

# Protocolos de Laboratório LFEA II

1º Semestre (P1) 2023/2024

## Óptica Coerente

### 1. Transformada de Fourier Óptica

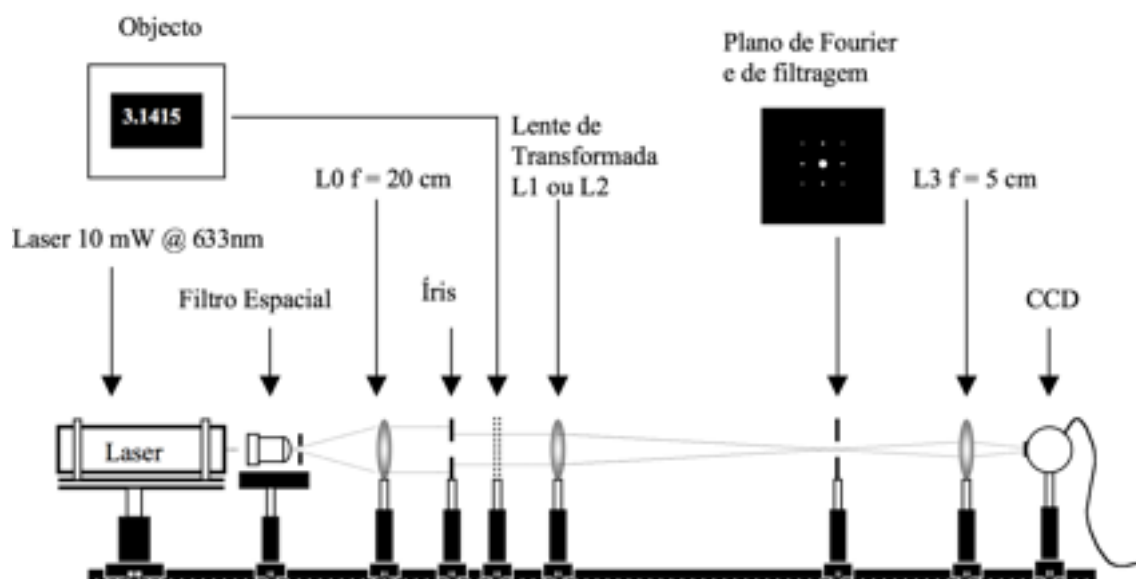
#### Resumo

Nesta experiência, utilizam-se alguns componentes ópticos simples de forma a demonstrar os fundamentos e algumas aplicações da transformada de Fourier óptica. Iluminando um *slide* de teste com uma frente extensa é possível obter a transformada de Fourier espacial (2D) do campo transmitido pelo slide no plano focal duma lente colocada a seguir ao slide. Recorrendo a uma segunda lente o sistema permite a aquisição do espectro de Fourier referido. Alterando a posição desta segunda lente podemos reconstruir a imagem original e efectuar sobre ela diversos tipos de filtragem, colocando anteparos no plano de Fourier de forma a bloquear determinadas frequências espaciais.

A grande vantagem deste sistema, quando comparado com os computadores digitais sequenciais, reside no facto de ser capaz de efectuar operações complexas (transformada de Fourier bidimensional, filtragem e até convoluções e correlações) à velocidade da luz (mais rápido não há...).

#### Descrição da experiência

#### Esquema da montagem



## Procedimento experimental

**Preparação:** Indique a relação das coordenadas no espaço de Fourier no plano de foco da lente com as frequências espaciais; Identifique as funções e seus parâmetros que descrevem o padrão de Fourier para os tipos de objectos que estão presentes na experiência: aberturas circulares e redes.

### 1ª parte - Espectro de Fourier

#### Alinhamento

1. Identifique vários componentes e suas características (aberturas, distâncias focais, etc...). Retire da montagem todos os componentes à excepção do laser, removendo-os pelas bases de carril e mantendo-os nos respectivos suportes.
2. Com o auxílio da Íris montada na calha, alinhe o laser de forma a garantir que o feixe luminoso se propaga horizontalmente e centrado na calha.

**Docente:** Discuta com o docente presente o número de graus de liberdade necessários ajustar e qual a estratégia de alinhamento a usar para fazer passar o feixe laser em dois pontos distantes na calha definidos pela íris (diafragma).

3. Depois do laser alinhado, para referência, coloque outra íris no fim da calha (extremo oposto ao do laser) alinhada com o feixe laser.
4. Coloque o filtro espacial (lente de microscópio + pinhole) no seu suporte e alinhe-o.

