

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE ARTES**

**IMAGENS
HOLOTRÔNICAS
de SÍNTESE**

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO
DEPARTAMENTO DE ARTES VISUAIS
MESTRADO EM ARTE E TECNOLOGIA DA IMAGEM
POR
JULIANO SERRA BARRETO**

**BRASÍLIA, DF
1998**

IMAGENS HOLOTRÔNICAS de SÍNTESE

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO
DEPARTAMENTO DE ARTES VISUAIS
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM ARTE E TECNOLOGIA DA IMAGEM
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE ARTES

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ARTE E TECNOLOGIA DA IMAGEM

AUTOR : PROFESSOR JULIANO SERRA BARRETO
ORIENTADORA: PROFESSORA Dra. TÂNIA REGINA FRAGA

1998 BRASÍLIA, DF

TERMO DE APROVAÇÃO

AUTOR: Juliano Serra Barreto

TÍTULO: Imagens Holotrônicas de Síntese

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO
DEPARTAMENTO DE ARTES VISUAIS
DO INSTITUTO DE ARTES DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM ARTE E TECNOLOGIA DA IMAGEM**

BANCA EXAMINADORA

ORIENTADORA: Professora Dra. Tânia Regina Fraga
Departamento de Artes Visuais
Universidade de Brasília

Professor Dr. Marcelo Zuffo
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade de São Paulo

Professor Dr. Eunézio Antônio de Souza
Departamento de Física
Universidade de Brasília

BRASÍLIA, 22 DE JUNHO DE 1998

“Quando da ocupação de Milão, pelas tropas de Luiz XII, Leonardo da Vinci, receando os tiros de canhão, que já haviam destruído muitas casas da vizinhança, se instalou em sua adega, prolongando até lá, habilmente, as chaminés, construindo lareiras e vários aposentos de moradia. Como se tivesse mudado para uma pequena fortaleza, transportou para o seu refúgio tudo que havia de mais importante na casa: quadros, desenhos, manuscritos, livros, instrumentos científicos.

Aí, mergulhado em seus estudos, realiza a seguinte experiência, assim descrita:

“Se atirardes duas pedras de igual tamanho em água parada, a uma certa distância uma da outra, dois círculos divergentes se formarão na superfície da água. Quando um dos círculos, alargando-se constantemente, encontrar o outro, o primeiro penetrará no segundo, cortando-o, ou os choques das ondas serão refletidos nos pontos de contato, sob ângulos iguais?”

Respondo baseado numa experiência: os círculos cruzarão um ao outro, sem se misturarem, mantendo como centro fixo, ambos os lugares onde caíram as pedras.

A pancada de um sino é respondida por um ligeiro estremecimento e pelo som de outro sino próximo. Uma corda, vibrando num alaúde, faz com que soe, num outro alaúde próximo, a corda correspondente à mesma nota, e, se puserdes um pedaço de palha sobre ela, certamente o vereis tremer.

A lei da mecânica é a mesma em ambos os casos. Como as ondas sobre a água após a pedrada, assim, também, vão, pelo ar, as ondas de som, cruzando-se umas com as outras sem se misturarem, conservando como centro o lugar de origem de cada som. E quanto à luz? Assim como o eco é o reflexo do som, assim o reflexo da luz num espelho é o eco da luz. Há apenas uma lei da mecânica, em todas as manifestações de força. Há, somente a Tua única vontade, e a Tua justiça, ò Primo Motor: o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.

Será que esta descoberta também perecerá sem deixar vestígios, como tudo que faço? Será que ninguém jamais ouvirá a minha voz, e que sempre estarei só, como neste momento, nas trevas debaixo da terra, como se tivesse sido sepultado vivo, junto com meu sonho de asas?

Pouco importa que eu esteja só. Pouco importa que esteja na trevas, no silêncio, no esquecimento. Pouco importa que ninguém mais saiba. EU SEI!”

Dimitri Merejkowski
O romance de Leonardo DaVinci

Aquilo de que necessitamos é imaginação.
Precisamos descobrir uma nova visão do mundo.

Richard P. Feynman

AGRADECIMENTOS

Professora Tania Regina Fraga

Professora Suzete Venturelli

Professora Sylvia Serra Barreto

Professora Lygia Saboia

Professor Junio Márcio Rosa Cruz

Professor Eunézio Antônio de Souza

Professor Oyanarte Portilho

Professor Fellipe Beakline

Professor Fernando Barreto

Professor Claudio Maia

Professor Mark Lucente

Liliana Vignoli de Salvo Souza

José Reginaldo Carrilho Mesquita

Hélio Cerqueira Gomes da Silva

e Fátima Borges Burgos

SUMÁRIO

TERMO DE APROVAÇÃO	3
AGRADECIMENTOS	5
RESUMO	8
PREFÁCIO	9
INTRODUÇÃO	10

PARTE I VISÃO E ESPAÇO

O SISTEMA VISUAL HUMANO	14
IMAGENS TRIDIMENSIONAIS	18

PARTE II HOLOGRAFIA E ARTE

O PARADIGMA HOLÍSTICO	30
ARTE HOLOTRÓPICA	35

PARTE III TEORIA HOLOGRÁFICA

DESENVOLVIMENTO	43
A TÉCNICA HOLOGRÁFICA	50
HOLOGRAFIA DIGITAL DE SÍNTESE	56

PARTE IV IMPLEMENTAÇÃO

PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA	66
PROGRAMAÇÃO GRÁFICA	85
APLICAÇÕES	89

PARTE V CONCLUSÃO

CONCLUSÕES	93
GLOSSÁRIO	96

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS	100
BIBLIOGRAFIA	103
<i>WEBLINKS</i>	105

RESUMO

APRESENTAÇÃO DE UM NOVO MÉTODO PARA A GERAÇÃO ELETRÔNICA DE HOLOGRAMAS, QUE PRESCINDE DO CÁLCULO INTEGRAL. ESTUDO DAS POSSIBILIDADES DE OBTENÇÃO DE HOLOGRAMAS EM SISTEMAS COMERCIAIS DE IMPRESSÃO DE FOTOLITOS, E DISCUSSÃO DE ALGUNS CONCEITOS RELACIONADOS À HOLOGRAFIA.

ABSTRACT

PRESENTATION OF A NEW METHOD FOR THE ELECTRONIC GENERATION OF HOLOGRAMS THAT MAKES IT WITHOUT THE NEED FOR COMPLEX CALCULATION. HOLOGRAMS PRINTING ON COMMERCIAL LASER PRINTERS ARE TESTED, AND SOME BASIC HOLOGRAPHY RELATED CONCEPTS ARE DISCUSSED.

RESUMÉ

PRÉSENTATION D'UN NOUVEAU MÉTHODE POUR LA GÉNÉRATION ÉLECTRONIQUE D'HOLOGRAMMES, QU'IL N'Y A PAS BESOIN DU CALCUL COMPLEXE. LA RECHERCHE POUR LES POSSIBILITÉS D'OBTENIR DES HOLOGRAMMES DANS SYSTÈMES COMMERCIAUX D'IMPRESSON LASER, ET LA DISCUSSION DE QUELQUES CONCEPTS QUI CONCERNENT A L'HOLOGRAPHIE.

PREFÁCIO

Este trabalho surgiu de um grande interesse despertado pelos primeiros hologramas que pude ver, há quase vinte anos atrás. cursava então o primeiro semestre de Física da PUC do Rio de Janeiro. Aquelas imagens me deixaram fascinado, e desejei muito ser capaz de criar imagens com a luz e o espaço. Nesta época ainda não havia na PUC qualquer possibilidade de realizar hologramas. Posteriormente me envolvi com a fotografia profissional, deixei o curso de Física e me formei em Cinema. Seguindo a veia artística de minha família, decidi trabalhar com as Artes Visuais, em especial com fotografia de Cinema. No entanto, a Holografia havia me capturado e, embora de forma descontínua, estive sempre acompanhando seu desenvolvimento, e mesmo divulgando-a, ao organizar uma exposição na estação Cinelândia do Metrô do Rio de Janeiro, em 1986. Fiz ainda várias viagens a Campinas, onde se localiza o laboratório do Professor José Lunazzi. E tive o prazer de conhecer, em São Paulo, o Professor Moisés Baumstein e seus filhos, grandes impulsionadores da Holografia comercial e artística no Brasil.

Considero a Holografia como uma tendência evolutiva e, seja como técnica, arte ou filosofia, nós veremos cada vez mais aplicações e soluções derivadas da proposta holográfica. Minha intenção é a de contribuir para a expansão e divulgação desses conceitos, cuja compreensão será capaz de transformar positivamente a sociedade planetária em que vivemos.

INTRODUÇÃO

A criação de objetos tridimensionais no computador tornou-se uma técnica amplamente divulgada e utilizada, a partir da última geração de aplicativos gráficos que surgiu no mercado da informática. Esses programas produzem projeções bidimensionais de objetos tridimensionais de acordo com as leis da perspectiva, tornando possível o reconhecimento de seus aspectos volumétricos pelas variações dos padrões de luz e sombra, como em uma fotografia. O objetivo que moveu a presente Pesquisa foi o de conseguir uma representação mais realista da tridimensionalidade, criando imagens autoestereoscópicas. Nessas imagens a configuração espacial, de diferentes pontos de vista, é percebida sem o auxílio de qualquer dispositivo.

Na verdade a Holografia é atualmente a única técnica que permite o integral registro da configuração espacial do objeto, permitindo a visualização de uma imagem, chamada real, pela correspondência visual exata das características volumétricas do objeto original. Hogramas são raridades e são únicos. O que vemos em muito produtos industriais, são reproduções impressas mecanicamente, que guardam apenas algumas das características das imagens holográficas que lhe serviram de matrizes. Um holograma é obtido com uso de lasers e outros dispositivos óticos. Ao final do processo, tem-se o registro de uma rede de difração, produto da combinação de dois feixes de luz, ou seja, de uma interação energética. Essa interação pode ser descrita matematicamente em termos de uma integral numérica, conhecida pelo título de Transformada de Fourier.

Foi o matemático Jean Baptiste Fourier quem demonstrou que qualquer forma de onda complexa e repetitiva pode ser dividida em uma série de simples ondas senoidais, de amplitudes e fases diferenciadas. Essa divisão é realizada por meio da Transformada de Fourier. Mas, sendo isso possível, o contrário também o é, e esta operação, a construção de ondas complexas pela combinação de ondas senoidais, é chamada Detransformada de Fourier. Isso nos permite calcular um holograma, ou seja, um padrão de interferência capaz de reconstruir uma imagem específica. Imagem essa descrita por dados numéricos, que indicam a localização espacial, num eixo de coordenadas, de um objeto, real ou imaginário. A Transformada de Fourier, por meio de poderosos programas de cálculo, possibilita obter uma rede de difração que, impressa em alta definição, apresenta um holograma idêntico ao que seria obtido pelo uso da técnica fotoquímica, a partir de um objeto concreto.

A Holografia revela novas e inusitadas formas de comportamento da energia e da matéria, proporcionando ao pensamento humano um conhecimento mais profundo, inclusive de sua própria mente. Ao estudar um holograma e suas propriedades, podemos encontrar valiosas pistas para a compreensão da relação entre a mente e a matéria, percebendo-os como pólos complementares de um mesmo continuum.

Nesta dissertação encontramos inicialmente uma breve descrição das características que compõem o sistema visual humano, considerando-se especialmente sua capacidade de visão em detalhe e de percepção cromática, além de examinar algumas implicações da visão estereoscópica. Na primeira parte do trabalho apresentamos os processos conhecidos de produção de imagens que se aproveitam de nossa percepção estéreo para criar efeitos volumétricos. A holografia aí está incluída, como a única forma conhecida de registro tridimensional, mas será analisada mais tecnicamente na seção 3.2.

Na Parte II, foram ressaltadas as conseqüências filosóficas que se sucederam à compreensão dos fenômenos físicos relacionados com a Holografia.

Pretendemos evidenciar a novidade conceitual proposta pela idéia de interferência, fundamento da Holografia, e que inaugura um novo paradigma no pensamento ocidental, transformando as relações correntemente assumidas, entre os elementos que compõem o Universo, incluindo nossa própria existência.

Por considerar a Arte como atividade humana impulsionadora da evolução, e também sintetizadora das concepções filosóficas de cada sociedade existente na Terra, sei que seu papel será fundamental para a difusão, conscientização e compreensão deste novo paradigma. Por isso, ainda na Parte II procuramos sinalizar as possíveis relações desse paradigma com a produção artística e mesmo com os artistas e seu público.

Na Parte III apresentamos aspectos mais técnicos concernentes à Holografia, sua evolução histórica, e a forma prática de obtenção de Hologramas, tanto pelo já tradicional processo ótico-químico, quanto pelos métodos aqui propostos, que envolvem a utilização do computador digital.

