

Holografia: Princípios e Aplicações

O. D. D. SOARES

Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Introdução

Uma variedade extensa de fenómenos da natureza pode ser descrita pelo modelo físico de onda. Da multiplicidade dos fenómenos resulta a diversidade de ondas a considerar. É possível, contudo, representar o comportamento de uma gama apreciável de fenómenos ondulatórios, servindo-se do conceito de onda sinusoidal e da sobreposição de várias ondas sinusoidais, para sintetizar ondas mais complexas.

A propagação do campo electromagnético pode, a exemplo, ser descrita por ondas sinusoidais e pela sobreposição de ondas para a maioria dos fenómenos em que geralmente estamos interessados, em particular no estudo da formação de imagens de objectos, e consequentemente no estudo das propriedades dos objectos por imagens convenientes.

O estudo do objecto pela sua imagem pressupõe que seremos capazes de conhecer as características das ondas que originam a imagem, uma vez que pressupomos que cada ponto do objecto iluminado emite ondas.

Uma onda sinusoidal ficará definida, uma vez conhecida a sua direcção e sentido de propagação, se conhecermos três parâmetros: a amplitude, a fase e o comprimento de onda.

No processo fotográfico registamos apenas a distribuição de iluminação, em princípio proporcional ao quadrado da amplitude. Em interferometria observamos a distribuição das franjas de interferência determinada pela diferença de fase das frentes de ondas interferentes. Na espectroscopia clássica mede-se o comprimento de onda.

Existem casos em que se procura registar simultaneamente dois dos parâmetros. Um exemplo é a fotografia em cor tipo Lippman

(prémio Nobel 1908) e mais recentemente a fotografia convencional a cor. Trata-se, contudo, de casos de registo parcial da informação contida nas ondas. De facto, o registo da distribuição de fase da onda necessita, em termos práticos, de fontes de iluminação coerentes.

O aparecimento do Laser (1960) abriu, assim, amplas e novas possibilidades, por força das características da radiação do feixe Laser — radiação controlada em coerência, direcção, intensidade, fase, polarização e frequência. A holografia sobressai pelo rápido desenvolvimento multidireccional nas suas aplicações, e pela grande actividade em investigação aplicada.

As ideias fundamentais relativas ao registo holográfico da informação, transmitida por uma imagem óptica, foram formuladas em 1947 e publicadas em 1948, por D. Gabor (prémio Nobel da Física em 1971).

Leith e Upatnieks (1962) introduziram a montagem «fora-de-eixo», para remover as dificuldades encontradas na montagem de Gabor (imagens gémeas em linha, exigências de contraste e inversão), criando as condições que tornariam, após a introdução do Laser, a holografia num dos domínios de investigação aplicada mais excitantes, e originando aplicações surpreendentes, em domínio científicos e industriais. A introdução do movimento e a eliminação das restrições de iluminação alargaram mais o campo de implementações da holografia, e cativaram o fascínio de artistas por este meio de comunicação gráfica.

Holografia (do Grego ὅλος — completo, e γραμμα — registo) corresponde efectivamente ao registo codificado da distribuição de amplitude e fase de uma frente de onda, excedendo, em conteúdo informático e princípio, a fotografia convencional.

Princípio Holográfico

A Holografia (Fig. 1) é o registo codificado da frente de onda proveniente do objecto iluminado — onda objecto, através da figura

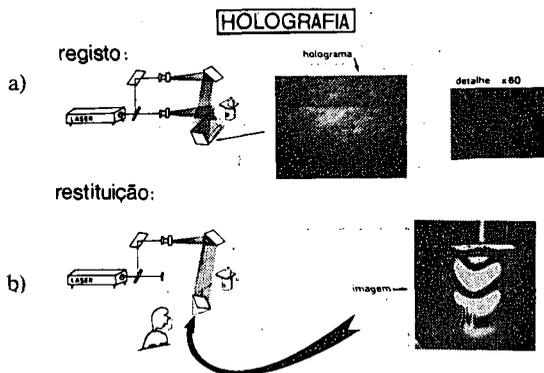


Fig. 1 — Princípio da Holografia.

a) registo; b) restituição.

de interferência com outra frente de onda, mutuamente coerente — onda de referência. Esta figura de interferência, para um objecto corrente, é composta por uma complexidade de pequenos detalhes (emaranhado de linhas, com densidades superiores a 2000 linhas/mm, quando vista ao microscópio), que se apresenta como uma mancha sombreada na observação visual do holograma. A descodificação é feita por iluminação do holograma com a frente de onda de referência, que restitui uma imagem real e outra virtual idêntica à frente de onda objecto, como que propagando-se a partir do objecto. A designação *onda objecto* e de *referência* é arbitrária, podendo comutar em alguns casos de aplicação da técnica holográfica. Na prática, um feixe coerente de radiação é dividido em dois feixes. Um dos feixes ilumina o objecto que difunde a radiação, em particular na direcção do registador holográfico. O outro feixe ilumina directamente o registador holográfico — feixe de referência. Resulta assim uma figura de interferência, que após revelação da placa holográfica constitui o holograma. Iluminando com o feixe de referência o holograma, por difracção, formam-se diversas frentes de onda. Uma das

frentes restitui a frente de onda objecto — imagem virtual. Outra restitui uma onda convergente — imagem real.