**Docente:** Peça ao docente presente auxílio para alinhar a lente microscópio e mostrar como alinhar o filtro espacial. Discuta também o princípio de funcionamento do filtro espacial.

5. Coloque a lente de colimação L0 ( $f = 200 \text{ mm}$ ) no seu suporte e ajuste a sua posição de forma a colimar o feixe. Utilize para tal a íris e a sua sombra num ponto distante. Coloque depois a íris a seguir à lente de colimação.

**Docente:** Mostre ao docente presente a posição da lente (real e teórica) e como procederam para verificar a colimação do feixe.

6. Fixe o objecto (slide 1, letras A e B sobrepostas) no seu suporte. Coloque o conjunto na sua posição.
7. Coloque a lente de transformada (L2;  $f = 250 \text{ mm}$ ) no seu suporte posicionando-se junto do objecto.
8. Utilizando um alvo branco, observe a imagem formada no plano de Fourier da lente de transformada e noutros planos ao longo da propagação do feixe.

**Docente:** Discuta com o docente o padrão observado e a sua posição relativamente à lente.

9. Coloque no plano de Fourier da lente o filtro bloqueador ("passa-alto") de feixe por forma a bloquear com círculo mais pequeno ( $\varnothing 1 \text{ mm}$ ) o centro intenso do padrão.
10. Coloque a lente de imagem e a câmara CCD (tapada) na montagem e alinhe-as.

#### Aquisição de dados:

11. Utilizando um polarizador colocado no suporte do filtro espacial, antes da objectiva, reduza a intensidade do feixe luminoso a um mínimo e de seguida destape a CCD.
12. Ajuste as suas posições de forma a obter na CCD a imagem do plano de Fourier, utilizando uma ampliação e uma iluminação adequada (de modo a ver o padrão de Fourier no sensor CCD).

**NOTA:** Na formação de imagem por uma lente as relações entre as distâncias objecto-lente e lente-imagem obedecem às equações habituais:  $1/d_o + 1/d_i = 1/f$  e a ampliação obtida é  $A = -d_i/d_o$ .

13. Caso não consiga obter imagem alguma, ou esteja demasiado saturada, rode o polarizador de forma a aumentar ligeiramente a intensidade luminosa ou ajuste o Shutter da CCD no programa da PointGrey.

**NOTA:** Deve-se manter a intensidade luminosa do feixe no mínimo possível (dentro da sensibilidade da câmara CCD) regulando-se a iluminação através do *software* PointGrey de aquisição de imagem. Se pretender ter uma relação das intensidades dos pontos deverá garantir que não haja saturação e/ou entrar com a exposição para seu controlo.

**Docente:** Mostre ao docente a imagem adquirida do padrão de Fourier e diga a ampliação efetuada. Discuta também como alterar essa ampliação ou obter a imagem de planos anteriores e posteriores ao plano de Fourier.

14. Varie as posições da lente de imagem e da câmara CCD por forma a obter na CCD a imagem dum plano anterior e posterior (correspondente a uma região de interesse) ao plano de Fourier, utilizando uma ampliação e uma iluminação adequada. Registe as imagens observadas.
15. Volte a ajustar as posições da lente de imagem e da câmara CCD por forma a obter na CCD a imagem do plano de Fourier. Anote as posições da câmara CCD e da lente de imagem em relação à lente de transformada. Registe a imagem observada.
16. Faça calibração da imagem do plano de foco com auxílio de uma craveira ou a imagem do círculo bloqueador mais pequeno ( $\varnothing 1\text{mm}$ ).

**NOTA:** De forma a obter uma melhor calibração da imagem, pode retirar a lente de transformada (ou usar uma iluminação auxiliar) e colocar um paquímetro no plano de Fourier, obtendo assim a respetiva imagem na CCD (nota: as dimensões da CCD são  $(1928 \times 1448) \text{ } 3.69\mu\text{m/px}$ ). Para rapidamente obter distâncias ou perfis das imagens registadas recomendamos que use o *software* de análise de imagens *ImageJ* (*software* gratuito disponível em <https://imagej.nih.gov/ij/download.html>). O formato de imagem a registar deverá ser *lossless* (exemplo: \*.tiff)

**Docente:** Discuta com o docente o melhor método para a calibração e para obter com maior exactidão a imagem do plano de Fourier.

