Ciências ULisboa

# ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS E ÓPTICA

***Engenharia Física, Engenharia Biomédica e Biofísica (2º ano)***

**OBJECTIVOS DE APRENDIZAGEM / ORIENTAÇÕES PARA ESTUDO**

18-2-2020

## A. Óptica Geométrica

1. A Óptica Geométrica baseia-se no conceito de **raios luminosos**, cuja trajectória é determinada pelo **princípio de Fermat**, sendo rectilínea em meios uniformes. Procura determinar as condições em que a imagem é geometricamente semelhante ao objecto (ambos em planos paralelos e perpendiculares ao eixo óptico, em sistemas com simetria cilíndrica).
2. Apoia-se na equação (não-linear) dos **planos conjugados**, no conceito de **ampliação** transversa e de ampliação longitudinal, razoavelmente verificadas desde que se assuma a **aproximação paraxial**. Apoia-se ainda na distinção entre imagens / objectos **reais / virtuais**, coerente com a convenção de **sinais** habitual.
3. Da forma geral da equação dos planos conjugados e da ampliação transversa, decorrem formas aproximadas – e de validade muito restrita – para sistemas **delgados**, ou para sistemas que operem entre espaços com o mesmo índice de refracção. As formas gerais e específicas das diversas equações devem ser bem conhecidas e aplicadas com propriedade.
4. Os desvios às previsões da equação dos planos conjugados ou a um valor fixo da ampliação transversa entre planos conjugados, são globalmente considerados como "**aberrações**". As aberrações (monocromáticas ou não-monocromáticas) distinguem-se entre si consoante a sua natureza e/ou existência de feixes com vértice bem definido.
5. Os **pontos cardinais** – cuja localização deve ser conhecida, sobretudo em sistemas espessos (que não se possam considerar delgados) - viabilizam a aplicação, única, da equação dos planos conjugados a um sistema constituído por um número arbitrário de componentes ópticos. Em alternativa, a imagem constituída no $n^{\text{ésimo}}$ sistema, deve ser considerada como objecto para o sistema de ordem n+1. Em qualquer iteração, ambos, o objecto e a imagem, podem ser reais ou virtuais.
6. Conceitos adicionais relevantes: sistemas de potência nula (**afocais**); **diafragmas** de abertura e de campo, **pupilas** (entrada e de saída); **vinhetagem**; **profundidade de campo**; **f/#.**
7. Arquitectura e conceitos de sistemas ópticos fundamentais: **olho** humano (incluindo **ametropias** e sua **compensação**); **lupa**; **telescópios**; **microscópio** (incluindo a variante confocal).

## B. Ondas [em Óptica Ondulatória]

1. Linearidade da **equação de ondas** e sua importância na geração de soluções complexas com base em combinações lineares de soluções simples.
2. A aproximação da óptica ondulatória deve ser bem entendida: se todas as componentes dos campos **E** e **B** satisfazem a mesma equação de ondas, então uma solução genérica da equação de ondas, u(**r**,t) terá um potencial explicativo relevante.
3. A **irradiância** (observável), em W/m$^2$, é dada por $2\langle|u(\mathbf{r},t)|^2\rangle$, de modo a garantir coerência com os modelos decorrentes do vector de Poynting, em óptica electromagnética.
4. De entre as soluções **escalares**, u(**r**,t) da equação de ondas, serão particularmente úteis as que, num dado ponto, **r**, forem **periódicas** no tempo. Daqui decorre a equação de **Helmholtz** e a **Amplitude Complexa**, U(**r**). Daqui decorre também a noção de onda **monocromática** e – dada a linearidade da equação de ondas – o modelo usual para ondas **policromáticas**.
5. As soluções monocromáticas mais simples da equação de Helmholtz são as ondas **planas** e as ondas **esféricas** – e suas aproximações, as **paraboloidais**. Admitindo que a amplitude das ondas monocromáticas possa variar lentamente com z, obtém-se as ondas **paraxiais**. Admitindo que a amplitude das ondas monocromáticas possam variar em (x,y) – mas não em z - obtém-se as ondas de **Bessel**.
6. As ondas **gaussianas** são casos especialmente relevantes de ondas paraxiais. Não só têm uma irradiância transversa gaussiana como admitem soluções de "ordem" elevada, associadas a polinómios de Hermite e de Legendre, que impõem os seus zeros às gaussianas.
7. Os parâmetros que caracterizam as ondas planas, esféricas, paraxiais, gaussianas, bem como o cálculo da Amplitude Complexa (em módulo e em fase) em qualquer plano à distância z do plano da fonte, devem ser bem conhecidos, bem como a distinção entre as soluções exactas da equação de Helmholtz e as soluções da equação de **Helmholtz paraxial**.