A Holografia assenta em aspectos fundamentais de propagação do campo electromagnético, de modo que não é surpresa poder ser explicada a sua plausibilidade por simples conexão de fenómenos e leis fundamentais conhecidas, sem o concurso, quer das complexidades dum rigoroso tratamento matemático, indispensável na análise quantitativa por técnicas holográficas, quer da linguagem de gráficos abstractos (vantagens apontadas por D. Gabor na sua lição de Nobel).

A simplicidade das bases do princípio holográfico é tal que é possível introduzir o conceito por três descrições equivalentes, e no dizer de H. J. Caulfield, será estranho que a natureza não se tenha servido do princípio da holografia para se organizar; em particular, pensa-se que no funcionamento do cérebro existirão mecanismos explicáveis pela Holografia.

Se considerarmos um objecto iluminado como uma superfície radiante constituída por um conjunto de fontes pontuais, podemos primeiro analisar o que acontece para uma só fonte pontual e generalizar depois para a superfície.

Uma fonte pontual radia uma onda esférica, que interferindo com uma onda plana de referência produz uma figura de interferência, composta por uma sucessão de anéis circulares (figura de Airy). Registrando a figura sobre uma placa fotográfica, após revelação, obtém-se um écran (zonado de Fresnel). Iluminando este holograma com a onda plana, já designada como de referência, são difractadas várias frentes de onda. Uma das frentes de onda parece divergir do ponto objecto inicial — imagem virtual do ponto; outra parece convergir para um ponto (foco principal do écran zonado) — imagem real. Sendo válido o princípio da sobreposição, como a superfície do objecto é a sobreposição de pontos, se o registo for não de um único ponto, mas agora do conjunto dos pontos da superfície, obter-se-á, então, sobre a placa holográfica, uma complexa figura de interferência, que corres-

ponde individualmente aos diversos pontos. Na restituição, sob a iluminação do feixe de referência, cada ponto do objecto será restituído individualmente, reconstruindo-se, por sobreposição, a superfície antes iluminada no objecto, durante o registo do holograma, com reprodução correcta da configuração tridimensional. A imagem real terá uma perspectiva invertida (pseudoscópica ou paralaxe invertida), porque a convergência de pontos mais remotos far-se-á mais próximo do holograma. Por isso a imagem real é menos usada, e quando utilizada requer um arranjo experimental mais elaborado (iluminação com a frente de onda conjugada do feixe de referência).

Uma forma mais elaborada de justificação do princípio é supor que a frente de onda do objecto pode ser, pelo princípio de sobreposição, considerada sintetizada a partir de um conjunto de ondas planas (espectro de Fourier). Cada onda plana interferindo com a onda plana de referência gera uma rede. Esta rede difracta restituindo a onda original interferente, ordem de difracção +1 (imagem virtual), e outra onda correspondente à ordem de difracção -1 (imagem real). Parece então possível restituir todas as ondas planas que constituem a frente de onda que o objecto iluminado radiava. A sobreposição de tais ondas planas restitui a imagem tridimensional do objecto.

Nestas duas descrições pressupõe-se que os efeitos de intermodulação das várias frentes de onda (duas a duas) se conjuga construtivamente, o que é verdade se forem observados certos requisitos no registo holográfico e na restituição (separação das bandas espectrais, filtragem espacial por difracção, preservação da geometria, e coerência). Tal é também plausível, uma vez que o registo holográfico, ou holograma, não é senão o registo da condição fronteira de propagação de um campo electromagnético num plano, e na resultante da sobreposição de duas frentes de onda. Na restituição, esta condição fronteira mantém-se (o holograma), de modo que, sendo única a solução do problema, se impusermos todas as demais condições de registo, deveremos obter as frentes de onda iniciais. Acontece, porém, que nem todas as condições são totalmente

impostas (ambiguidade), e portanto a solução contém mais frentes de onda do que originalmente existiam, durante o registo. Podem, contudo, ser adequadamente separadas de forma a obter-se a restituição da imagem do objecto, isto é, podemos desenvolver tecnologias diversas de registo e restituição. Daí uma grande diversidade de tipos de hologramas e técnicas holográficas.