A seguir, na Parte IV, tratamos efetivamente do trabalho desenvolvido para a execução dos cálculos necessários, a tradução dos resultados em linguagem PostScript, e a impressão fotolitográfica dos hologramas. Ao final, examinamos brevemente as possibilidades de aplicação já exploradas, e as que ainda estão por serem desenvolvidas a partir da possibilidade de geração digital de imagens tridimensionais naturais e imaginárias.

Por ser esta uma pesquisa de caráter pioneiro no Brasil, permitiu-se a criação de neologismos, e a expressão Imagens Holotrônicas foi cunhada para designar as imagens de síntese obtidas através do método de cálculo de hologramas aqui apresentado.

Brasília, 21 de abril de 1998

PARTE I

VISÃO E ESPAÇO

seção 1.1

O SISTEMA VISUAL HUMANO

A visão é um sentido primordial na atividade humana, sendo responsável, quase totalmente, pela identificação e localização dos objetos, no espaço à nossa volta. O processamento das imagens que se formam na retina, ou seja, a interpretação dos registros visuais, é o nosso principal instrumento de conhecimento e conscientização do mundo. Dispomos para isso de um complexo conjunto de órgãos e funções, e do mecanismo da paralaxe binocular para aumentar sua eficiência.

Procedimento central no sistema visual do homem, a paralaxe binocular é o fenômeno em que, devido à posição relativa entre os olhos, duas imagens são encaminhadas ao cérebro. A partir destas duas imagens, obtidas de pontos de vista deslocados em cerca de 65 mm, e pela avaliação das distâncias, das escalas, e da iluminação, recriamos a volumetria espacial, inferindo a tridimensionalidade da cena. A cada instante, esta percepção nos é sugerida por um, ou mais, dos seguintes indicadores de profundidade: Perspectiva linear; Perspectiva Aérea; Sombreamento; Oclusão; Escala; Paralaxe temporal; Acomodação; Convergência e Paralaxe de movimento do observador.

A capacidade cerebral de fundir as duas imagens bidimensionais, em uma única imagem tridimensional, criando a sensação de relevo e profundidade, é chamada de estereopsia, visão estereoscópica ou visão em profundidade. Graças a ela podemos avaliar com precisão as escalas e as distâncias no meio ambiente. Isso nos permite a locomoção segura e a criação de objetos e construções complexas. Já a visão monocular é uma deformação sensorial que oculta parte do mundo, reduzindo para duas, a percepção das três dimensões do espaço

no mundo físico. Ainda assim valorizamos muito a visão monocular, pois com ela representamos o mundo visível. Durante a Renascença, e com a invenção da lente, tornou-se comum o uso da Camera Obscura para descrever o mundo físico, copiando-o como projeção bidimensional. Nessa época foram criadas inúmeras regras, baseadas em leis da Ótica, de perspectiva e de representação da Natureza. Para Arlindo Machado, pesquisador da USP, este foi um marco conceitual da civilização ocidental:

“Na verdade, por detrás de sua pretensão mecânica de imitar a Natureza, a perspectiva renascentista esconde a sua verdadeira motivação ideológica: ela visa instituir a visão plena de um espaço homogêneo e infinito elaborado por um olho/sujeito, tal como na filosofia idealista a plenitude e a homogeneidade do Ser é dada por um sujeito transcendental.” MACHADO(1984)

Ao analisar a evolução da visão, Jonathan Crary, citado por FRAGA(1996), mostra que este paradigma influenciou o discurso de muitos filósofos e cientistas, até o século XIX, quando surgiram os primeiros estereoscópios.

“Para ele, a *Camara Obscura* foi muito mais do que um simples dispositivo de projeção, a auxiliar os artistas na elaboração de perspectivas. Ela veio a constituir-se numa “metáfora filosófica”, que emergiu no discurso de cientistas como Locke, Decartes, Newton e Leibnitz, caracterizando um tipo de observador e determinando uma maneira de observar o mundo exterior: um observador que via o mundo como um recorte projetado sobre uma tela.”

Durante os últimos séculos aprendemos como olhar para o mundo que nos circunda a partir do ponto de vista desenvolvido pela perspectiva renascentista, e nos últimos cinquenta anos, este modo de ver se generalizou intensamente. A fotografia, o cinema e a televisão mostram incessantes imagens bidimensionais do mundo, proliferando esse paradigma. Aprendemos como os objetos ordenam-se no espaço de acordo com um sistema de perspectiva arbitrariamente escolhido. Esse sistema encontra-se introjetado no nosso modelo de visualidade, tornando muito difícil sua avaliação objetiva. Além disso sabemos do papel preponderante da mente na construção das imagens que percebemos, para além da fisiologia do olho. Na

verdade nós sequer vemos exatamente nossas próprias imagens retinianas, pois estas são apenas um dos estágios do processamento da luz pelo sistema visual. Somente um oftalmologista pode percebê-las, utilizando instrumentos especiais, como aquele que permitiu a fotografia reproduzida na FIGURA 1.1.

A esse respeito cito o pensamento de Pierre Bourdieu:

“Normalmente todos concordam em ver na fotografia o modelo da veracidade e da objetividade.....*a fotografia é um sistema convencional*, considerada um registro perfeitamente realista e objetivo do mundo visível, porque lhe foram designados usos sociais considerados `realistas` e `objetivos` ...A seleção que ela opera no mundo visível é completamente conforme, em sua lógica, à representação do mundo que se impôs na Europa desde o *Quattrocento*“ BOURDIEU(1979)

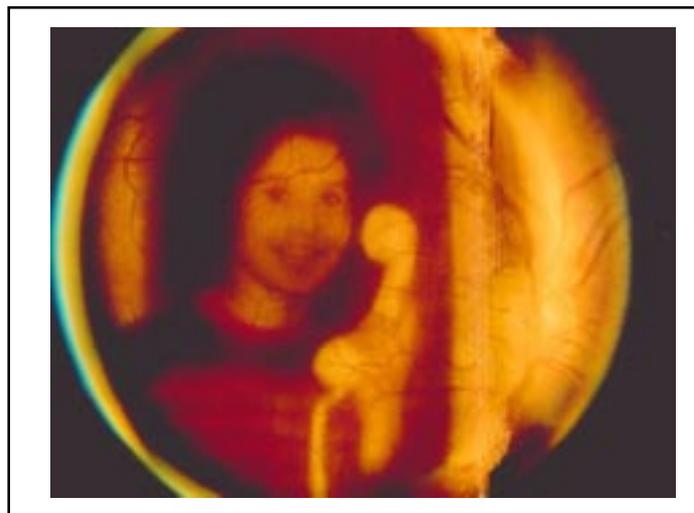


FIGURA 1.1 *Fotografia da imagem formada na retina humana.*

A pintura pós-impressionista, ao desmontar o sistema renascentista de representação, possibilitou a tomada de consciência das limitações que tal sistema nos impunha e ainda nos impõe, pois os meios de comunicação social continuam a emprega-los intensivamente. Também encontramos esse modo de representação embutido em todos os aplicativos de computação gráfica tridimensional e nos peri-

féricos de visualização binocular, hoje comuns em *video games*. Ao preferirmos olhar para superfícies coloridas que nos iludem espacialmente, podemos estar regredindo em nossas potencialidades naturais, e no mínimo desprezando a ferramenta fundamental de nossa sobrevivência evolutiva.

Além da capacidade de perceber tridimensionalmente, o sistema visual humano possui um poder de resolução bastante elevado. Com a acuidade lateral em torno de 1 minuto de arco, podemos perceber pontos de até 0.175 mm, a uma distância de 600 mm, como indica LUCENTE (1996), cap. 2. Esse poder de definição, ou acuidade visual, não é capaz, porém, de propiciar a percepção de todos os detalhes registrados como padrão de interferência, em um holograma fotoquímico. A técnica convencional exige do suporte uma resolução de pelo menos 3 a 5 mil linhas por mm, sendo que os cristais fotosensíveis em emulsões holográficas podem medir cerca de 0.3 microns (3×10^{-8} m), SAXBY(1980). Em um bom holograma portanto, o tamanho dos pontos que formam a rede de difração pode ser tão pequeno quanto 0,0002 mm. A tecnologia de impressão de fotolitos pode chegar a 120 linhas por mm de resolução, muito próximo dos valores possíveis em filmes fotográficos convencionais. Isto nos permite obter distâncias de até 0.008 mm, o que, de acordo com COGAN;O`CONNOR(1995) pode ser suficiente para produzir hologramas. Aplicando o método de desvio de Fase (ver seção 3.1), estes autores testaram o uso de filmes pancromáticos na fotoredução de CGHs, obtendo resultados satisfatórios, apesar da baixa resolução das imagens geradas.

A imagem visualizada no holograma pode igualmente apresentar muito mais informação do que podemos perceber a olho nu. A técnica holográfica é capaz de produzir imagens de pontos até 100 vezes menores do que o espaço de 0.175 mm, que podemos distinguir entre duas linhas. Por isso podemos produzir imagens com algum grau de imprecisão, e ainda satisfazer os limites da percepção humana. Assim, foi possível reduzir ao mínimo necessário para o nosso sistema visual a resolução do CGH, simplificando o cálculo matemático na modelagem da figura, ou seja, dos pontos que serão visíveis no holograma.

seção 1.2

IMAGENS TRIDIMENSIONAIS

○ homem cria imagens bidimensionais há pelo menos uns 10.000 anos, entretanto a possibilidade de criar figuras 3D com imagens planas, embora prevista por Euclides, só foi colocada em prática pouco antes da Renascença, e de forma muito elementar. Como vemos na figura 2.1, encontrada em um manuscrito com iluminuras, do século XIII, os princípios fundamentais da separação das imagens efetuada pela estereopsia humana, já são estudados desde esta época. Artistas como Giovanni Baptista Della Porta (1538-1615) e J Chimenti (1554-1640), autor da figura 2.2,

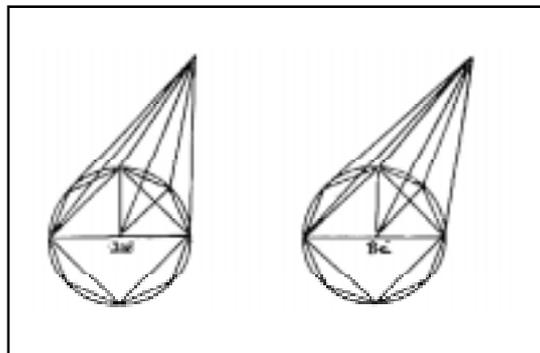


Fig. 1.2 Diagrama estereoscópico do séc XIII

realizaram vários estudos estereoscópicos, e até mesmo Leonardo da Vinci fez anotações sobre a visão binocular. CAHEN (1989)

Com a invenção da Fotografia em meados do século passado, aprofundou-se o estudo das imagens estereoscópicas. Estas eram obtidas a partir do uso de duas câmeras distanciadas horizontalmente, simulando a visão humana. Para perceber o efeito dimensional observa-se as imagens separadas para cada olho,



FIGURA 1.3 Desenho estereoscópico de J. Chimenti, c. 1600.

através de um visor adequado. O princípio de separação de duas imagens contíguas - a disparidade binocular - levou à criação de sistemas variados, usados no Cinema e em diversos tipos de materiais impressos. Especialmente as revistas de História em Quadrinhos, se aproveitaram da técnica, além de publicações sobre viagens e turismo.



FIGURA 1.4 Ácaros vistos no microscópio eletrônico estereoscópico.

A FIGURA 1.4 foi obtida com o uso de microscópio eletrônico na Universidade de Lyon, e mostra ácaros parasitas da folha do Abricot. Assim como o mundo microscópico pode ser explorado com imagens estereoscópicas, estas são indispensáveis nas imagens aéreas, e em muitas outras aplicações científicas e militares. Atualmente, apoiado na rede Internet, há um renovado interesse estético por imagens estereoscópicas, e uma crescente pesquisa por suas possibilidades artísticas.

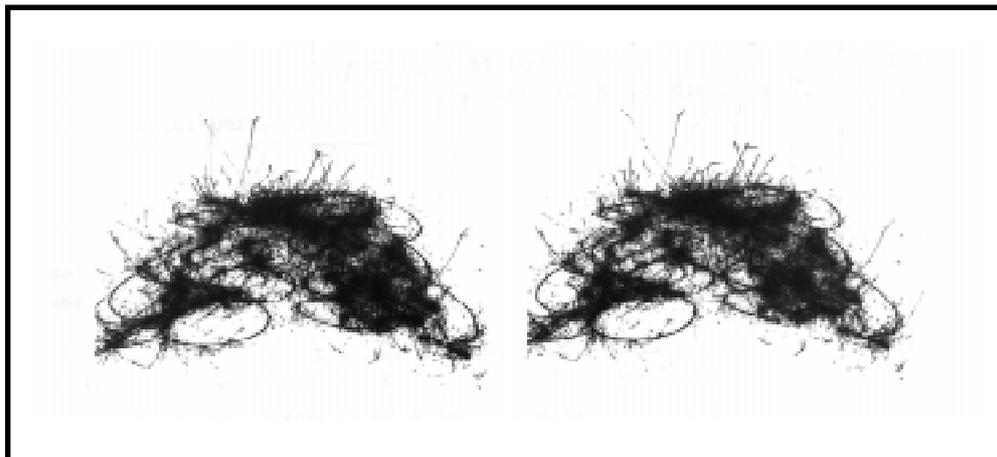


FIGURA 1.5 - Esterograma abstrato de Olivier Cahen.