17. Substitua o objecto (slide AB) por outro objecto (rede de Ronchi, redes TEMs...) e repita o ponto 15 (e 16 se necessário) adquirindo imagem não saturadas para melhor precisão e análise de intensidade relativas [sugere-se usar a regulação do *shutter* no *software* de aquisição da CDD].
18. Substitua a lente de transformada pela lente L1 ( $f = 500 \text{ mm}$ ) e repita todos os pontos da aquisição de dados anteriores para a imagem do plano de Fourier.

## 2ª parte - Filtragem

### Alinhamento:

19. Tape a CCD e substitua o objecto (1951 USAF test pattern) mantendo a lente de transformada pela lente L1 ( $f = 500\text{cm}$ ).
20. Alinhe as suas posições de forma a obter na CCD a imagem do objecto, utilizando uma ampliação e uma iluminação adequada.
21. Obtenha a melhor imagem tentando focar o grupo de riscas de maior resolução possível.

**Aquisição de dados:**

- 22. Anote as posições da câmara CCD e da lente de imagem. Registe a imagem observada.
- 23. Coloque no plano de Fourier um filtro passa-alto ( $\sigma = 1, 2$  ou  $3\text{mm}$ ) e alinhe-o. Ajuste a iluminação e registe a imagem observada.
- 24. Repita 21 para os restantes filtros passa-altos.
- 25. Coloque no plano de Fourier um filtro passa-baixo (íris de dupla folha) e alinhe-o. Experimente para diversas aberturas da íris. Ajuste a iluminação e registe a imagem observada para duas situações diferentes. [nota: para cada abertura deverá medir o seu diâmetro]
- 26. Coloque no plano de Fourier o filtro *schlieren* na horizontal (lâmina de X-Acto) e alinhe-o. Ajuste a iluminação e registe as imagens observadas para diferentes posições.
- 27. Repita o ponto 24 para o filtro na vertical.
- 28. Poderá repetir dos pontos a 17-25 com outra lente

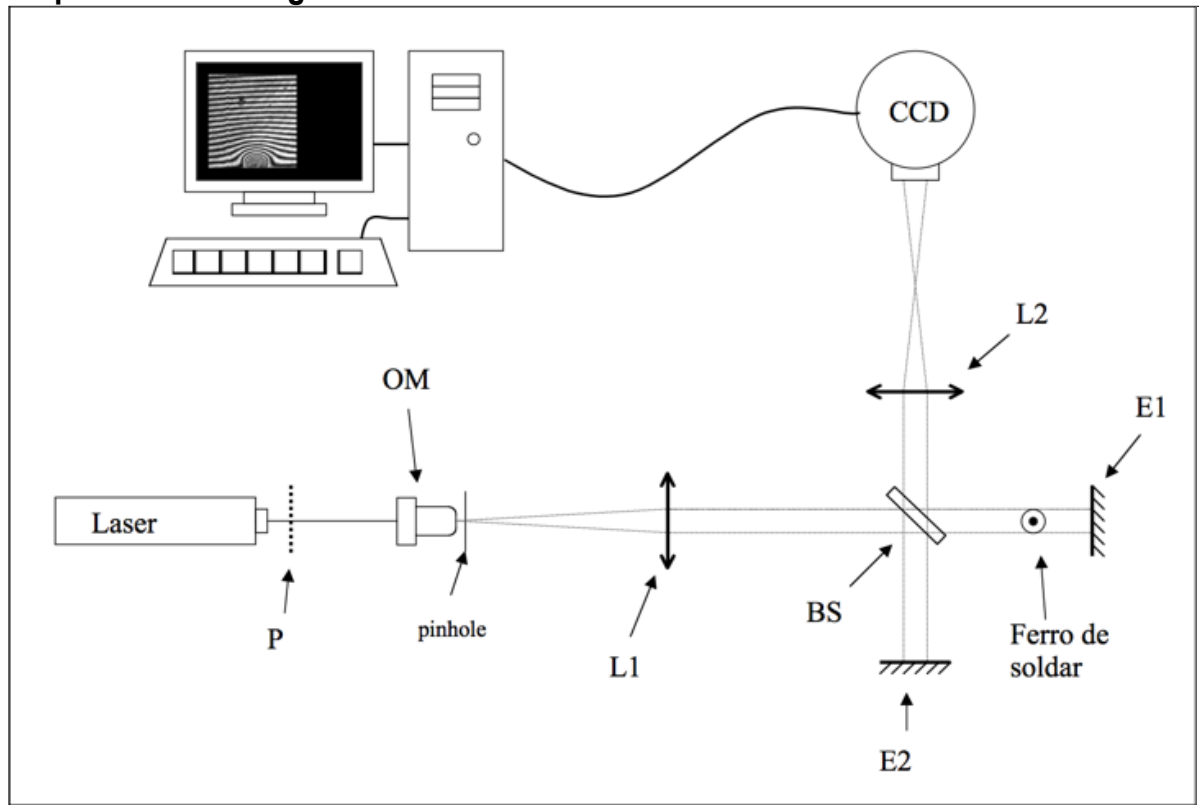
**2. Interferometria****Interferómetro Laser - Determinação do campo de temperatura na vizinhança de uma ponta aquecida****Resumo**