Numa descrição geométrica da holografia, consideremos a interferência resultante de duas fontes pontuais (Fig. 2). Geram-se no espaço

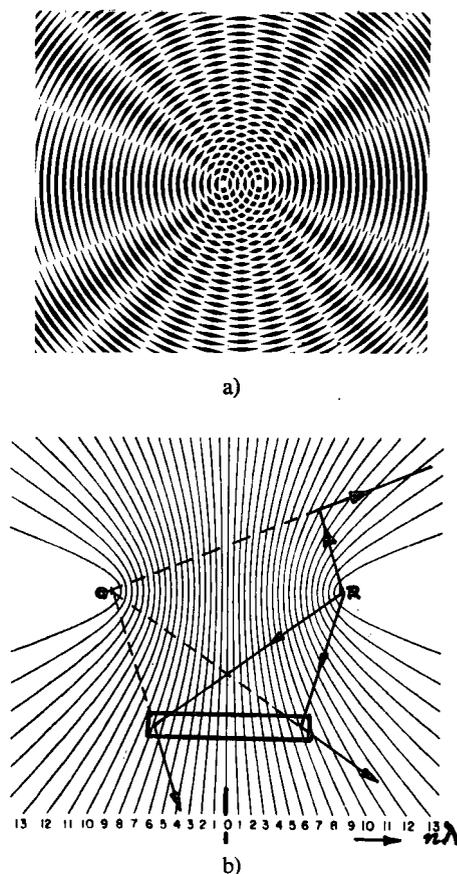


Fig. 2 — Modelo geométrico descritivo do princípio da holografia.

- a) Analogia moiré para a figura de interferência resultante de duas fontes pontuais.
- b) Corte principal nas superfícies de interferência para duas fontes pontuais, e registo na placa holográfica.

superfícies hiperboloides que gozam da propriedade geométrica de a diferença das distâncias às fontes pontuais serem múltiplos do

comprimento de onda da radiação. Mais ainda, se considerarmos as superfícies de interferência como espelhos, verificamos que os raios que partem de uma fonte se reflectem na superfície como se originassem da outra fonte pontual (Fig. 2 b). Como a placa holográfica regista as superfícies de interferência, é aceitável que a restituição holográfica origine uma imagem virtual. A previsão da existência da imagem real necessita da introdução do conceito de difracção, que excede a concepção do modelo geométrico; contudo se imaginarmos (Fig. 2), que a frente de onda de referência é retropropagada (frente de onda conjugada), a radiação reflectida pelas superfícies hiperbólicas do holograma originará uma frente de onda convergente no ponto objecto — imagem real (ortoscópica).

O modelo geométrico permite ainda elucidar outras características físicas do processo holográfico: banda dinâmica, ruído de intermodulação, razão óptica de intensidades dos feixes, interferometria holográfica, geração de contorno, limitações pela coerência e efeitos do granitado Laser. Não explica contudo efeitos difractivos e de ressonância necessários à descrição das propriedades dos hologramas de volume.

Algumas Propriedades dos Hologramas

O registo holográfico goza de propriedades surpreendentes, algumas das quais são interessantes de identificar por comparação com o processo fotográfico.

No processo fotográfico, Fig. 3, temos uma transformação central, volume-superfície, que é o plano do filme. A cada ponto do objecto correspondente, biunivocamente, um ponto no filme fotográfico, não existindo informação de profundidade ou tridimensional. No registo holográfico não existe abertura. Em cada ponto do holograma é recebida radiação de todos os pontos iluminados do objecto. Assim, cada ponto do holograma restitui, por si só, toda a superfície iluminada do objecto (redundância), segundo um ângulo de perspectiva de visão do objecto a partir desse ponto do holograma (paralaxe). Por outro lado, cada ponto do

objecto ilumina toda a placa holográfica, ficando assim registado sobre toda a superfície do holograma (redundância). Em consequência, qualquer porção do holograma restituirá

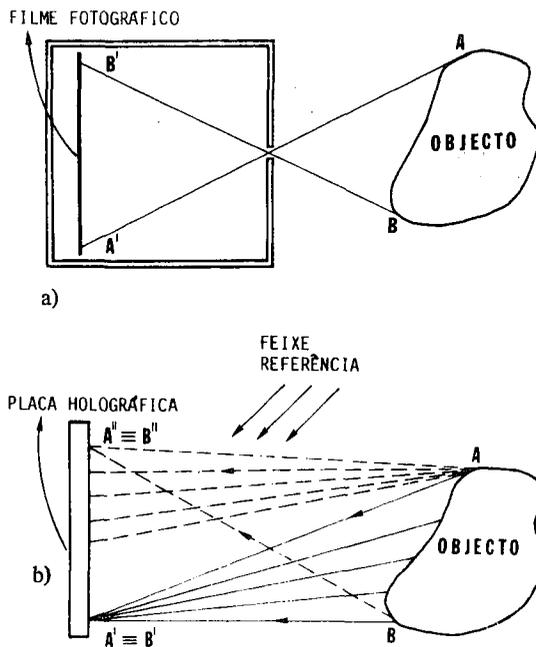


Fig. 3 — Processo fotográfico versus registo holográfico.

- a) Processo fotográfico — projecção central, princípio da câmara escura. O uso da lente permite apenas aumentar, conjuntamente, o ângulo sólido de visada e de recepção da emissão dos pontos luminosos do objecto (caso globo ocular).
- b) Processo holográfico — exposição sem abertura.

toda a frente de onda do objecto, em oposição à fotografia, em que as distintas partes do objecto correspondem às diversas partes de fotografia.