Possibilidades inusitadas, como podemos conferir nos estereogramas abstratos dessa página, criados por Olivier Cahen.

Nas IMAGENS ESTEREOSCÓPICAS, a separação binocular é em geral obtida com o uso de filtros. Os mais usados são os de faixa cromática, e os polarizadores, que separam a luz pela direção de sua propagação. É também realizada eletronicamente, em visores de cristal líquido, o instrumento básico da técnica atual de Realidade Virtual. Para ver estas imagens é sempre necessário usar um par de óculos ou um capacete, que processe a separação das duas imagens planas.

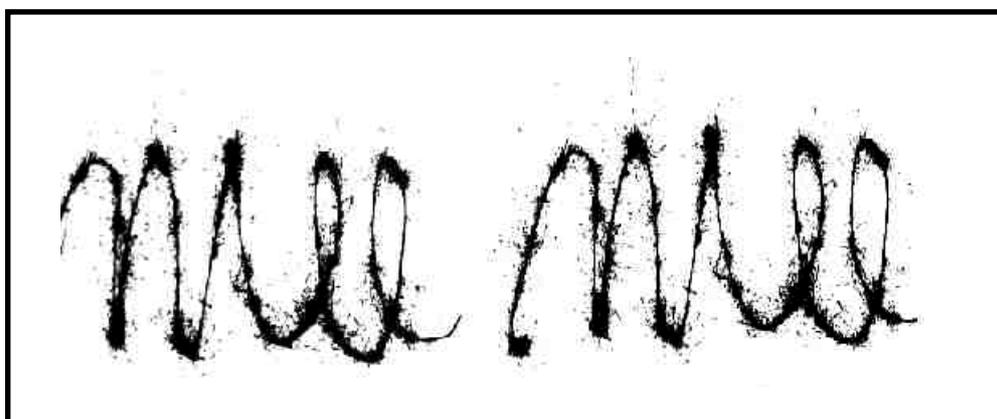


FIGURA 1.6 - Esterograma abstrato de Olivier Cahen.

As IMAGENS AUTOESTEREOSCÓPICAS são as que permitem que a informação tridimensional seja visível sem o uso de óculos ou outro acessório. Podem ser produzidas pelos seguintes procedimentos:

Grade de Paralaxe - é formada por finas tiras opacas que, colocadas a certa distância de duas imagens estereoscópicas, separa as duas vistas bidimensionais. Estas foram previamente divididas em fatias verticais, alternadas e novamente reunidas, na imagem final, de forma a serem corretamente separadas pelas linhas da grade de paralaxe. É uma técnica muito simples.

Lenticular - A tela lenticular é formada igualmente por tiras, porém, ao invés de impedir a passagem da luz, estas causam refração como em uma lente, e separam as duas imagens bidimensionais, permitindo uma modelagem mais brilhante. É muito utilizada em livros infantis. Estas microlentes podem separar até mais do que duas imagens. Assim essa técnica pode apresentar volumetria, mostrando ângulos diferentes do mesmo objeto. Ou simular um pequeno movimento, ou mesmo apresentar vistas muito diferentes entre si.

Estereogramas RDS - São imagens dotadas de profundidade que emergem de um padrão aparentemente caótico e irregular. A partir de pesquisas sobre a percepção humana, o cientista Bela Julesz descobriu que o Sistema Visual Humano é capaz de separar algumas imagens camufladas em padrões. Considerando o cérebro como o responsável pela visualização dos pares estereoscópicos, seus estudos sobre o processo visual humano, mostram que a imagem captada na retina é transformada pelo córtex cerebral, ver NINIO (1994). Conhecendo certos parâmetros dessa transformação, é possível combinar imagens que serão separadas pelo córtex.

Essas imagens compostas são chamadas *random dot stereogram*, ou RDS. Ao convergirmos os olhos posicionados a alguns centímetros do RDS, o padrão desaparece para formar linhas em níveis de profundidade, e a figura tridimensional é nitidamente reconhecida. Na imagem coexistem o padrão aleatório, e a forma volumétrica, embora a visão monocular não a perceba.

A FIGURA 1.8 é um estereograma RDS, que pode ser visualizado com a técnica do olhar divergente. Para enxergar um pequeno cubo no espaço em frente ao plano da imagem, basta focalizar no infinito ao olhar a figura, que deve estar posicionada a cerca de 30 cm de distância. Ao visualizarmos com o olhar convergente, podemos observar a formação de uma imagem pseudoestereoscópica, em que a perspectiva aparece invertida.



FIGURA 1.7 - Estereograma RDS.

Holografia - O processo holográfico permite a recuperação das características espaciais do objeto, por meio do registro das diferenças de fase provocadas pela luz coerente. Possibilita a paralaxe total, e produz imagens com alto brilho, contraste e resolução, além de correção cromática. A evolução da técnica possibilitou a obtenção de diversos tipos de holograma, dos quais exemplificamos aqui os mais comuns.

Na FIGURA 1.8 vemos um holograma de Benton, também chamado de arco-íris, que é conseguido reholografando-se um holograma matriz, que apresenta paralaxe total, através de uma fenda horizontal. Nesta segunda exposição, elimina-se a paralaxe vertical, mas ganha-se, com isso a possibilidade de visualização da imagem mesmo sob luz incoerente. Na FIGURA 1.11 vemos uma aplicação deste tipo de holograma. Este é transferido para uma lâmina finíssima de alumínio e polyester, que reproduz, em relevo, o padrão de interferência do holograma. Isto é conseguido por meios eletroquímicos e por pressão mecânica.

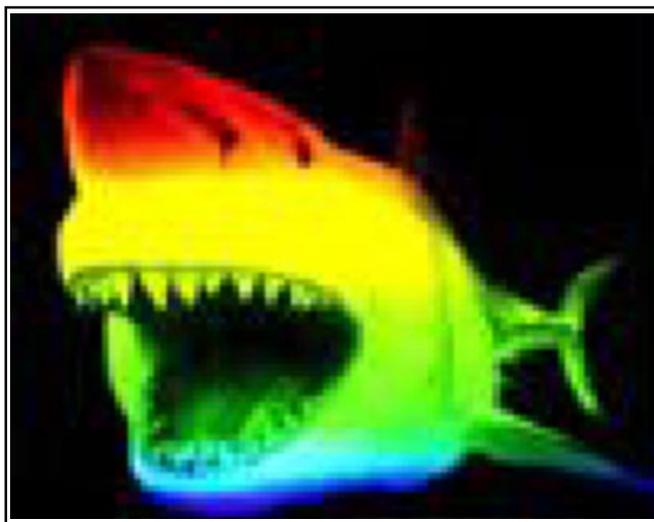


FIGURA 1.8 - Holograma de Benton, chamado de Arco-Íris, visível mesmo com luz de baixa coerência.

Atualmente este processo não está disponível no Brasil, mas foi implementado em São Paulo, nos anos 80, por iniciativa do Professor Moysés Baumstein, um pioneiro da Holografia. Infelizmente, após sua morte, o laboratório encerrou suas atividades. Nos EUA, porém, pode-se comprar equipamentos que produzem hologramas em alumínio automaticamente, o que é um negócio muito promissor.

A FIGURAS 1.9 e 1.12 mostram hologramas coloridos de transmissão. Obtidos com laser tricromático, apresentam paralaxe horizontal e vertical, além de reproduzir naturalmente as cores originais. É um processo sofisticado de holografia, possível apenas para grandes empresas ou laboratórios.



**FIGURA 1.9- Holograma de transmissão, produzido no MIT ,
mostrando um automóvel NSX.**

Os hologramas podem ser:

* de Transmissão - visível somente com Laser, são feitos com os dois feixes (de referência e do objeto) do mesmo lado, com relação à chapa fotográfica.

* de Reflexão - são visíveis sob luz incoerente branca, do sol ou artificial. Os feixes atingem o filme por lados opostos.

* de canais múltiplos - duas ou mais imagens são visíveis, em diferentes ângulos, Podem ser estereogramas, com muitas imagens bidimensionais do mesmo objeto compondo vistas tridimensionais, ou com imagens totalmente diferentes em cada ângulo de visão.

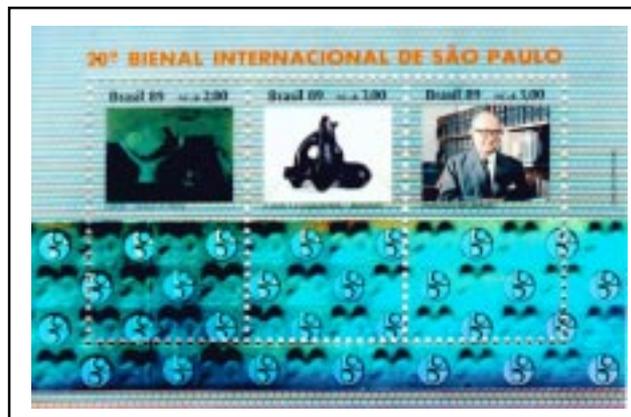


FIGURA 1.10 - Selo comemorativo da Bienal de São Paulo de 1989, produzido pela ECT . Toda a faixa inferior é um holograma arco-íris.

* de Benton (*Rainbow*) - é obtido com a reexposição de apenas uma 'fatia' de um holograma original de transmissão. Apresenta as cores do espectro visível no mesmo objeto, quando se varia o ângulo de visão na direção vertical.

* de Imagem Real - são hologramas de reflexão, que apresentam a imagem dramaticamente próxima do espectador, com elevada profundidade e definição de cores e contornos. Utilizando-se lasers tricromáticos, obtém-se um registro natural das cores dos objetos. Realizado em várias etapas e de manufatura sofisticada são utilizados principalmente em museus e exposições de Arte.

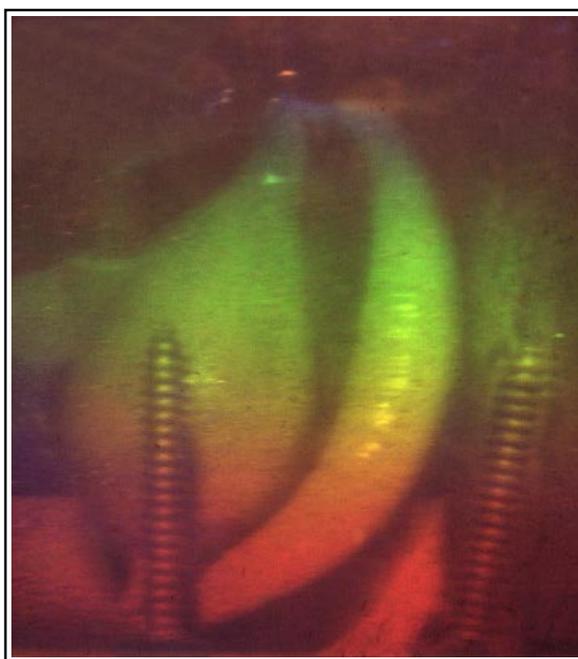


FIGURA 1.11 - Holograma de transmissão produzido no Laboratório de Ótica da Universidade Federal Fluminense.



FIGURA 1.12 - Holograma de Imagem Real, reproduzindo antiga porcelana russa, realizado na Inglaterra.

PARTE II

HOLOGRAFIA E ARTE

SEÇÃO 2.1

O PARADIGMA HOLÍSTICO

O panorama mundial passa por surpreendentes mutações. Isto nos leva a crer que estamos em meio a uma revolução, o que significa mudança de paradigma, uma transformação global, a qual se efetua estruturalmente, afetando os sistemas envolvidos, em diversos níveis. Paradigma em grego significa exemplo, padrão, modelo. O surgimento da Holografia permitiu-nos a percepção de um novo modelo de compreensão da Natureza e de nós mesmos. Esse modelo, conhecido como Paradigma Holográfico, vem sendo aplicado em muitas áreas da atividade científica e social do homem. Em especial, abre novas possibilidades para a evolução da Arte enquanto campo experimental produtor do conhecimento humano.

Jacob Needleman, citado por KHUN (1976) observou que, “em certos momentos da sua trajetória, a humanidade se encontra entre dois sonhos. São momentos nos quais um paradigma já velho está ruindo e um novo paradigma ainda não surgiu para substituí-lo - momentos de crise - um tempo no qual nos encontramos com o desconhecido. Nesta perspectiva, o desafio que se nos coloca, é o de sermos capazes de conviver com o não saber, de termos a lucidez de perceber a obscuridade essencial do momento em que vivemos: de não nos apresarmos em substituir uma resposta em crise por outra, mas de permanecermos na tensão da própria pergunta.”