Nesta experiência, utiliza-se um interferómetro de Michelson melhorado, o qual permite a separação e recombinação de uma frente de onda extensa, proveniente de um laser de He-Ne munido de um sistema expensor-colimador. Consegue-se assim a resolução espacial necessária à determinação de campos de densidade num meio transparente sendo depois possível reconstruir as temperaturas do meio sem que seja necessário recorrer a uma sonda material.

O campo de temperatura na vizinhança da ponta de um ferro de soldar de potência variável pode ser determinado interpondo a ponta do ferro num dos braços do interferómetro; utiliza-se uma lente convergente para formar a imagem da ponta do ferro e respectivo padrão de interferência directamente no elemento sensível de uma câmara CCD adaptada (objectiva removida). Esta encontra-se ligada a um computador, o que permite a aquisição dos interferogramas a tempo real. A análise destes últimos por um método tomográfico simplificado (inversão de Abel) permite reconstruir o campo radial de temperaturas em torno da ponta do ferro.

## Descrição da experiência

### Esquema da montagem



## Procedimento experimental

**Preparação:** Qual a relação entre o espaçamento de riscas e ângulo entre feixes? Como se relaciona a função de contraste de uma fonte e comprimento de coerência com o seu conteúdo espectral (ex: duas frequências discretas)? Calcule o factor de ampliação necessário para obter na CCD (Nota: As dimensões da CCD são de 1928x1448 1px=3,69 $\mu$ m) uma imagem de 7 mm em torno do ferro e quais as distâncias objecto-lente e lente-imagem para a lente convergente a ser usada. Como devo de medir o desvio de fase a partir de um interferograma?| Estime as razões entre os integrais de Abel de cada perfil de distribuição de densidade do ar com o perfil quadrado no plano do eixo de simetria.

### Alinhamento do Interferómetro

1. Identifique vários componentes e suas características (aberturas, distâncias focais, etc...).
2. Retire da montagem os elementos que formam o conjunto expensor-colimador (nomeadamente a objectiva de microscópio OM e a lente L1), o polarizador P e a lente de imagem L2
3. Verifique o alinhamento do 1º braço do interferómetro (espelho E1) com a ajuda de uma íris previamente montada e de altura fixa. O feixe deverá passar na íris à saída do laser e quando refletida pelo espelho E1 de volta para a íris junto do laser. Verifique também o alinhamento do “beam-splitter” observando as suas reflexões na íris o mais colinear possível com o feixe laser e que a sua reflexão parcial faça um ângulo de 90° com o feixe laser e incida no centro do espelho E2 (aqui pode colocar um outro espelho a 45° por forma a enviar o feixe segundo uma calha de 500mm, paralela ao outro braço, onde estará E2 permitindo assim variar consideravelmente a diferença de percursos entre os dois braços).

**Docente:** Mostre ao docente o alinhamento e discuta o passo seguinte do alinhamento para o 2º braço do interferómetro (espelho E2' + E2 móvel).

4. Alinhe outro braço do interferómetro com espelho E2' para fazer incidir o feixe no espelho móvel (E2) e a sua reflexão seja coincidente com a reflexão do espelho E1 no "beam-splitter" e na íris à saída do laser.
5. Verifique o alinhamento dos dois feixes emergentes do interferómetro a uma distância razoável do "beam-splitter" de forma a coincidirem (deverá observar uma ligeira cintilação no feixe devido à interferência coerente).

**Docente:** Mostre ao docente o alinhamento e em conjunto posicione objectiva de microscópio numa posição próxima do laser.