À fracção do holograma corresponderá uma perspectiva de visão integral do objecto, apenas com redução do ângulo de restituição, e bem assim dos detalhes discerníveis, diminuindo a qualidade da imagem holográfica. Uma consequência desta redundância prende-se com os danos causados por defeitos como, riscos, manchas, etc., que na fotografia leva à perda de parte da imagem, enquanto na holografia apenas a intensidade da imagem se reduz.

À paralaxe e à redundância juntam-se outras propriedades. Em holografia não existe

positivo e negativo, pelo facto de que apenas a diferença de fase (diferença de percurso óptico dos feixes interferentes) interessa, quer no registo, quer na restituição.

A capacidade de registo de informação no holograma (idealmente um bit por λ^3) é muito mais elevada que na fotografia. Para dar um exemplo, vários objectos sobre a mesma linha de visão não podem, em fotografia, ser focados simultaneamente, enquanto na holografia (resolvido o problema da coerência) os objectos a distintas profundidades são simultaneamente restituídos a distâncias focais correctas (aplicação na análise da distribuição de partículas, e câmaras de bolhas).

A fotografia não admite sobreposições. No holograma podem-se sobrepor registos independentes de vários objectos, mantendo a restituição individualizada de cada um, quer variando o feixe de referência (300 imagens já foram sobrepostas), quer alterando o comprimento de onda da radiação (efeito Bragg).

Técnicas Holográficas

A variedade de técnicas em holografia é extensa. Na holografia interferométrica de dupla exposição, é feita, intencionalmente, a sobreposição de dois hologramas com a mesma onda de referência. Na restituição, obtém-se duas frentes de onda, que interferem entre si, revelando as franjas de interferência a diferença de fase entre as frentes de onda, em múltiplos do comprimento de onda. Tal permite, por exemplo, analisar a deformação na superfície de um objecto. O modelo geométrico possibilita uma interpretação do princípio. Considere-se, na Fig. 4, que um objecto pontual se encontrava respectivamente em O_1 e O_2 , na primeira e segunda exposição, sendo a distância de O_1 a O_2 , da ordem do comprimento de onda. O holograma duplamente exposto vê a justaposição das famílias de hiperboles, correspondentes à dupla exposição. Observando, do lado direito do holograma, verifica-se a sobreposição das hiperbolóides, e ver-se-á um ponto brilhante, localizado na vizinhança do objecto, por ser, efectivamente, a distribuição das franjas sinusoidal. No lado esquerdo, a visão é

nula, as superfícies hiperbolóides não se sobrepõem, originando apenas uma exposição uniforme, sem modulação espacial. Se o deslocamento, de O_1 para O_2 , variar, as franjas

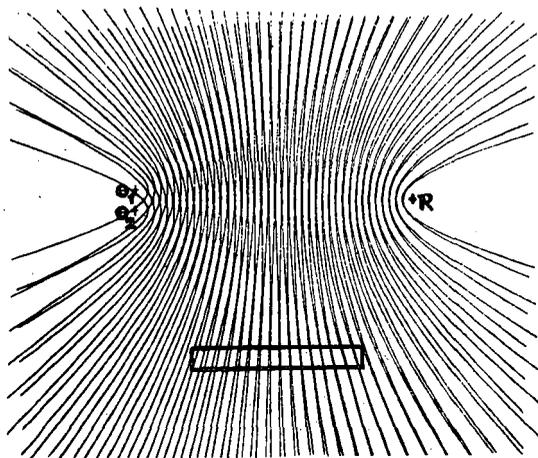


Fig. 4 — Dupla exposição holográfica gerando franjas de interferência, que descrevem o movimento relativo entre exposições. Ao deslocamento de O_1 para O_2 do objecto, corresponde a observação de franjas claras e escuras, na vizinhança da superfície do objecto, que representam lugares geométricos de variação de fase constante, para os pontos do objecto, múltiplos do comprimento de onda.

movem-se progressivamente no campo de visão. Para um objecto contínuo, que sofre um deslocamento linear, observar-se-á um conjunto de franjas rectilíneas sobrepostas à imagem do objecto. Se a deformação é irregular, como é comum nos objectos, ver-se-á uma configuração complexa de franjas, Fig. 5,

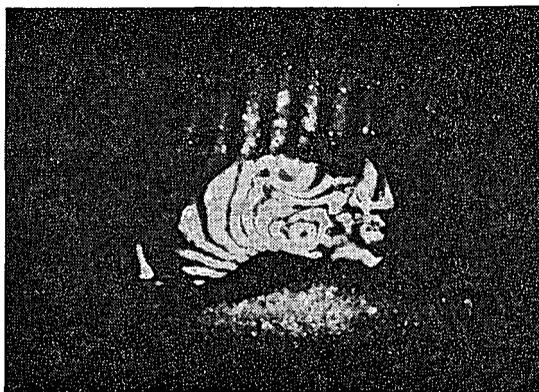


Fig. 5 — Interferograma holográfico do osso talus sujeito a carga.

(famílias de anéis de Newton), que representam lugares geométricos dos pontos em que o feixe objecto sofreu uma variação de fase constante (número inteiro de comprimento de onda).