Contemporaneamente uma nova e radical sensibilidade está emergindo no conhecimento humano, ampliando seu campo de complexidade, e criando condições para uma compreensão talvez mais aproximada da verdadeira natureza do conhecimento. A geração de uma nova interface nessa relação entre o homem e o mundo, e que pode ser denominada *holoface*, é a etapa necessária

para o estabelecimento de uma nova ordem de existência. BRANDÃO;CREMA (1991)

Para Roy Ascott, um dos artistas mais proeminentes da *telematic art*,
"A tecnologia dos sistemas telemáticos e da mídia computadorizada não deve mais ser vista simplesmente como um conjunto de complexas ferramentas que estendem o alcance da pintura e da escultura, da música ou da literatura. Podemos agora ver que ela é o suporte de um novo campo de vital criatividade, e que é radicalmente diferente dos gêneros artísticos estabelecidos, assim como estes são diferentes entre si. Um novo veículo de consciência, de criatividade e expressão adentrou nosso repertório do Ser. Ao participar tanto da tecnologia quanto da poesia, do imaterial e do virtual, assim como do palpável e do concreto, a telemática não pode ser categorizada nem como arte, nem como ciência, embora se alie igualmente a seus discursos. Neste campo o desenvolvimento futuro indicará claramente a interdependência das competências e aspirações do fazer artístico, científico, e tecnológico e suscitará a formulação urgente de uma educação transdisciplinar." STILES; SELTZ (1996)

Podemos encontrar as raízes do paradigma holográfico em filósofos pré-socráticos como Heráclito e Parmênides. Heráclito buscava compreender a Unidade original, através da consciência da transformação incessante que se processa no mundo, e formulou o que hoje poderíamos chamar de Universo Holístico. Estes filósofos, e outros gregos dos séculos V e IV a.C., buscaram o conhecimento de uma forma integradora, sentindo o Homem e a Natureza como um conjunto unitário, sem recorrer a sistemáticas divisões, nem à separação do conhecimento em Física e Metafísica. Dessa maneira, as ciências naturais, a arte, a teologia e a filosofia percorrem harmônica e simultaneamente o caminho do conhecimento humano. A investigação acerca da Natureza realizava-se a partir de um princípio universal e gerador de todas as coisas, Arché, cuja verdade manifesta-se como Physis, o Ser que, por sua luz permite ao ente projetar-se em existência. BASTOS (1987)

Já a partir de Platão percebemos a evolução de duas vertentes no pensamento ocidental: uma que processa a Separação e outra que pensa a Unida-

de. Com a evolução dessas duas correntes encontramos a predominância do pensamento racional-analítico nos últimos séculos. Assim, uma distância cada vez maior entre o Homem e a Natureza surge como conseqüência dessa separação fundamental -criada ou reforçada pela linguagem-, entre sujeito e objeto.

Holismo é a expressão proposta pelo filósofo e militar Ian Christian Smuts, um dos primeiros sul-africanos a questionar o *apartheid*, em seu livro “Holism and Evolution “, editado em Londres,(SMUTS (1926)). Trata-se de uma tentativa de definição da natureza da evolução, buscando compreender seus fatores determinantes e fases de desenvolvimento. Na perspectiva desse pensador, existe uma tendência sintética no Universo, responsável pelo progresso dos conjuntos que constituem este Universo. Esta tendência holística permeia todas as realizações de todos os conjuntos de fenômenos, criando um desenvolvimento gradual. E cria também a estratificação progressiva de séries de conjuntos, que se estendem desde o nível do inorgânico, até os mais elevados, de criação.

A idéia de continuidade evolutiva entre Matéria, Vida e Mente é central no pensamento de Smuts, que a concebe como séries mais ou menos interligadas e progressivas do mesmo grande processo. Sua lógica é uma revisão radical d idéias correntes em sua época, e que põe em cheque o conceito de causalidade, considerado por ele, rígido e limitado. Examinando a matéria como uma estrutura de unidades de energia, percebe que esta não é inerte e passiva, mas auto-transformadora enquanto radioativa, e ainda mais, como protoplasma, sustentadora da vida. O conjunto não é a mera soma das partes, e a matéria orgânica efetua uma regulação e síntese de funções que parecem obedecer a um regulador central em cada conjunto vivo. Este fator estruturante é o fator interno, subjacente a toda evolução, e é o que Smuts chama de Holismo, fator operativo fundamental referente à criação de conjuntos fenomênicos no Universo. Portanto, esse processo é criador da realidade.

O todo está nas partes e as partes estão no todo. Esta Unidade, que é mais do que a soma das partes, comunica uma estrutura ou uma conformação particular às partes, determinando suas relações e sua síntese. A totalidade aponta para conjuntos cada vez mais perfeitos. Este processo contínuo e universal de modelagem de conjuntos forma a realidade, etapa por etapa, através das coisas, plantas, animais e seres humanos. A Vida passa a ocupar todos os espaços da evolução e Smuts sugere que se substitua o conceito de Vida, pelo de Todo.

A Mente é um órgão do Todo, existente desde sempre, e que, através do seu poder de experiência do conhecimento, passa a dominar suas próprias condições de vida, e controlar o sistema de regulação que lhe deu origem. A Mente é um novo tipo de estrutura, diferente do campo orgânico ou inorgânico, de natureza imaterial e espiritual. É necessário entender a Mente como sendo dotada de um aspecto universal, além da Mente subjetiva individual, e onde a consciência é uma área iluminada de livre acesso, circundada por regiões que não podem ser conhecidas diretamente, mas apenas inferidas a partir de seus efeitos.

Assim o emergir e o auto-aperfeiçoamento de totalidades na Totalidade é a finalidade deste universo holístico. Nessa Totalidade situa-se o cérebro humano em constante auto-organização, numa atualização sincrônica, fruto de um sistema interativo, de *biofeedback*, que permite um crescimento em complexidade, pela superação de sucessivas crises na sua estrutura dissipativa e extensiva.

O fenômeno da existência é portanto o veículo que interconecta Mente, Objeto e Mundo, realizando o Ser na sua projetividade, como sistema vivo e autopoietico, alcançando a permanência em sua propriedade coletiva transcendente de reprodução. O grau de complexidade alcançado em cada etapa da reestruturação imprime a interface disponível e atualizada que viabiliza a relação entre a Mente e o Mundo.

Esta interface que é aplicada em todos os níveis da experiência humana, individual e social, reflete o estágio, ou plano em que se situa cada indivíduo ou grupo social.

Na civilização ocidental, é a racionalidade, desenvolvida como interface predominante, que está em crise. Isso pode permitir uma alteração positiva do campo perceptivo humano, no sentido de ampliar o que pode ser revelado, e de forçar o desvelamento de nossa sensibilidade natural.

"Assim como Ptolomeu, em sua Cosmografia, descreveu antes de mim o universo, eu descrevo o corpo humano, esse universo em miniatura, esse universo dentro de um universo." Leonardo da Vinci, em CLARET(1985)

SEÇÃO 2.2

ARTE HOLOTRÓPICA

Holografia é uma técnica de registro fotográfico do campo ondulatório da luz refletida por um objeto. Grava-se assim, uma informação volumétrica que pode ser reconstruída quando iluminada por uma fonte de luz coerente, oriunda de um laser. A imagem aparece tridimensionalmente no espaço vazio. A imagem é imaterial, mas real. Além disso, esse registro permite que cada parte do holograma possa reconstruir toda a imagem do objeto, em diferentes pontos de vista, como se este fosse visto através de partes de uma janela.

O conhecimento dos fundamentos teóricos da Holografia, permitiu compreendermos a forma como funciona o sistema de navegação dos golfinhos e baleias. Estes animais se posicionam através da emissão e detecção de ondas ultrassônicas e de infrassom. O órgão cerebral que as produz e interpreta lida com as diferenças de fase entre as ondas emitidas e o eco, transformando-as incessantemente num sistema de *biofeedback*. Também os morcegos e alguns peixes parecem registrar ondas de pressão de forma holográfica, ou seja pela sensibilidade às diferenças de fase entre ondas. Assim, a Holografia constitui-se em um novo modelo de conhecimento, o qual permite revelar mecanismos até então não elucidados da Natureza. A assimilação desse modelo em diversas disciplinas do conhecimento, indica a sua emergência como paradigma, que vem resolver antigos mistérios e limitadas interpretações.

Este modelo foi também desde cedo aplicado aos estudos da neurofisiologia, especialmente aos dedicados à memória e percepção. Contrastando com a visão tradicional, acredita-se que a memória não ocupa uma porção específica do cérebro, mas que se espalha por toda a massa encefálica. Assim a recordação e a percepção acessam e produzem informações de maneira análoga à

técnica holográfica, pelo registro e interpretação da interação dos campos de ondas cerebrais. Outro pioneiro desta aproximação é Karl Pribham que, em 1969 propôs o holograma como modelo para os processos cerebrais humanos. Isto trouxe dúvidas quanto à propriedade de muitos conceitos tidos como certos e eternos.

A utilização da Holografia enquanto processo artístico é bastante recente, sendo da década de 70 o aparecimento das primeiras propostas, surgidas na Alemanha e nos EUA. Afirmou-se um movimento internacional durante os anos 80, qual progrediu muito após o aparecimento da Internet, que deu novo impulso, ao viabilizar uma comunidade virtual de artistas e amadores hológrafos. As dificuldades técnicas, tanto na fase de produção quanto na exibição de hologramas tornam difícil sua divulgação e, por enquanto é praticamente inviável a integração completa com os meios eletrônicos ainda que a pesquisa esteja em evolução contínua.

O paradigma holográfico, no entanto, abre novas possibilidades para a Arte, em seu desenvolvimento enquanto atividade do conhecimento humano. Na interação com o real, o holograma propõe uma nova atualização da realidade, ao apresentar uma imagem virtual mas idêntica à original; uma simulação tridimensional e exata que se situa numa outra dimensão, além da materialidade ordinária.

Seria esta hiper-realidade mais próxima do real do que a simulação a duas dimensões, da fotografia e do cinema? A fotografia nos retorna ao espaço tridimensional através do simulacro bidimensional. Estaria o holograma nos revelando e tornando sensíveis a uma quarta dimensão desvelando uma verdade oculta, secreta e holística?

Para Jean Baudrillard o holograma evidencia a razão pela qual as coisas escapam à representação e à semelhança exata com seu duplo:

"Quanto mais nos aproximamos da perfeição do simulacro, mais aparece à evidência porque é que todas as coisas escapam à representação, escapam ao seu próprio duplo e à sua semelhança. Em resumo, não existe real: a terceira dimensão não é mais do que o imaginário de um mundo a duas dimensões..." BAUDRILLARD(1980)

Pois a validação dos objetos do mundo é feita por um pacto de semelhança das coisas consigo próprias, em que o real é suposto ser igual a si mesmo, e assim abandona-se sua sombra, o seu segredo, a conexão holotrópica do Universo. AnnaTeresa Fabris, refletindo sobre o pensamento de Boudrillard, diz que para ele

”O real deixa de ser seu referente: todas as suas possibilidades já estão inscritas na decodificação da mídias , já estão antecipadas em sua encenação e em suas conseqüências possíveis. São signos que remetem a signos, num jogo contínuo de refração, que transforma todos os acontecimentos em visões hiper-reais, que acelera o curso da simulação, pois não há mais `conteúdos` ou `finalidades` próprias.

Este Universo que deixou de ser metafórico, que deixou de ser uma projeção mental ou psicológica do indivíduo, é claramente definido pelo domínio da tela e da rede, isto é, por uma superfície não-reflexiva iminente: a superfície da comunicação”. FABRIS(1987)

Na perspectiva holística, o limites entre as coisas vivas e inanimadas se fragilizam, o material orgânico torna-se também matéria prima da Arte. Uma Arte como a do jardineiro, que modela o material ao mesmo tempo que modela função e conhecimento. Na criação de obras de arte orgânicas poderemos testar a estética da própria natureza, reconhecendo os mecanismos evolutivos por combinações e mutações dos próprios materiais em sua trajetória no tempo. Assim, o artista divide a responsabilidade da criação com o objeto artístico, realizando a integração sujeito-objeto no ato da criação, ao tentar atingir a ressonância entre as leis fundamentais dos sistemas vivos e uma forma de conhecimento que alcance a complementaridade fenomenológica sujeito-objeto.

A artista americana Lynn Hershman utiliza o próprio corpo como modelo, e sua arte emprega o vídeo como agente de cura, recompondo e reformulando a si mesma, física e psicologicamente. Nos *Electronic Diary*, iniciados em 1985, Lynn avançou em sua pesquisa das identidades, examinando a psicologia do incesto infantil e das disfunções da personalidade. Seus trabalhos, e os de muitos outros

pesquisadores, revelam a emergência contemporânea dessas novas possibilidades de existência artística. STILES;SELTZ(1996)

Os fractais surgiram nos anos 70, quase como uma coisa viva, e colocaram em pauta a discussão sobre a produção matemática e computacional de obras de arte. Benoit Mandelbrot foi quem concebeu e desenvolveu a geometria fractal, e a define assim:

“Corpo de pensamento, fórmulas e figuras que pode ser chamado nova geometria da Natureza, ou uma nova linguagem geométrica. Descobri surpreendido que a prática cuidadosa dessa nova linguagem é largamente percebida como uma nova forma de arte.”

