume parcialmente os meta-átomos simulados até o momento, com parâmetros geométricos em nm e os módulos e fases dos coeficientes de transmissão co-polarizados ($S_{21,TE}$ e $S_{21,TM}$). Para consistência, os ângulos de fase foram reduzidos ao intervalo $[0^\circ, 360^\circ)$.

Table 1: Resultados de meta-átomos simulados no CST. Valores de módulo e fase para modos TE–TE e TM–TM. As fases estão no intervalo $[0^\circ, 360^\circ)$.

a (nm)	b (nm)	h (nm)	$ S_{21,TE} $	$\arg(S_{21,TE})$ $^\circ$	$ S_{21,TM} $	$\arg(S_{21,TM})$ $^\circ$
120	140	600	0.97	45.1	0.92	110.8
160	200	600	0.91	299.5	0.95	321.3
200	220	600	0.78	272.6	0.82	280.8
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots

Obs.: A tabela será atualizada assim que os demais meta-átomos forem simulados.

2.2 Mapa de índices de meta-átomos (heatmap)

A Figura 1 mostra o *heatmap* do índice do meta-átomo selecionado para cada pixel do holograma. Cada cor corresponde a um índice da *meta_library*; no exemplo ilustrado, a biblioteca contém $|\text{lib}| = 65$ elementos, dos quais 20 são únicos em fase/módulo efetivos.

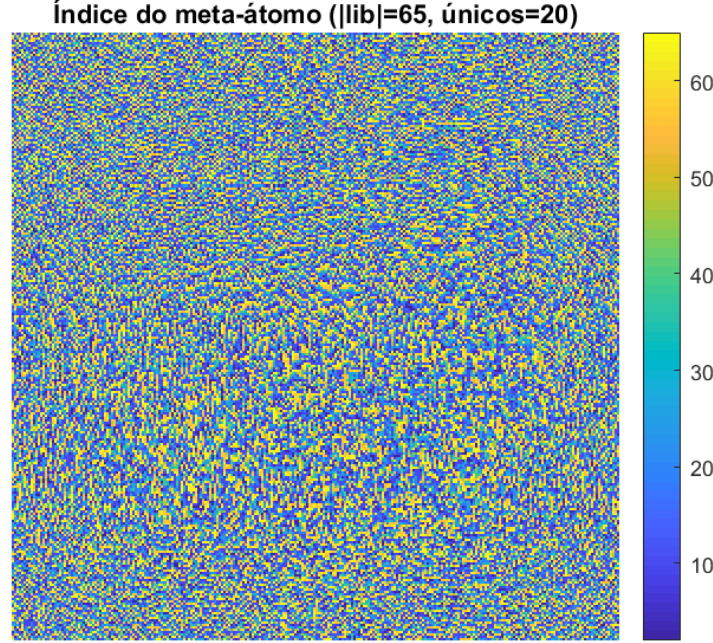


Figure 1: Heatmap do índice do meta-átomo escolhido por pixel (ex.: $|\text{lib}| = 65$, únicos = 20). Cores diferentes indicam índices distintos na biblioteca.

Como o heatmap é formado (resumo do script). A partir dos ASCII do CST, o MATLAB:

1. **Importa e higieniza** os coeficientes complexos S_{21} (tratando separadores decimais, removendo cabeçalhos, pegando o último ponto da curva).
2. **Valida** sanidade física (passividade por potência $|S_{21}|^2 + |S_{11}|^2 \approx 1$ e limite de *cross-pol* $< 0,03$), e **deduplica** entradas pelo triplo (a, b, h) e períodos.
3. **Normaliza** as fases para o intervalo $[0^\circ, 360^\circ)$ e consolida a biblioteca em `meta_library.csv` contendo $\{|S_{21,TE}|, \arg S_{21,TE}, |S_{21,TM}|, \arg S_{21,TM}\}$.
4. **Gera o mapa de fase** (via GS/ASM) no plano do dispositivo, produzindo ϕ_x e ϕ_y desejados por pixel (aqui assumidos iguais).
5. **Seleciona** para cada pixel o índice k que minimiza o erro complexo

$$\varepsilon_k = |e^{i\phi_x} - T_{TE}^{(k)}|^2 + |e^{i\phi_y} - T_{TM}^{(k)}|^2,$$

onde $T_{TE}^{(k)}$ e $T_{TM}^{(k)}$ são as respostas complexas do k -ésimo meta-átomo na biblioteca. O mapa de índices $k(x, y)$ é então mostrado como *heatmap*.