Outras técnicas correntemente utilizadas incluem: tempo médio, estroboscópica, por impulsos, heterodínica, interferométrica com modulação de onda, moiré, «sandwich», comparativa, acoplada com granitado Laser, acoplada com filtragem óptica, combinada com processamento MEF, etc.

Tipos de Hogramas

Com um princípio tão geral como o da holografia, é previsível a existência de tipos de hogramas muito variados, sendo possível, apenas, breves referências.

O registador holográfico pode assumir uma superfície plana ou curva, por exemplo, cilíndrica, Fig. 6, em que o objecto é restituído em todos os ângulos de perspectiva. Poderemos

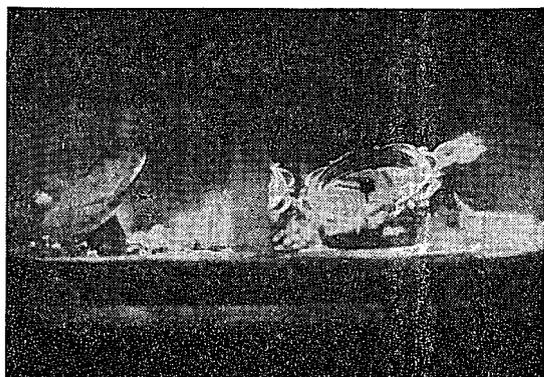


Fig. 6 — Holograma circular com 360° de ângulo de visão (duas perspectivas).

ter um filme delgado, que quando iluminado por fonte policromática, apresenta dispersão, com um espalhamento de imagens parcialmente sobrepostas, do azul ao vermelho, ou então espesso, em que os efeitos de ressonância (princípio da fotografia Lippmann) são utilizados para aumentar a eficiência difractiva, ou separar os comprimentos de onda (efeito Bragg), permitindo uma holografia com restituição por fonte de luz branca, em cor natural (registo dos três parâmetros — amplitude, fase e comprimento de onda).

O registo holográfico pode ser codificado na variação de transmitância da placa holográfica — holograma de amplitude, ou na alteração de fase — holograma de fase. O holograma de fase tem uma absorpção insignificante, sendo elevado o rendimento difractivo, que pode atingir praticamente os 100 % em hogramas de volume. Os hogramas de volume permitem realizar componentes ópticos holográficos adaptados a funções específicas: redes de difracção, lentes, placas correctoras de aberrações, concentradores solares, «scanners», etc.

No holograma de transmissão, a iluminação do holograma é feita pelo lado oposto ao lado da observação. No de reflexão, a iluminação e observação fazem-se do mesmo lado do holograma, Fig. 7.

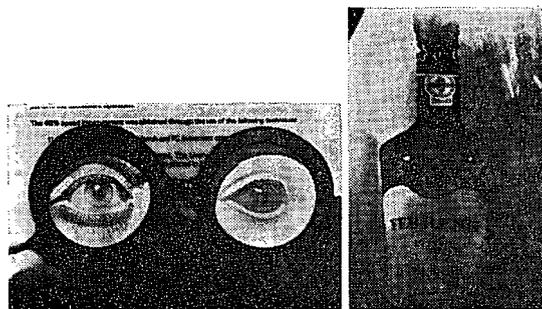
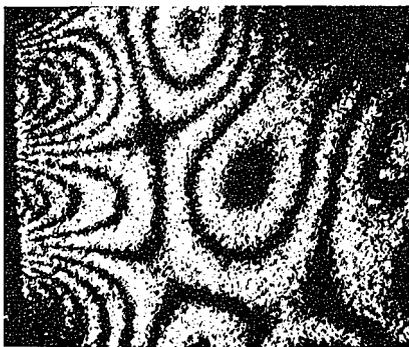
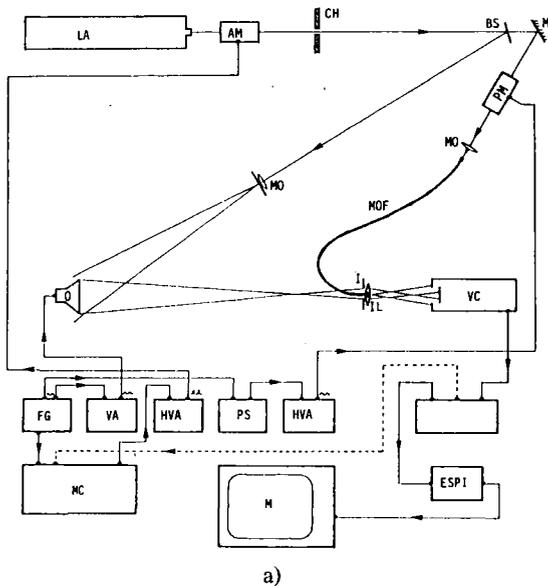


Fig. 7 — Hogramas de reflexão com iluminação por luz branca.

Com a introdução de sistemas ópticos entre objecto e placa holográfica, ou com um arranjo especial da montagem, é possível criar tipos de holograma, como o holograma imagem focalizado, em que a restituição pode ser feita com fonte de luz branca, originando uma imagem

a branco-e-preto, tridimensional, sobre o plano do holograma. Tipo análogo é o holograma arco-íris, que apresenta imagens de cor variável com o ângulo de observação.