Em 1850, ao criar o negativo e, paradoxalmente, a possibilidade de reprodução mecânica da imagem, Fox Talbot chamou de “Lápis da Natureza” seu processo fotográfico. Ele, assim como Mandelbrot, persegue uma geração “natural” da obra de arte, em que o homem dá partida a um processo auto poético e interativo, sem um horizonte fixo...

A transformação é, então, o que vai se tornando cada vez mais sensível, por vezes mais do que aquilo que se transforma. A velocidade da transformação, a aceleração, introduz uma diferença na concepção do tempo, ampliando seu sentido. Os gregos se referiam ao tempo com duas palavras: por Aion compreendiam um tempo original, eterno, sem começo nem fim; e por Cronos designavam o tempo cotidiano, mensurável e serial, percebido em seqüências de passado, presente e futuro, BASTOS (1987).

Quando se torna claro que o passado só existe na memória, atualizando-se como uma experiência presente, e projetando-se como o futuro existente no presente. As fronteiras expandem-se para preencher todo o tempo, num eterno presente. Diz Bergson que “a duração é o progresso contínuo do passado que rói o futuro e infla ao avançar”, introduzindo assim a noção de duração como substância do tempo e o passado como componente do presente num Universo que dura. BERGSON(1988)

Gilles Deleuze, a partir das idéias de Bergson, desenvolve o conceito de que o movimento é um corte móvel da duração, ou seja do Todo. O movimento exprime a mudança na Duração, e no Todo , que é a Relação entre as coisas. Segundo ele,

”pelo movimento o Todo se divide nos objetos, e os objetos se reúnem no Todo: e, justamente entre os dois, tudo muda.” DELEUZE(1985)

A transformação é, portanto, a manifestação do tempo no espaço. No cinema é possível -considerando os objetos ou partes de um conjunto como cortes imóveis- perceber a noção de corte móvel: a imagem movimento, imagem-mudança ou imagem-relação, para além do próprio movimento, que exprime as mudanças do todo com relação aos objetos.



FIGURA 2.1 - Fotografia de Etienne Marey, 1897

O tempo provoca crises no pensamento racional porque sendo eterna transformação, não pode se deixar captar por conceitos, em princípio, imunes ao tempo. Os conceitos mudam por concordância; o tempo, não espera, nem concorda. De qualquer forma há uma percepção do tempo em todos nós. Ou, melhor, várias percepções do tempo em nossas consciências. A contínua mudança em nossa concepção do tempo deveria nos deixar alerta para as possibilidades diferenciadas de expressão do tempo em nossas vidas. No entanto, costuma-se pensar o tempo de forma serial como se esta fosse a maneira predominante de existência do tempo.

A Física Clássica utilizou o tempo de forma que pudesse servir como medida e padrão para a compreensão dos fenômenos da Natureza. Já na compreensão do mundo que propõe a Física contemporânea, o tempo forma um par complementar com o espaço, de tal forma inseparável que, pela compressão do tempo, a matéria torna-se energia. O estado não absoluto do tempo e do espaço foi substituído pela idéia absoluta do espaço-tempo. TOBEN;WOLF(1975)

A representação do tempo, na Arte, também vem sendo predominantemente analítica, embora mesmo na pintura rupestre seja possível observar casos raros de representação simultânea do movimento das patas dos animais. Ainda que não se possa encontrar qualquer vestígio desta “aberração” durante a Renascença européia, ela está presente hoje em dia, nos universos da história em quadrinhos e na palheta de efeitos especiais das ilhas de edição de imagens por computador. Foi Marcel Duchamp quem, no campo da pintura, mais enfaticamente nos lembrou esta possibilidade de representação sintética do movimento, graças ao persistente trabalho de outro artista, o fotógrafo Etienne Marey, o qual gravava na mesma chapa fotográfica diversos momentos do movimento de um modelo. Na FIGURA 2.1 vemos simultaneamente as diferentes posturas assumidas, por um espadachim em exercício. Marcel Duchamp compôs o quadro “Nu descendo uma escada” da mesma forma, pintando várias etapas do movimento na mesma tela. Chegou a ter companheiros nessa pesquisa, como o italiano Balla, participante do movimento denominado Futurismo, SHARF(1978)

Duchamp realizava assim a proposta cubista de fragmentação espacial, aplicando-a também ao tempo. Muitas formas de representação do tempo podem ser imaginadas, mas sempre a partir de nossas concepções dimensionais, de nossas possibilidades de compreensão do tempo, por impossibilidade de lidar com o tempo mesmo. Assim, a questão do tempo será cada vez mais relevante na obra de arte e os meios eletrônicos aparecem como um substrato potencialmente adequado para a pesquisa de novas relações com o tempo. A grande rede mundi-

al de comunicação via computador já veicula trabalhos artísticos que se transformam à medida que percorrem a Teia. A Realidade Virtual também relaciona uma alternativa de tempo, ao criar uma alternativa espacial.

Para Roy Ascott, “quando a Arte é uma forma de comportamento, o software predomina sobre o *hardware*, na esfera criativa. O Processo substitui o produto em importância, assim como o sistema ultrapassa a escritura.... Agora que vemos que o mundo é totalmente processo e constante mudança, nós ficamos menos surpreendidos ao descobrir que nossa Arte é também totalmente processo. Reconhecemos o processo ao nível humano como comportamento, e estamos começando a entender agora a Arte como sendo essencialmente comportamental.” A discussão, proposta em texto de 1967, está se verificando cada vez mais real com o passar dos anos. Em “Behaviourables and Futuribles” ele defende que a Arte, assim como a Ciência e Sociologia, se desenvolvem pela criação incessante de futuros alternativos e interativos, e este é o cerne do progresso atual da Arte. Ele acredita que da sociedade pós-industrial surge uma psicotecnologia, capaz de nos levar a novas relações de comportamento, e que instaura a Arte também como forma comportamental, ao afirmar: “*Art is now a form of behaviour.*” STILES;SELTZ(1996)

A Arte pode ser holotrópica quando se encaminha para a Totalidade, revelando as múltiplas conexões simbólicas ainda possíveis ao homem e investiga novas qualidades sensoriais, propondo formas construtivas orgânicas e múltiplas, interativas e mutantes, expandindo as fronteiras do conhecimento. Assim, em lugar de objetos artísticos são criados eventos comunicacionais, em que informação e energia deslocam-se em um fluxo contínuo, vivo e multidirecional. O mesmo fluxo em que se movimentam as galáxias e os nossos corpos.

PARTE III

TEORIA HOLOGRÁFICA

SEÇÃO 3.1

DESENVOLVIMENTO

Os primeiros passos para a realização prática da técnica holográfica foram dados pelo cientista australiano Lawrence Bragg, que conseguiu na década de vinte, o registro das frentes de ondas difratadas por cristais iluminados (irradiados) com raios X, KIENSLE;ROESS (1969). Suas pesquisas, realizadas com a colaboração do seu pai, lhe deram um prêmio Nobel em 1915, e o título de Sir em 1966. O objetivo inicial era a visualização das muitas camadas que se formam nos cristais, e para isto o desafio era o registro da fase das ondas difratadas pela estrutura cristalina.

Anteriormente Gabriel Lippmann havia proposto um processo fotográfico único, em que as cores não desapareciam pouco tempo após o processamento do filme. Seu método não utiliza corantes, e baseia-se no registro da interferência entre os raios luminosos que atravessam a camada de emulsão fotográfica pancromática, e são refletidos por uma espelho de superfície. A luz proveniente da lente de uma *Camara Obscura* penetra a emulsão e é refletida pelo espelho, feito de mercúrio, registrando, na espessura do filme, as variações dos comprimentos de onda que correspondem às cores dos objetos da cena. Este processo o levou a ganhar o prêmio Nobel de Física em 1908. DENISYUK(1978)

O tempo médio de exposição das fotografias de Lippmann é muito longo em relação ao processo convencional, de registro das intensidades luminosas, e a visualização exige uma posição precisa e limitada de contraluz. Isso precipitou o abandono tecnológico de seu processo de cores naturais, em favor do uso de corantes acoplados aos sais de prata.

Em 1947, o húngaro, naturalizado britânico, Dennis Gabor, em busca de melhores imagens para o microscópio eletrônico, inclui um feixe de referência no sistema, simplificando o registro da fase. Esta é considerado o ano de nascimento da Holografia, e por esta descoberta, o Dr. Gabor recebeu, em 1971 o prêmio Nobel de Física. Também foi ele que cunhou a expressão Holograma, combinando duas palavras de origem grega, holos=tudo e grammá=mensagem.

Na década de cinquenta aparece a primeira tese de Doutorado em Holografia, defendida por Hussein El-Sum na Universidade de Stanford [EL SUM(1952)]. Mas somente no início dos anos 60 ganhou maior impulso, quando foram desenvolvidos os primeiros lasers de cristal, com os quais foram produzidas as primeiras imagens holográficas de qualidade. Lasers são fontes de luz coerente artificial, e já haviam sido previstos por Einstein em 1917. Em 1958 os cientistas norte-americanos Arthur Leonard Schawlow e Charles Hard Townes patentearam o laser, sigla para dispositivo amplificador de luz por radiação estimulada. O tipo de onda que emite um laser está representado na FIGURA 3.1, onde se vê uma frente de onda em que todos os fótons caminham em sintonia, com a mesma frequência e coincidência no tempo dos valores máximos. Porém como nem cristais, nem gases

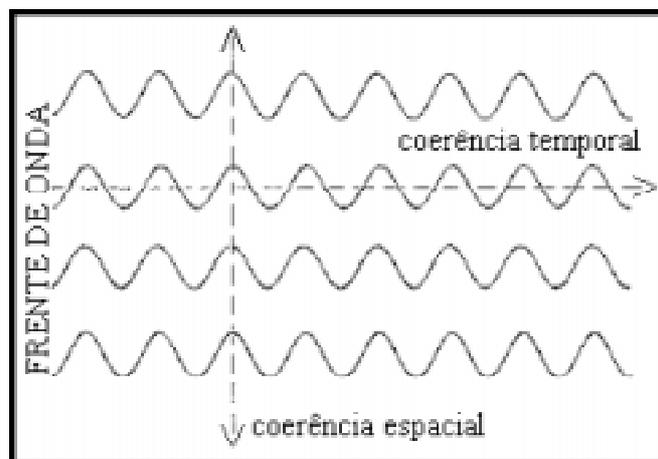


FIGURA 3.1 - Uma frente de onda coerente, ou seja, em fase temporal e espacial, assim como é a luz produzida pelo laser.

são perfeitos, em cada canhão laser a coerência máxima é limitada em certa distância.

A técnica holográfica desenvolveu-se de forma descontínua em seus primeiros anos. Dificuldades técnicas afastaram os pesquisadores. Por exemplo, um efeito colateral do processo fotográfico, necessário para o registro dos padrões de interferência, era o aparecimento de imagens duplas nos hologramas. Como o material fotográfico é sensível somente às variações de amplitude da luz incidente, a reconstrução da imagem forma, também, uma onda conjugada, que é uma imagem simétrica à original e é chamada imagem gêmea. O sistema de iluminação não axial desenvolvido por Emmett Leith e Juris Uptnieks, contornou este problema FRANÇON (1987). Eles ainda hoje estão entre os mais respeitados pesquisadores em Holografia, e seguem ensinando nos EUA.

O primeiro retrato de uma pessoa foi conseguido em 1967, graças ao laser pulsante, desenvolvido na Hughes Aircraft Corporation. Com este laser, que emite luz intermitente a intervalos de poucos milésimos de segundo, é possível produzir hologramas de objetos em movimento, antes impossível. Este passo expandiu consideravelmente as aplicações artísticas da Holografia. BENYON;WEBSTER(1985)

No centro de pesquisas da Polaroid, em 1968, o Dr. Stephen Benton inventou um processo de obtenção de hologramas visíveis sob luz não coerente. O resultado foi denominado holograma de Arco-íris, pois as imagens apresentam faixas de diferentes cores, ao se modificar o ponto de vista. Hoje a Polaroid fabrica equipamentos de reprodução de hologramas a base de polímeros fotosensíveis.

Em artigo de março de 1972, Leith e Uptnieks indicaram, entre as dificuldades da Holografia, o problema do material de registro como o mais grave, devido à baixa sensibilidade à luz associada com a acutância (resolução) necessária para o registro das finíssimas franjas de interferência geradas no processo holográfico. Usualmente a eficiência de difração de um holograma é de 0.5% a 1 % de aproveitamento da luz proveniente do feixe de reconstrução. Utilizando-se um pro-

cesso de branqueamento do filme, pode-se chegar a um aproveitamento de 20%, o limite para manter uma boa qualidade de imagem. Outra dificuldade está relacionada com características intrínsecas à qualidade da luz do laser, e que pode gerar muitos ruídos no processo de sensibilização do filme. Estes fatores negativos da Holografia fotoquímica, embora minimizados pela tecnologia, não foram plenamente resolvidos até o momento. Leith; UPATNIEKS (1972)

Combinando a técnica holográfica com um dispositivo antecessor do cinema atual, foram obtidas nos anos 70 as primeiras imagens volumétricas em movimento, obtidas pelo registro de várias seqüência de imagens 2-D em filme holográfico. A técnica passou a ser conhecida como Holografia Integral. A partir dos anos 80, os hologramas do tipo arco-íris passaram a ser produzidos em massa, num processo de transferência por relevo para lâminas de alumínio e *polyester*. Hoje aparecem em revistas, livros, adesivos, cartões de crédito e muitos outros produtos comerciais.