## C. Propagação (e difracção) de ondas [em Óptica Ondulatória]

1. O Princípio de **Huygens-Fresnel** é o princípio básico da **propagação** / **difracção** de ondas. Para além da imagem mental que proporciona – baseada na interferência entre ondas esféricas geradas a partir de fontes virtuais - é relevante relacioná-lo com o princípio de **Huygens** da Óptica Geométrica: as superfícies de igual fase são, essencialmente, as superfícies de onda geométricas.
2. É possível estabelecer dois regimes de aproximação do integral de Huygens-Fresnel, consoante a distância, isto é, os ângulos decorrentes de distâncias longitudinais e a dimensão transversa das regiões de interesse, tanto no plano z=0, como no plano de observação.
3. Com as aproximações de **Fresnel** (aproximações parabólicas às ondas esféricas) e de Fraunhofer (aproximações planas às ondas esféricas) pode-se determinar o campo escalar, $U_{out}$, num plano com base no conhecimento do campo escalar $U_{in}$ noutro plano paralelo ao primeiro. A difracção, em Óptica Ondulatória, formaliza-se entre planos paralelos.

4. Na aproximação de **Fraunhofer**, a relação entre $U_{out}$ e $U_{in}$, é simples: $U_{out}$ é basicamente a transformada de Fourier de $U_{in}$ - abstraindo de factores de fase sem relevância no cálculo da irradiância – calculada para valores especiais das frequências espaciais.
5. Assim, desde que seja conhecida a **Função de Transmissão em Amplitude** no plano z=0, $t(\xi,\eta)$, é possível calcular a Amplitude Complexa (e a irradiância) difractada em qualquer ponto (x,y,z) a uma distância z que satisfaça a condição de Fraunhofer.
6. A representação da Amplitude Complexa no plano z=0 através da modelação completa da Função de Transmissão em Amplitude no plano z=0 é crítica. Alguns modelos simples para aberturas retangulares, circulares – tanto de fase como de amplitude – únicas ou regularmente distribuídas (redes de difracção), constituem objectivos relevantes da disciplina, designadamente o modelo de uma lente dotada da respectiva fronteira.
7. A aproximação de Fraunhofer impõe uma distância considerável. A interposição de uma **lente**, de distância focal *f*, e a observação no seu plano focal, são equivalentes, matematicamente, à aproximação de Fraunhofer: a mesma equação, desde que $z \rightarrow f$.
8. Como consequência, nos sistemas que formam imagens de objectos no infinito – com imagens no plano focal da lente – como os telescópios ou o olho humano, a imagem é descrita pelo **padrão de difracção de Fraunhofer da pupila de saída da lente**.
9. Daqui decorre a teoria do **limite de resolução** (de **Rayleigh**), que remete para a estrutura de difracção de uma abertura circular, isto é, para a função *sombrero* (ou chapéu mexicano, dada pela razão entre a função de Bessel, $J_1(x)/x$).