No integragrama e em hologramas multiplex, imagens e cenas de um filme são transpostas para hologramas do tipo filiforme, para o tipo multiplex, e dispostos segundo geratrizes de uma superfície cilíndrica. A observação, em arco, do holograma reproduz o objecto integralmente, o movimento, ou a cena animada (cena publicitária, micróbios, animação gerada por computador, sucessão de imagens radiográficas, etc.).



b)

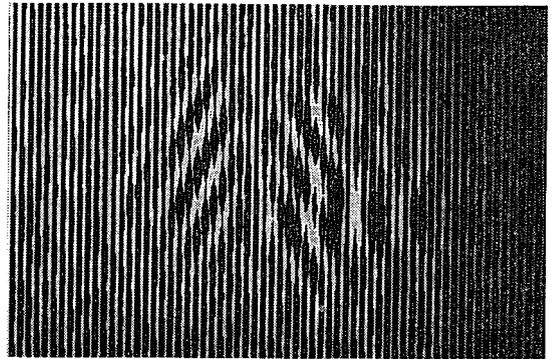
Fig. 8 — Interferometria eletrônica com granulado Laser (holografia eletrônica).

- a) princípio e montagem;
b) modo de vibração de uma membrana metálica.

Existe ainda um tipo de holografia, dita eletrônica, em que a placa holográfica é substituída pelo écran de um tubo de televisão, onde se forma um holograma imagem do granulado Laser, proveniente da superfície do objecto. É um sistema em tempo real, com franjas de correlação, com aspecto granuloso, Fig. 8. A técnica é usada no estudo de deformações, vibrações e outros controlos não-destrutivos.

Generalização do Conceito de Holografia

Deve notar-se que a holografia é essencialmente um conceito, e portanto extensível para outras variáveis e domínios. Haverá assim uma holografia temporal, em que a variável tempo substitui a variável espacial, bem como uma holografia acústica, para ondas mecânicas e sísmicas, por exemplo, e, certamente, uma holografia por computador, Fig. 9, em que é



a)



b)

Fig. 9 — Holografia por computador.
a) holograma; b) restituição.

possível simular situações não-reais, gerar hologramas, inclusive de objectos não-reais, ou transportar informações discretas para um registo com as propriedades holográficas, como na ecografia, ou no TAC.

Aplicações

A holografia, Fig. 10, proporcionou novas soluções em ramos da ciência e tecnologia

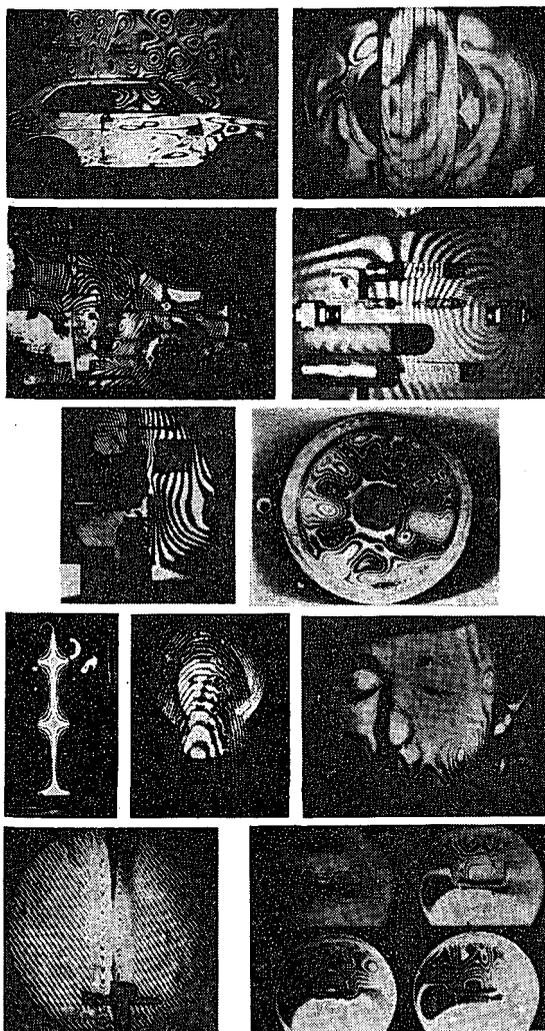


Fig. 10 — Amostragem do universo das aplicações da Holografia.

como: formação e apresentação de imagens, interferometria, testes não-destrutivos, processamento óptico de informação, microscopia, componentes ópticos holográficos, registo e leitura de informação em armazenamento de

dados, memórias de computador, e sistema de entretenimento doméstico.