A Holografia é possível graças ao fenômeno da difração, que modifica o caminho das ondas luminosas, quando esta atravessa pequenos orifícios ou fendas. Também a Fotografia nasceu deste efeito ótico, embora os sistemas de refração, baseados no uso de lentes, tenham se revelado mais eficazes para o registro da intensidade da luz.

Na FIGURA 3.2 podemos ver a interferência entre ondas produzidas por dois bastões que vibram na superfície da água. As ondas eletromagnéticas reagem da mesma forma ao se encontrar, E então, por combinação construtiva ou destrutiva, se adicionam ou subtraem como podemos ver na água, onde a interferência forma áreas claras e escuras.

Difração é uma propriedade do movimento de todo tipo de ondas, e que causa uma modificação da trajetória da luz ao passar em pequeníssimas aberturas, fendas, barreiras ou superfícies especulares. A mudança será mais evi-

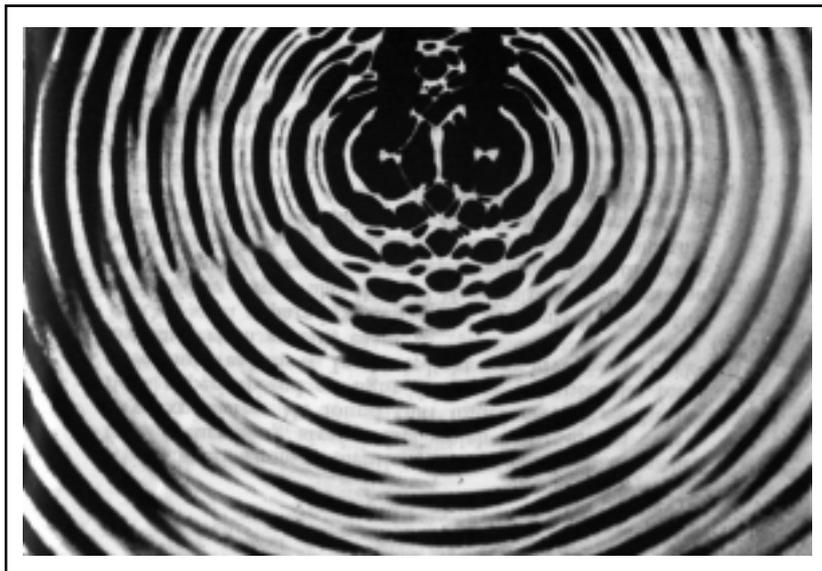


FIGURA 3.2 - Interferência de ondas planas, obtidas com a vibração de dois bastões em um tanque de água.

dente quando as dimensões da fenda forem próximas do comprimento de onda do feixe de luz incidente.

Como mostra a FIGURA 3.3 uma frente de ondas de luz ao passar por um orifício muito mais largo do que seu comprimento de onda, não sofre modificação em sua direção. Quando a largura do orifício é muito pequena, estas ondas mudam de direção, dispersando-se a partir do orifício.

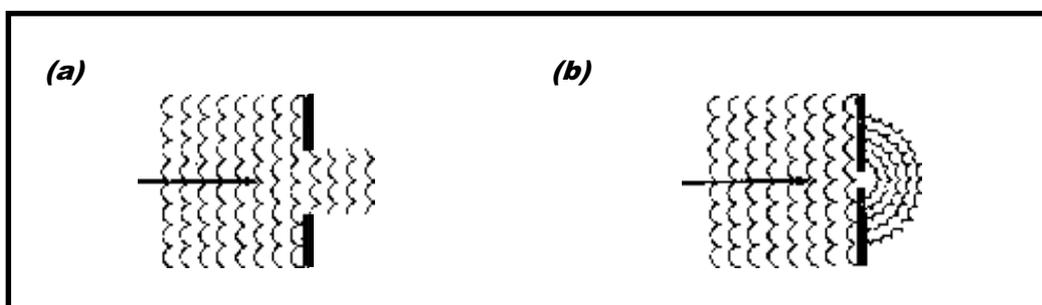


FIGURA 3.3 - Comportamento da luz ao passar por uma fenda (a) muitas vezes mais larga que seu comprimento de onda λ e (b) de largura aproximada a λ

Foi Thomas Young, em 1802, quem comprovou a teoria da luz como onda, realizando um simples experimento: ao forçar a luz a atravessar uma série de pequenas fendas, ele observou, na tela em frente, o aparecimento de linhas claras e escuras, formando um padrão, e não a simples adição da luz proveniente das fendas, como esperava. A FIGURA 3.4 representa esta experiência. Nesta época a teoria corpuscular da luz, proposta por Isaac Newton, era correntemente aceita, e explicava a reflexão e a refração da luz, por analogia com a teoria gravitacional.

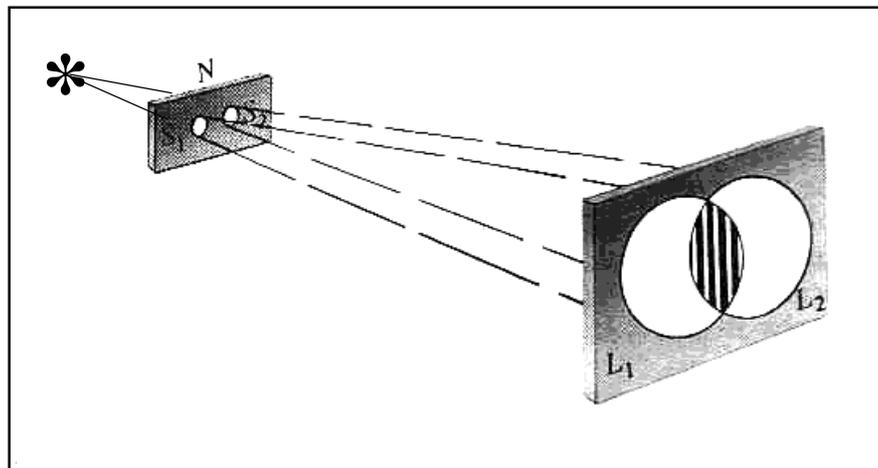


FIGURA 3.4 - Experiência de Thomas Young, que evidencia a difração da luz, e comprova seu caráter ondulatório.

As figuras observadas por Young são chamadas franjas e são causadas pela interferência entre as ondas difratadas. Essa combinação tanto pode criar uma onda de maior valor por adição, quanto anular a onda resultante. Isto é facilmente observável na FIGURA 3.5 a) em que ondas de mesma frequência, mas fora de fase, se somam, interferindo destrutiva e construtivamente, e em d) ondas de mesma frequência, mas defasadas de meio ciclo, se interferem destrutivamente, e o resultado é nulo.

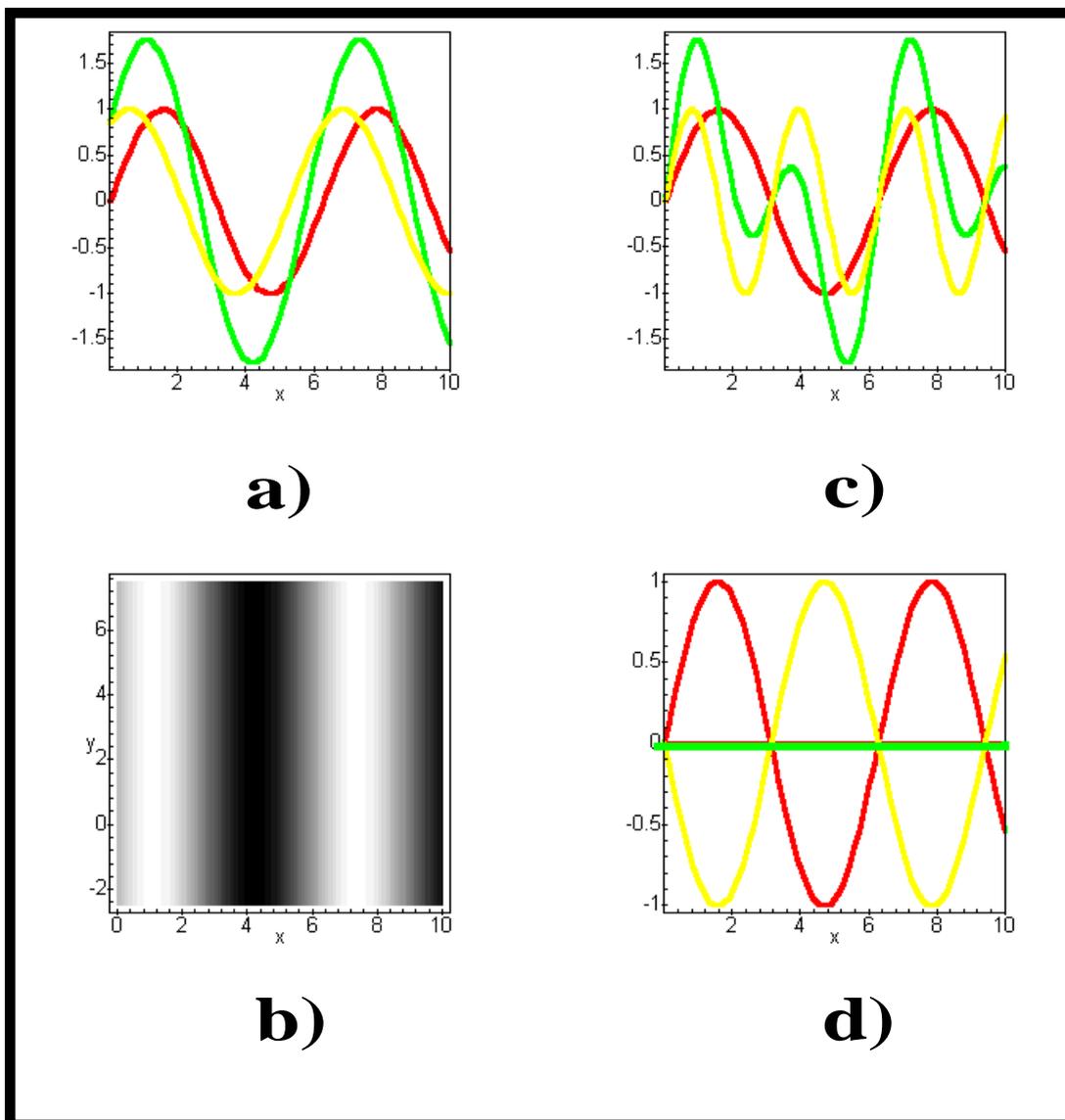


FIGURA 3.5 - Interferência construtiva e destrutiva entre ondas .
a) a curva em verde mostra o resultado da interferência de ondas de mesma frequência, mas fora de fase. No gráfico b) esse resultado foi transformada em curva de densidades. Em c) as frequências são diferentes, e o resultado em verde, é uma onda complexa, e em d) as ondas em vermelho e amarelo, têm a mesma frequência, mas a diferença de fase é de 180° (2π), e neste caso se anulam totalmente.

SEÇÃO 3.2

A TÉCNICA HOLOGRÁFICA

Um holograma é constituído por padrões de interferência entre duas (ou mais) frentes de onda coerentes registrados em material fotosensível. Além de uma fonte laser é preciso direcionar e dividir a luz, através de espelhos de superfície e filtros espaciais, dispositivos que expandem e refinam o feixe de laser. O procedimento exige que, durante o tempo de exposição, todos os elementos do sistema estejam absolutamente imóveis. Para isso, utiliza-se uma mesa anti-sísmica, isolada acústica e mecanicamente do ambiente circundante.

A imagem resultante é projetada no espaço 3-D e apresenta paralaxe integral. Ao movimentar a cabeça o observador pode ver as faces laterais, assim como o topo e o fundo, da escultura de caravela, na FIGURA 3.6. O realismo é muito grande. A imagem é monocromática, na cor do laser, ou, quando utilizado o processo de Benton, mostra as cores de todo o espectro, como se um arco-íris iluminasse a cena. O Holograma de Benton permite apenas a paralaxe horizontal, e serve de matriz para os que são impressos em lâminas de alumínio.



FIGURA 3.6 - Fotografia da imagem exibida por um holograma de transmissão.