2.3 Implementação do GS/ASM

O algoritmo de Gerchberg–Saxton foi implementado para gerar hologramas de fase a partir de um alvo (imagem JPEG). O método de propagação de espectro angular (ASM) foi utilizado para promover a propagação livre em z com abertura numérica $NA = 0,25$ e comprimento de onda $\lambda = 1064$ nm. As figuras abaixo ilustram algumas etapas e resultados:

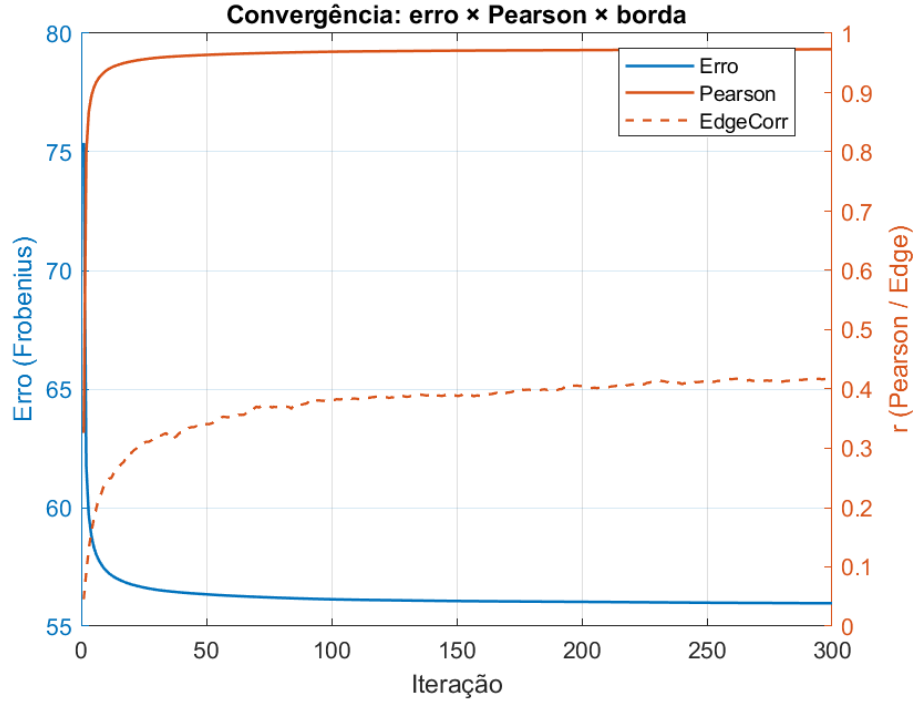


Figure 2: Curva de convergência: erro (linha azul) e coeficientes de correlação de Pearson e bordas (linhas tracejadas).