Microscópio Holográfico

O microscópio holográfico utiliza a tridimensionalidade da imagem holográfica para obviar à limitação da profundidade de foco das objectivas microscópicas de curta distância focal, Fig. 11. Após registo do holograma,

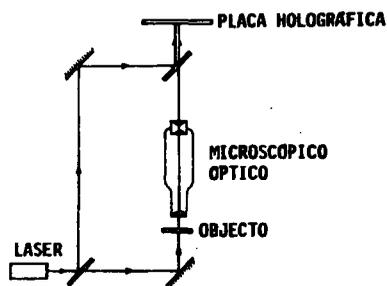


Fig. 11 — Princípio do microscópio holográfico.

cada secção pode ser explorada, movendo o sistema óptico sobre a imagem restituída. Apreciável volume de especimens, por exemplo, são estudados por esta técnica.

Holografia Interferométrica

Aplicação com especial interesse é a holografia interferométrica (diferencial). Na interferometria convencional, observa-se a interferência entre duas frentes de onda com origem numa fonte comum e que percorreram percursos ópticos que as transformaram por formas distintas. A holografia apresenta a vantagem de uma ou duas frentes de onda poderem ser registadas e restituídas, inclusive existindo em tempos diferentes. Se é apenas registada uma frente de onda, na restituição pode ser comparada com outra, permitindo uma interferometria diferida no tempo, e com observação em tempo real. No registo de duas frentes de onda, que correspondem a dois estados diferentes do objecto, na restituição do holograma, franjas de interferência evidenciam as modificações ocorridas entre as duas exposições.

As aplicações são das mais variadas: observação interferométrica das deformações dum

objecto sob carga de forças variáveis, para análise extensométrica, de fissuras, variações de pressão, efeitos acústicos e térmicos (dupla exposição e tempo real); análise de vibrações (holografia interferométrica de tempo médio, holografia estroboscópica, Fig. 12, holografia

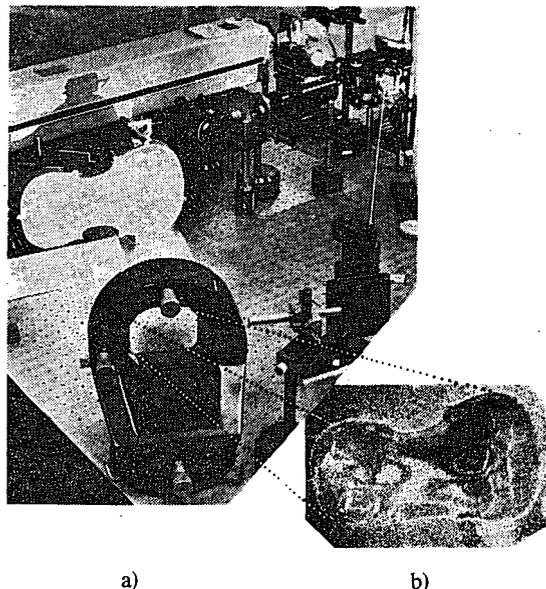


Fig. 12 — Montagem holográfica para estudo das vibrações num violino, por técnica estroboscópica com holografia moiré.

- a) Montagem experimental;
- b) Holograma moiré de um modo ressonante.

moiré); medidas em dinâmica de fluidos, diagnóstico de plasmas, transporte de massa e calor, etc.

Geração de Contorno

Usando um Laser com emissão a duas frequências pode gerar-se linhas de contorno na imagem da superfície do objecto, que permitem a análise dimensional da superfície.

Holografia Não-Óptica

O princípio da holografia, sendo genérico e fundamental no domínio dos fenómenos de carácter ondulatório, estende-se para a área das micro-ondas e ondas acústicas. Estruturas opacas à radiação electromagnética podem ser estudadas, proporcionando aplicações em for-

mação de imagens médicas (ecografia, TAC), sismologia, arqueologia, etc., em paralelo com a utilização em radar, sonar e na análise e síntese de antenas de sistemas radiantes, em geral.

Também se desenvolveram técnicas, ditas quasi-holográficas (baseadas no conceito de anéis de Fresnel, como registo holográfico de informação do objecto pontual), designadamente a formação de imagens por abertura codificada, para radiação incoerente: raios- γ e raios X. Identicamente se registaram desenvolvimentos em espectroscopia, e em sistemas com aberturas sintetizadas (Side-Looking Radar).

Holografia no Futuro

Com a disponibilidade futura de uma fonte coerente de raios X, grandes avanços serão possíveis na biologia, química e cristalografia. Com o microscópio de contraste de fase, para microscopia de raios X e a holografia, será possível estudar macromoléculas biológicas, e eventualmente obter imagens tridimensionais de estruturas tão importantes como o DNA. A arquitectura cristalina, à escala atómica, tornar-se-á tangível. A pesquisa em áreas como o cancro e das ciências dos materiais, beneficiará largamente de tais futuras técnicas.

O desenvolvimento de aplicações importantes cresce continuamente, ganhando assim um progressivo interesse na ciência e tecnologia, as técnicas holográficas, que se espera, abrirão novos domínios do conhecimento no futuro.