Na FIGURA 3.7 observa-se o padrão de interferência capaz de difratar a luz, e formar a imagem tridimensional mostrada na figura anterior. Isto acontece ao ser iluminado por trás, com luz coerente, e num ângulo de incidência próximo ao do feixe de referência usado no registro. O material sensível é composto de uma emulsão à base de sais de prata ultra-finos e capaz de atingir resolução de 4.000 a 5.000 linhas/mm, fabricados em suporte de vidro (placas) ou acetatos (filmes flexíveis). Atualmente utilizam-se polímeros e outros compostos fotosensíveis em aplicações específicas.



FIGURA 3.7 - Rede de difração que constitui um holograma de transmissão.

A Holografia é possível graças à existência de fontes de luz coerente, em que os fótons avançam de forma sincronizada, em uma frente de onda, como representado na FIGURA 3.1. Embora o Sol emita feixes de luz quase paralelos, em função da grande distância do emissor, a única fonte de luz coerente conhecida é a luz do laser, conseguida ao se excitar com elétrons, átomos de alguns cristais, como por exemplo o rubi. O laser é sempre monocromático, mas vários canhões podem ser combinados numa fonte policromática.

A coincidência dos picos -valores máximos- das diversas ondas que compõem a frente de onda, indica que estas estão em fase. Ao atingir um objeto a fase de cada onda será deslocada, ou seja, atrasada em relação às outras, e elas estarão fora de fase. A Holografia é uma técnica de registro desses deslocamentos, a informação de fase, associado ao da informação da amplitude, ou seja dos valores de luz e sombra.

No processo de registro o filme é sensibilizado pela combinação dos feixes provenientes do Objeto - refletido por este - e da fonte de laser, que é chamado então, feixe de referência. A franja, ou padrão, é o produto da interação desses feixes luminosos e também o registro da localização espacial dos pontos, no

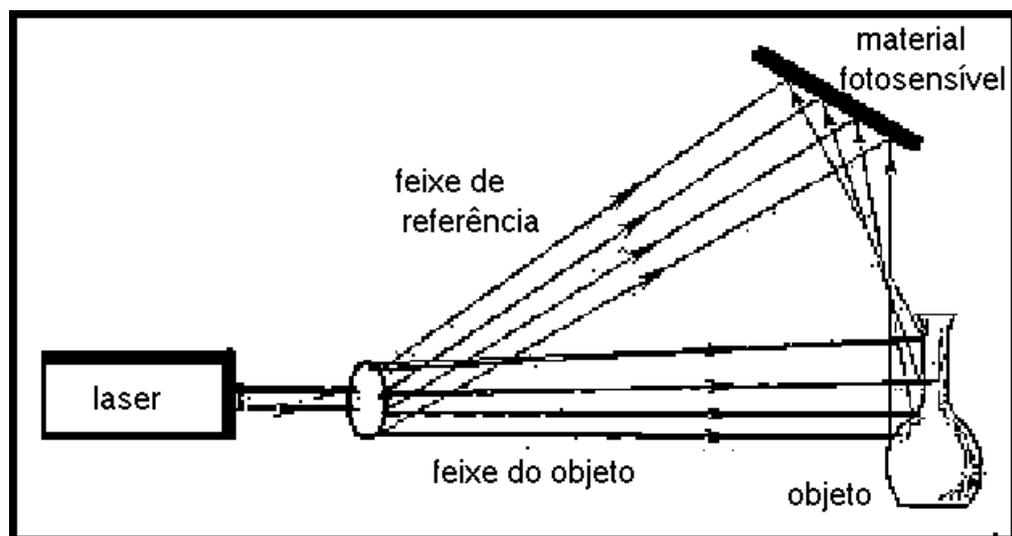


FIGURA 3.8 - Registro holográfico.

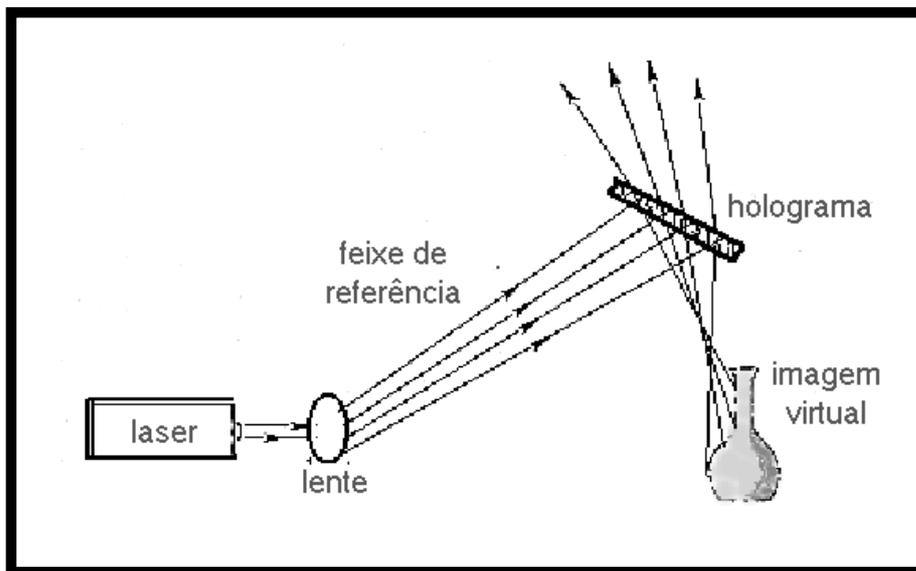


FIGURA 3.9 - Reconstrução da imagem original.

objeto, que provocaram a mudança na direção da luz, recuperando, assim sua configuração espacial, ou seja, seu volume. Isto acontece porque, ao refletir no objeto o feixe proveniente da fonte de luz coerente sofre uma deformação de fase. Ao se combinar, no filme, com a luz que vem diretamente do laser -o feixe de referência-, algumas ondas são somadas e outras se anulam, registrando a informação de fase em um padrão de luminosidades.

Para a visualização ilumina-se o filme com luz semelhante à do feixe de referência. A luz, ao atravessar o holograma, é capaz de reconstruir a imagem do objeto original, projetando-a no espaço tridimensional. A franja de interferência recupera as deformações de fase da frente de onda refletida pelo objeto, e também de suas intensidades luminosas (a informação da amplitude da onda). Vemos a imagem do objeto como se ele estivesse dentro de um espelho, motivo pelo qual esta imagem é igualmente denominada virtual.

Podemos ver nas FIGURAS 3.8 e 3.9 como se processam o registro e a reconstrução da imagem holográfica. Ao receber a luz refletida pelo objeto junto com a luz proveniente do laser, o filme registra a interferência entre as duas fontes de luz, e neste registro encontra-se a posição relativa ao plano do holograma, dos pon-

tos iluminados do objeto.

É possível modificar muitos parâmetros no processo, e utilizar várias disposições de feixes e lentes - chamado *set-up* - para iluminar o objeto. Uma possibilidade é o holograma cilíndrico, em que envolve-se o objeto com um filme flexível. Como mostra a FIGURA 3.10, com este *set-up* podemos registrar toda a superfície do objeto, conseguindo-se um alto grau de realismo. Hologramas deste tipo tornam possível a criação de réplicas holográficas idênticas aos originais. Esta técnica é também muito utilizada em associação com o processo multiplex, que permite a sensibilização de imagens distintas, em ângulos diferentes da emulsão, possibilitando pequenas animações. O multiplex, aplicada a memórias de computador, permite enorme compressão da informação.

A obtenção de imagens holográficas animadas foi também muito pesquisada a partir dos anos 70. Em abril de 1969 foi exibido na Califórnia o primeiro filme de cinema holográfico desenvolvido no Hughes Research Laboratory. Utilizando um laser emissor de pulsos de 35 bilionésimos de segundo de intervalo, o Dr. Alex

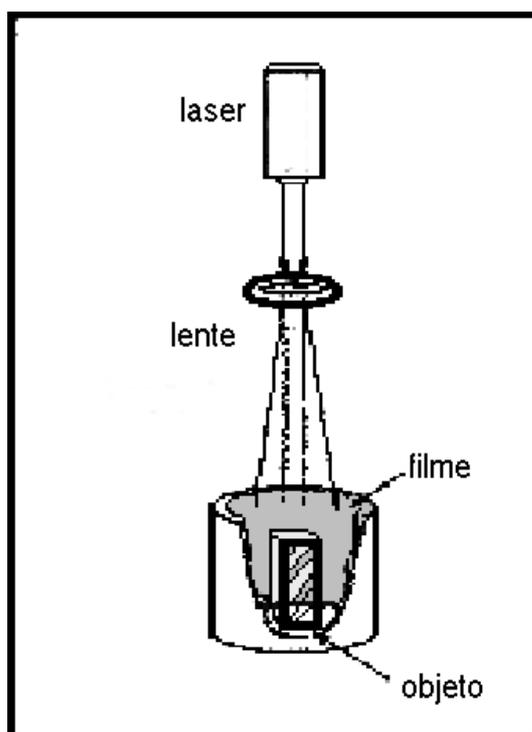


FIGURA 3.10
Holograma Integral.

Jacobson conseguiu registrar o movimento de peixes em um aquário durante 30 segundos impressionando 600 quadros em película holográfica de 70 mm. Foi utilizada uma câmera de cinema comercial, sem as lentes, e em função da baixa sensibilidade do filme, cerca de 0.02 ASA, foi usado o contraluz. SMIGIELSKI;FAGOT;ALBE(1985)

O cinema holográfico não obriga o espectador a acompanhar a câmera, e de se submeter às suas escolhas, já que a cena vista sempre dependerá das escolhas pessoais de ponto de vista, foco, e atenção. A imagem não necessita da intermediação da lente fotográfica, e, em consequência disto, podemos alcançar uma representação da realidade que independe da perspectiva e do sistema ótico de representação que nos é conhecido desde a Renascença.

Mas em um momento em que a fotografia química tende a desaparecer, substituída por câmeras digitais e impressoras *dye-sublimation*, a maior probabilidade é que as pesquisas por um *display* holográfico eletrônico em breve apresentem uma versão comercial da TV tridimensional, naturalmente em cores. Além do trabalho desenvolvido no Massachusetts Institute of Technology, alguns laboratórios japoneses também desenvolvem esta idéia, especialmente o do professor Hiroshi Yoshikawa, que tem em sua *home-page* na Internet, a descrição de alguns avanços na área.

Mas pode haver outra forma de obter imagens tridimensionais. No Brasil, mais precisamente em Campinas, está sendo desenvolvido um sistema para animação holográfica por Emerson Gonçalves da Fonseca, aluno do Mestrado em Física da Unicamp. Baseando-se em pesquisa anterior do Professor José Lunazzi, um de seus orientadores, ele procura estabelecer um sistema de holoprojeção, que acrescente sensação de profundidade a partir da inclusão de uma rede de difração especial em sistemas tradicionais de geração de imagens. FONSECA(1996)

SEÇÃO 3.3

HOLOGRAFIA DIGITAL DE SÍNTESE

A observação de um holograma sempre desperta fascinação e surpresa e convida quem olha a testar a imagem, imaterial, suspensa no ar. As imagens, fixas ou com pequeno movimento, são capazes de criar um novo espaço, de “ocupar” o ar, revelando algo antes invisível, muito diferente das emoções fugitivas causadas pelas imagens imediatas, e evanescentes produzidas pela tecnologia contemporânea. Num mundo dominado pela digitalização, a Holografia ainda é uma tecnologia visual analógica, pois a informação holográfica é informação do campo eletromagnético, e ocupa simultaneamente toda a imagem.

A Holografia é uma tecnologia muito nova, que podemos controlar ainda de forma elementar, e que avança muito mais por descobertas do que por invenções. Embora hoje os materiais sejam mais refinados, a técnica fotoquímica é a mesma de 100 anos atrás, e ainda se pesquisa muito para melhorar o processo. A introdução da Holografia no ambiente do computador é recente, e apresenta muitas dificuldades, por enquanto.

Um holograma pode também ser gerado a partir de operações matemáticas que simulam os processos de difração que ocorrem num sistema ótico convencional, como podemos ver em LOHMAN (1971). Um holograma gerado por computação -chamado *Computer Generated Hologram*, ou imagem holotrônica -,

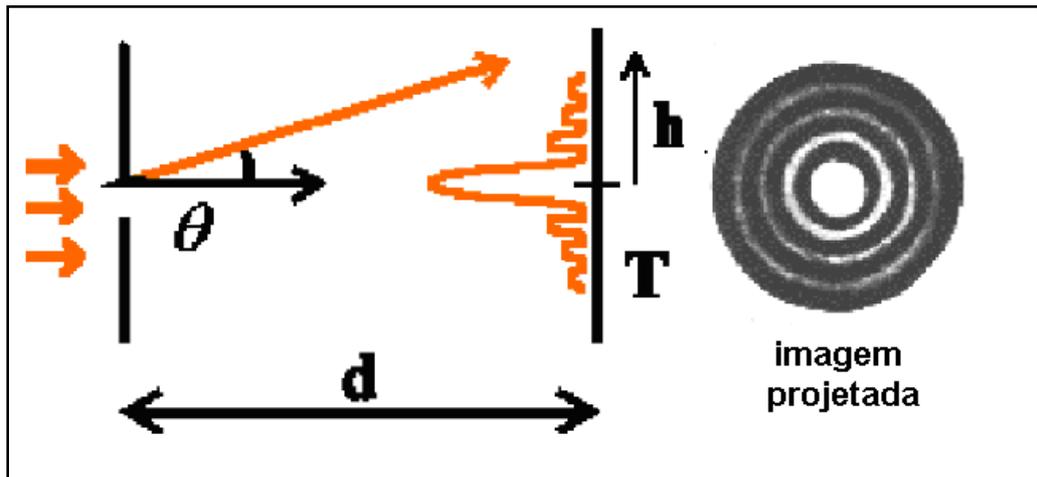


FIGURA 3.11 - Orifício simples iluminado por um feixe de luz monocromática.