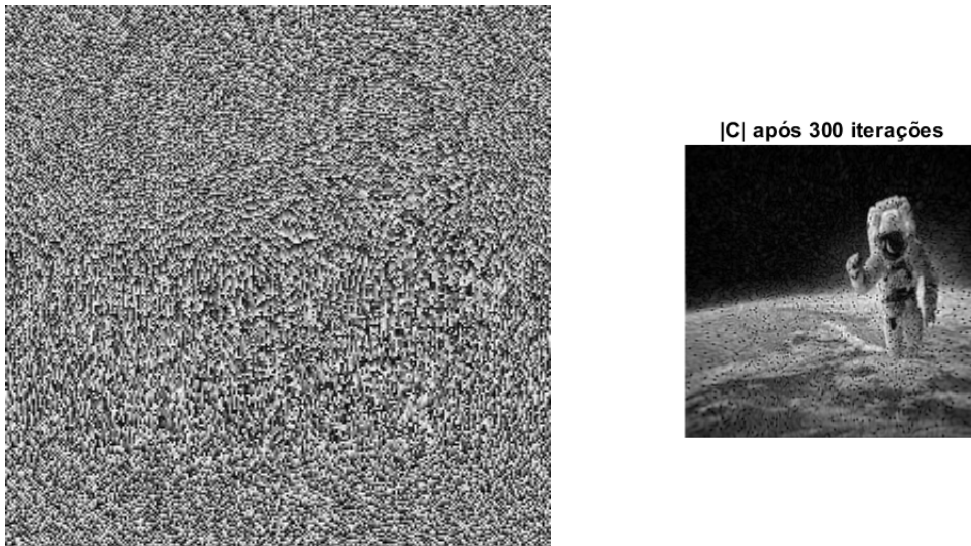


Figure 3: Esquerda: mapa de fase quantizado gerado pelo GS. Direita: reconstrução final da imagem alvo após 300 iterações.

2.4 Análise do script CST

Apesar de tentativas com macros, a exportação automática encontrou limitações de API no CST (mensagem de que certos métodos como `Solver.WaitForFinished` ou `ASCIIExport.FieldSeparator` não existem). Por isso, optamos por varrer parâmetros manualmente via *Parameter Sweep*. Para cada combinação, o CST foi configurado com:

- Parâmetros geométricos variando a e b de 120–250 nm em passos de 20 nm e $h = 600$ nm.
- Malha tetraédrica com Cells per wavelength = 10 e refinamento adaptativo em até 3 passadas.
- Limitações de cross-polarização abaixo de 0,03 e verificação de passividade (somatório das potências).
- Condições de contorno periódicas em x, y e abertas em z , com excitação via portas de Floquet (modo TE e TM em Z_{\min}/Z_{\max}).

Os dados de amplitude complexa dos S-parâmetros foram exportados como arquivos ASCII (8 arquivos por simulação) e importados no MATLAB.

2.5 Aproximações e problemas

- Algumas exportações no CST geram arquivos vazios quando a malha não é construída corretamente; foi necessário inspecionar manualmente cada simulação para garantir malha não vazia.
- O macro de automação apresentou erros de permissão e uso de métodos inválidos; substituímos por varreduras via interface do CST.
- Até o momento, a biblioteca contém poucos meta-átomos; mais dados são necessários para cobrir a fase em $[0, 2\pi)$ uniformemente.

3 Objetivos para a próxima semana

Para avançar com o projeto, definem-se as seguintes tarefas, com prioridades:

Alta prioridade

- Simular mais meta-átomos planejados no CST, exportar os 8 ASCII de cada um, importar os resultados no MATLAB e atualizar `meta_library.csv`.
- Corrigir e expandir o script de importação de dados para ignorar duplicatas e validar passividade; atualizar o script de casamento de fase.
- Consolidar a teoria de holografia e metassuperfícies na revisão bibliográfica, associando cada conceito à sua aplicação no projeto.

Média prioridade

- Integrar a camada semiótica no algoritmo GS (saliency, bordas e regra dos terços) conforme planejado para melhorar a qualidade visual dos hologramas.
- Estudar ferramentas de automação no CST (VBA/Python) para simplificar exportações futuras sem a interface gráfica.
- Avaliar a uniformidade da biblioteca de meta-átomos: verificar cobertura de fase e amplitude, propondo novos tamanhos se houver lacunas.

Baixa prioridade

- Iniciar a implementação de multiplexação por polarização para exibir diferentes imagens a depender da polarização da luz incidente.
- Desenvolver códigos de pós-processamento para gerar arquivos GDSII a partir dos índices escolhidos, visando a fabricação da metassuperfície.
- Rever frameworks de otimização global (p.ex. algoritmos genéticos) para acelerar o design de meta-átomos.

4 Conclusão

Nesta semana, avançamos na construção de uma biblioteca inicial de meta-átomos, implementamos o algoritmo Gerchberg–Saxton no MATLAB com métricas de convergência e preparamos o ambiente para varrer combinações de parâmetros no CST. Apresentamos também o *heatmap* de seleção de meta-átomos por pixel, evidenciando o casamento entre o mapa de fase desejado e as respostas disponíveis na biblioteca. Para a próxima semana, nossa meta principal é completar as simulações restantes e enriquecer a biblioteca, além de evoluir na revisão teórica e integração da semiótica para melhorar a qualidade das reconstruções holográficas.