6. Coloque a objectiva de microscópio numa posição próxima do laser. O feixe de luz expandindo deve estar aproximadamente centrado com os elementos do interferómetro (uma boa referência é a sombra do espelho E1 e a reflexão na saída do laser). Alinhe o pinhole com a objectiva de forma a obter um feixe o mais uniforme.
7. Coloque a lente L1 após a objectiva de forma a colimar o feixe laser. A colimação do feixe é um factor importante nesta experiência pelo que se deve ter especial cuidado com este passo. Para verificar a colimação do feixe pode-se utilizar, por exemplo, uma abertura de íris predefinida e confirmar o tamanho do feixe a uma distância razoavelmente grande (mais uma vez pode usar um espelho auxiliar).
8. Neste ponto deverá observar um padrão de interferência extenso à saída do interferómetro.

**Docente:** Mostre ao docente o alinhamento e o padrão de interferência obtido antes e depois do feixe colimado com a lente L1.

9. Coloque a câmara CCD e também o polarizador P na posição indicada no esquema; rode o polarizador de forma a reduzir a intensidade luminosa do padrão de interferência a um mínimo visível. Lembre-se que uma intensidade luminosa excessiva pode danificar a câmara CCD (Nota: Para não introduzir luz de fundo convém baixar a iluminação da sala).
10. Experimente ligeiras alterações no alinhamento do espelho móvel (E2) no carril graduada e verifique a sua influência no referido padrão. (poderá determinar o ângulo entre os dois feixes e comprová-lo através de uma medida independente, sugerimos basearem-se no registo da distância dos feixes numa CCD com a íris muito fechada).

**Docente:** Discuta com docente a relação do ângulo de desalinhamento em (E2) e o padrão de interferência.

11. Varie a posição do espelho móvel E2 ao longo do carril de 50cm. Registe o padrão de interferência na CCD para várias distâncias do espelho E2.

**Docente:** Discuta com docente a variação observada no padrão de interferência e a sua relação com coerência do laser e seu conteúdo espectral.

### Posicionamento do objecto e formação de imagem

12. Posicione o ferro de soldar na posição indicada no esquema de forma que a sua ponta fique aproximadamente a meio do feixe laser.
13. Coloque a lente L2 e a câmara CCD nas posições indicadas no esquema. Ajuste as posições da câmara e do ferro de soldar de forma a focar a imagem do ferro na câmara e obter uma ampliação que lhe pareça adequada. (Nota: pode ser útil cobrir o espelho E2 de forma a eliminar temporariamente a sua reflexão)
14. Coloque o polarizador P na posição indicada no esquema; rode o polarizador de forma a reduzir a intensidade luminosa do padrão de interferência a um mínimo visível. Lembre-se que uma intensidade luminosa excessiva pode danificar a câmara CCD (Nota: Para não introduzir luz de fundo convém baixar a iluminação da sala).

15. Observe atentamente a imagem obtida; no caso de existirem assimetrias na frente de onda a sombra do ferro estará focada apenas num dos lados da imagem. Para corrigir esta assimetria desloque ligeiramente a lente L2 transversalmente à propagação do laser.

**Docente:** Mostre ao docente a imagem do padrão de interferência com ferro obtida e sua ampliação, discuta também as aquisições a efetuar.

### **Aquisição de dados**

16. Coloque junto à ponta do ferro de soldar um paquímetro com uma distância calibrada. Grave a imagem obtida (Nota: Para melhor definição da imagem deve-se bloquear o feixe que vai para o espelho E2).
17. Ajuste o espelho E2 de forma a obter um padrão de interferência perpendicular ao ferro de soldar. Utilize o espaçamento de riscas e o sentido de deflexão que achar conveniente. Grave o padrão obtido.
18. Ligar o ferro de soldar e grave o padrão de interferência obtido para duas potências (mínima e máxima) do ferro de soldar (Nota: quando mudar a potência do ferro deve esperar alguns minutos para que a sua temperatura estabilize).
19. Ajuste novamente o espelho E2 de forma a obter um padrão de interferência de riscas mais finas ou mais grossas (a escolha é vossa). Grave o padrão de interferência obtido para a potência mais elevada usada no ponto anterior do ferro de soldar. (Nota: Deve voltar a gravar o padrão com o ferro desligado).
20. Ajuste o espelho E2 de forma obter uma "largura infinita" de riscas i.e. de forma a anular as riscas observadas (Nota: retire o ferro de soldar enquanto fizer este alinhamento). Grave o padrão de interferência obtido para as mesmas duas potências do ferro de soldar utilizadas em (18).

**Docente:** Discuta com docente a influência da largura das riscas dada pelo ângulo do espelho E2 na deflexão destas na zona de ar quente junto ao ferro.