## D. Interferências [em Óptica Ondulatória]

1. Da **linearidade** da equação de Helmholtz decorre que a soma de Amplitudes Complexas é solução da equação de Helmholtz.
2. O cálculo da distribuição espacial da irradiância, $E(x,y)$, em planos perpendiculares ao eixo dos ZZ, é relevante para quaisquer pares de tipos de ondas (planas, esféricas, gaussianas), em que a **diferença de fase** entre as ondas varie espacialmente.
3. A análise das situações de interferência reduz-se essencialmente aos casos de interferência entre ondas planas e/ou esféricas, contando a posição relativa das respectivas fontes em relação ao plano de observação. Uma das ondas é considerada como referência, a outra contem, através de pequenas variações espaciais ou temporais da fase, a informação desejada.
4. Existem vários tipos de interferómetros: de **divisão de amplitude** ou de **divisão de frente de onda**; de dois feixes ou de feixes múltiplos, com ou sem percas. A sua arquitectura, variáveis de que depende a diferença de fase e perfil das franjas, distinguem-nos. Nomes a conhecer: **Young, Fizeau, Michelson (e variantes), Mach-Zehnder, Fabry-Perot**.
5. Uma cavidade ressonante constitui uma situação em que o número de ondas que se sobrepõem (interferem) é muito elevado, em função das refletividades dos espelhos que a constituem. As características da Amplitude Complexa que daí resulta são da maior relevância para o funcionamento dos lasers: constituição de ondas estacionárias e frequências de ressonância.

## E. Óptica Electromagnética (alguns aspectos poderão ser abordados, em função do tempo e dos interesses dos alunos)

1. A chave para a integração das propriedades do meio é a relação **P** = **P**(**E**), desde que a **susceptibilidade dieléctrica** ($\chi$) possa ser representada por um número complexo, e no caso de materiais anisótropos, por tensores de 2ª ordem. Desta relação decorre ainda a **distinção** entre a Óptica linear e a Óptica Não-Linear, esta última na base de uma fenomenologia muito rica.
2. Os modelos de propagação de ondas estudados em Óptica Ondulatória mantém-se válidos, mas é fundamental integrar as propriedades dos meios em que as ondas se propagam, de acordo com a existência ou não de electrões livres (modelo de **Lorentz** para os dieléctricos, ou de **Drude** para metais), e entender a variação espectral de diversas grandezas. As constantes materiais são, assim, representadas por números complexos, de modo a poder ser modelada tanto a ***dispersão*** (variação da velocidade de propagação da onda com a frequência), como a ***absorção*** (igualmente dependente da frequência).
3. Os meios lineares e isótropos são particularmente importantes, neles se verificando relações específicas entre constantes materiais, bem como a **transversalidade** das ondas planas monocromáticas e a **relação entre as amplitudes** dos campos eléctrico e magnético, através da impedância do meio.
4. Devem ser conhecidas muito genericamente as características genéricas dos materiais não-lineares de 2ª e 3ª ordem e alguns fenómenos associados.
5. Nas superfícies de descontinuidade entre dois meios, as equações de Maxwell impõem a **continuidade** das componentes *tangenciais* de **E** e de **H**, e das componentes *normais* de **D** e de **B**. Daqui resultam, respectivamente, as equações da reflexão e da refracção, bem como as 4 **equações de Fresnel** para as polarizações paralela e perpendicular ao plano de incidência.
6. Devem ser compreendidos os modelos para polarização linear, circular, elíptica e ausência de polarização, bem como os principais mecanismos físicos para gerar ou alterar o estado de polarização de uma onda.

## F. Lasers (este tópico – designadamente o nº 2 - será utilizado a título de exemplos em interferometria e no tratamento das ondas gaussianas. Os outros tópicos poderão serão brevemente referidos, sendo fundamentais para a compreensão do funcionamento dos lasers).

1. Aspectos quânticos: emissão estimulada, risca de absorção, inversão de populações, ganho *(não coberto)*.
2. Aspectos electromagnéticos: cavidade ressonante, modos estacionários, frequências de ressonância, modos gaussianos, seleção de modos, monocromaticidade, polarização.
3. Geração de impulsos ou de ondas contínuas.
4. Aplicações.

## G. Formulário

Em todos os domínios anteriores, devem ser compreendidas as fórmulas que constam do Formulário, bem como as grandezas representadas e contextos de utilização.