Conclusão

Holografia é um processo de registo e restituição de informação transportada por campos ondulatórios coerentes. Um holograma consiste numa estrutura do tipo rede difractiva (2000 linhas/mm), que resulta da interferência, no volume comum, de dois feixes coerentes de radiação. Um dos feixes provém de um objecto iluminado—feixe objecto, enquanto o outro—feixe de referência, tem uma frente de onda geometricamente definida (plana ou esférica, com centro de curvatura conhecido). O holograma de superfície corresponde a uma secção

no volume de interferência, enquanto o holograma de volume, tridimensional, reproduz, com profundidade, a interferência num dado volume.

Iluminando o holograma com um feixe de reconstrução, em geral idêntico ou conjugado do feixe de referência, a distribuição espacial em amplitude ou fase de uma das frentes de onda difractadas é idêntica à radiação originalmente emitida a partir do objecto — imagem virtual. A imagem virtual toma a mesma forma e posição (em relação ao holograma) que a «casca» luminosa do objecto, e apresenta idênticas propriedades, designadamente a tridimensionalidade. Outras frentes de onda difractadas originam outra imagem (real) e frentes de ondas espúrias.

Os hologramas podem ser registados em variadíssimos materiais fotosensíveis, para além da emulsão fotográfica. Incluem materiais que permitem apagamento e re-escrita, e processamento e fixação imediata, após exposição.

A holografia tornou-se uma ciência bem estabelecida, a partir da óptica, e uma técnica útil em muitas áreas da ciência, engenharia e tecnologia, continuando a sugerir soluções imaginativas, e proporcionando soluções não-conventionais para larga variedade de problemas.

Na ciência, na tecnologia e na indústria, a holografia mostrou ter potencialidades como técnica de diagnóstico e medida com capacidades únicas. A utilização em: pesquisa científica, inspecções e testes industriais, afixação de imagens tridimensionais, e no registo de informação, tornou-se corrente, e em expansiva penetração. Os elementos ópticos holográficos são usados em sistemas militares sofisticados, e em sistemas comerciais, preparando-se a sua utilização para os supercomputadores, na visão robótica, e nos écrans tridimensionais.

Não foram tratados muitos dos interessantes aspectos teóricos e experimentais da holografia, nem referidas muitas das diversas aplicações (holografia de Fourier, filtros holográficos para reconhecimento de formas, memórias holográficas, holografia heterodínica, análise holográfica na dinâmica de fluidos, holografia por computador, holografia médica, holografia em bioengenharia, cineholografia, transmissão

de hologramas por televisão, holografia temporal, holografia com fontes incoerentes, holografia artística, etc.) pois que o material disponível na bibliografia é excessivamente vasto (mais de 40 livros especializados e 100 000 artigos), mas foi esboçado o suficiente para se concluir que a Holografia, princípio fundamental, continuará, certamente, por muito tempo, a contribuir para o enriquecimento do conhecimento e compreensão da física da natureza, bem como para o desenvolvimento do potencial tecnológico.

REFERÊNCIAS

- [1] D. GABOR — *A New Microscopic Principle*, Nature, **161**, 777 (1948).
- [2] E. N. LEITH, J. UPATNIEKS — *Reconstructed Wavefronts and Communication Theory*, J. Opt. Soc. Amer., **52**, 1123 (1962).
- [3] R. J. COLLIER — *Some Current Views on Holography*, IEEE Spectrum, 67-74 (July 1966).
- [4] *Laser and Light*, Scientific American (1969).
- [6] H. SMITH — *Principles of Holography*, Wiley Interscience, N. Y. (1969).
- [6] R. J. COLLIER, C. B. BURCKHARDT, L. H. LIN — Academic Press, N. Y. (1971).
- [7] J. W. GOODMAN — *An Introduction to the Principles and Applications of Holography*, Proc IEEE, **59**, 464-476 (1971).
- [8] B. A. LENGUEL (Ed) — *Laser and Light*, Wiley International (1971).
- [9] D. GABOR — *Holography, 1948-1971*, Proc IEEE, **60**, 450-463 (1972).
- [10] R. K. ERF (Ed) — *Holographic Nondestructive Testing*, Academic Press, N. Y. (1974).
- [11] T. H. JEONG — *A Study Guide on Holography*, Wolography Workshop, Lake Forest College, (1975).
- [12] T. H. JEONG — *Geometric Model for Holography*, Am. J. Phy., **43**, 714-717 (1975).
- [13] C. VEST (Ed) — *Holographic Interferometry*, John Wiley, (1976).
- [14] R. K. ERF — *Speckle Metrology*, Academic Press, N. Y. (1978).
- [15] H. J. CAULFIELD — *Handbook of Holography*, Academic Press N. Y. (1979).
- [16] T. KALLARD — *Laser Art & Optical Transforms*, Optosonic Press, N. Y. (1979).
- [17] N. ABRAMSON — *The Making and Evaluation of Holograms*, Academic Press, N. Y. (1981).
- [18] O. D. D. SOARES, J. C. A. FERNANDES — *Cylindrical Hologram of 360° Field of View*, Appl. Opt. **21**, 3194-3196 (1982).
- [19] O. D. D. SOARES, L. BERNARDO — *Lasers: Principios e Aplicações*, AIP (1985).