é uma rede de difração obtida digitalmente, cuja configuração foi calculado de forma a produzir uma modificação desejada na trajetória da luz.

A FIGURA 3.11 mostra uma fenda iluminada por uma fonte de luz monocromática de fase constante em que a luz é projetada na tela T formando anéis concêntricos, por efeito da difração. Neste exemplo a amplitude da luz que atravessa a fenda, a curva em vermelho, é uma função de números reais, e representa a própria fenda. Mudanças de fase na luz incidente (como ao ser refletida por um objeto) determinam componentes complexas, ou seja, características descritas por números imaginários.

O ângulo de difração da luz que atravessa o orifício, está relacionado com a largura -a frequência espacial- deste orifício, descrita pela função u , e é responsável pela imagem formada na tela T, posicionada à distância d .

Podemos demonstrar que o padrão desejado no holograma pode ser calculado, ou seja que podemos simular o papel da luz, com números. Sabendo-

se que o ângulo em que a luz é difratada por uma fenda, está relacionada à frequência espacial da função que descreve a fenda pela seguinte equação:

$$\text{equação (1)}$$

onde, σ é a frequência espacial, ou seja, a largura da fenda, θ é o ângulo de difração, e λ é o comprimento de onda da luz incidente. Segundo MACGREGOR (1992), a localização da luz projetada, que é a distância r , será então, função da largura da fenda, ou seja da frequência espacial da série de orifícios que compõem a rede de difração.

Em pequenos ângulos podemos fazer uma aproximação, em que:

$$\sin \theta \approx \theta$$

e assim verificamos que

$$r = \lambda \sigma^{-1} \theta$$

, e que portanto a distância r em torno do eixo central

em que a luz atinge uma tela posicionada a uma distância L ,

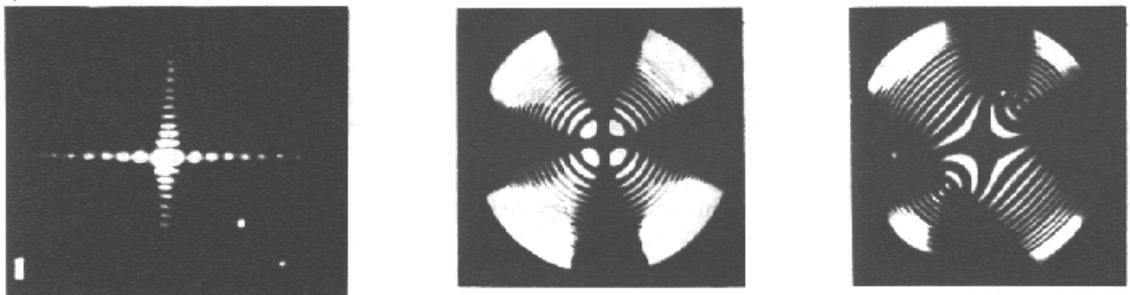


FIGURA 3.12- Padrões produzidos por difração e interferência de luz coerente.

é finalmente dada por

Podemos assim concluir que a área e a posição do orifício definem o desvio angular da trajetória da luz. É isso que permite determinarmos a nova trajetória da luz que passa através de fendas, ao definirmos suas dimensões.

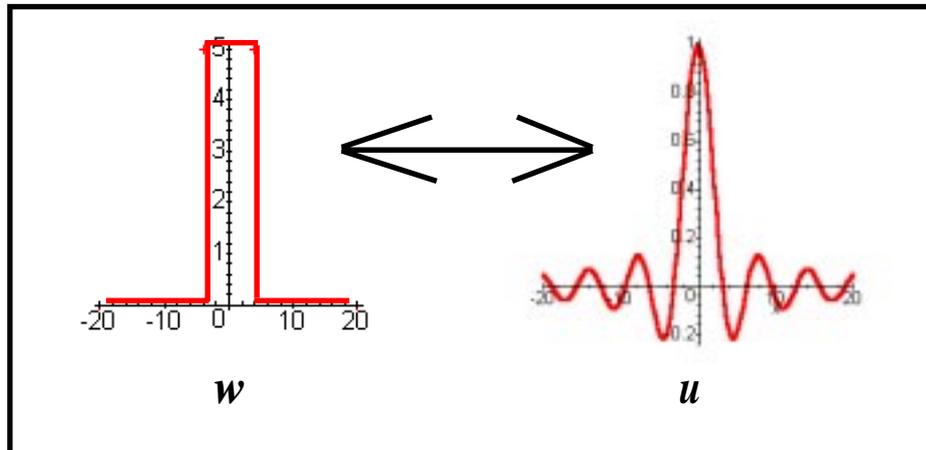


FIGURA 3.13 - Simetria da função Transformada de Fourier.

As imagens da FIGURA 3.12 foram obtidas por combinação e pela passagem da luz em diferentes redes de difração.

Vemos na FIGURA 3.13 uma fenda retangular de largura na qual podemos aplicar a análise de Fourier, tendo como resultado a função , que portanto, descreve esta fenda em termos de uma curva do tipo senoidal.

Ainda segundo MACGREGOR (1992), neste caso simples a Transformada de Fourier é realizada pela equação :

equação (2)

A Transformada de Fourier pode ser novamente aplicada à matriz resultante e assim podemos, realizando o caminho inverso, reconstruir uma fenda a partir do padrão que desejamos, calculando a Transformada de Fourier deste mesmo padrão. CÂMARA(1988)

Este é o algoritmo que permite a geração de hologramas em computadores, a partir de uma imagem armazenada como uma matriz de números complexos. O resultado representa a amplitude e a diferença de fase da luz nos pontos correspondentes da imagem original. Por isso esse padrão de interferência resultante, iluminado pelo laser, reconstrói aquela imagem.

O passo seguinte é concretizar a rede de difração que vai transformar estes números novamente em luz, ou seja imprimir o resultado numérico obtido como imagem. De início a dificuldade principal consistia em adaptar essa informação aos sistemas rudimentares de impressão da época, MACGREGOR (1992). Isso exigiu uma transposição dos valores complexos, para um tipo de codificação capaz de ser impressa. Diversos métodos foram desenvolvidos e utilizados para se obter esta codificação da rede de difração resultante, de forma a obter hologramas como os de material fotográfico.

Na Holografia fotoquímica (capaz de variações contínuas de densidade), o registro da fase pode ser realizado pela transformação das densidades

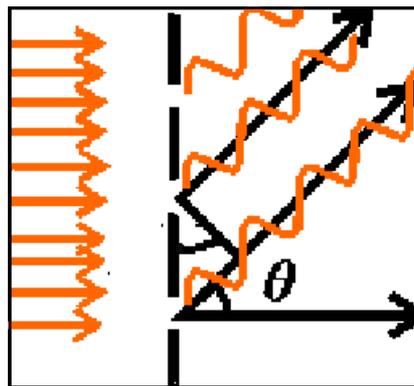


FIGURA 3.14 - Difração da luz em uma série de fendas.

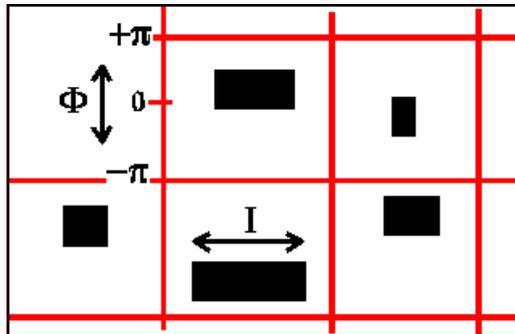


FIGURA 3.15 - Método do desvio de fase para codificação da rede de difração.

ópticas da emulsão de prata em índices de refração através do *bleaching*, ou branqueamento. Este processo reconverte a prata em sal halógeno transparente, aumentando assim as possibilidades de variação de fase do holograma. Para a produção de hologramas digitais tanto a amplitude quanto a fase devem ser controladas de forma discreta e para isso o método do desvio de fase, descrito a seguir, foi o mais utilizado tradicionalmente, na Holografia ótica.

Na FIGURA 3.14 vemos a vista lateral de uma rede de difração, iluminada por um feixe de luz coerente, e formada por áreas opacas e transparentes. A luz, ao atravessar a rede, se comportará de acordo com a configuração das dimensões e posições relativas dessas áreas. Observamos na FIGURA 3.15 como se compõem as fendas em cada célula de um *grid* de referência, em vermelho. Esta célula deve ser poucas vezes maior do que o comprimento de onda da fonte de luz utilizada na reconstrução da imagem

O ângulo da luz difratada θ é dado pela seguinte equação:

equação (3)

onde d é o espaço entre as fendas da rede. Observando-se que a diferença de fase entre as fendas vizinhas é de 2π -uma onda inteira-, verificamos que ao mudar a distância entre as fendas, dentro do intervalo igual a d mudamos a diferença, ou desvio, da fase de $+\pi$ a $-\pi$. Assim podemos efetivamente controlar, através do posicionamento vertical da fenda, a variação da fase da luz difratada pelo holograma. A amplitude da onda luminosa será evidentemente controlada pela área da fenda, nesse caso um retângulo. Assim podemos ver na FIGURA 1.15 como é possível determinar os parâmetros de difração pela codificação 1) da variação da fase Φ em mudança da posição do retângulo na localização vertical, e 2) da variação da amplitude I pela largura do retângulo, A altura se mantém constante e não interfere com a localização vertical.

Redes de difração produzidas por esse método de impressão devem ser posteriormente fotoreduzidas, afim de aumentar sua resolução. Assim é possível obter hologramas com sistemas de baixa resolução, como *plotters* e impressoras matriciais, embora com resultados incipientes em termos de luminosidade, paralaxe e resolução. Durante os anos 80 foram pesquisados inúmeros algoritmos, que refinaram o processo e conduziram a técnicas mais eficazes. Mas sempre fundamentadas na Transformada de Fourier e na simulação do encontro das frentes de onda de referência e do objeto. Por imitar o resultado dessa combinação, como aconteceria na realidade, é um processo então, baseado na interferência de ondas coerentes.

Porém o enorme volume de informação para representar características microscópicas, e a complexidade computacional associada com os processos numéricos que simulam o comportamento da luz, torna muito difícil a produção de hologramas utilizando computadores. Como um holograma típico, de 100 x 100 mm pode ter até 100.000.000.000 unidades de informação (100 Gigabits), pode-se imaginar a memória necessária para manipular tal valor. Além disso, o fato de que parte do cálculo é feito com números imaginários, restringe consideravelmente o

acesso aos hologramas calculados por métodos baseados em interferência.

Para a realização deste estudo, optamos pelo processo desenvolvido pelo Professor Mark Lucente, atualmente trabalhando nos laboratórios da IBM. A sua Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica no Massachusetts Institute of Technology, LUCENTE(1996), está disponível na Internet, Ele propõe a geração das ondas cosenoidais que formam o padrão de interferência através do método das Franjas Bipolares. Esse método implica no cálculo da rede a partir da configuração espacial do objeto, obtendo-se as franjas de interferência que provocariam a difração necessária à formação da imagem desse objeto. Esse método projeta diretamente a difração desejada, sendo, portanto um procedimento baseado nos efeitos da difração da luz.

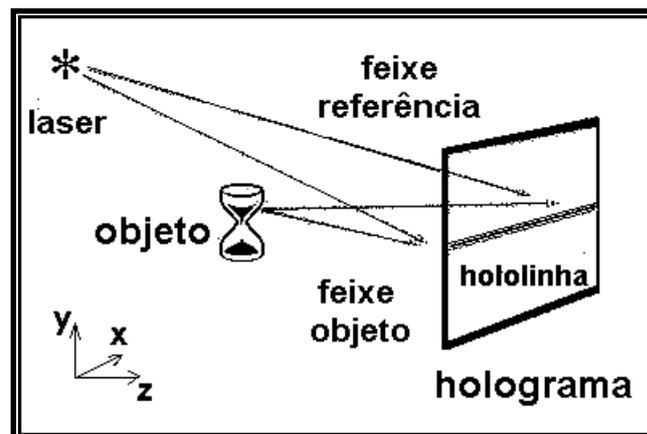


FIGURA 3.16 - Formação das hololinhas

Neste caso pode-se desprezar algumas componentes intrínsecas ao método de cálculo baseado em interferência, e que provocam distorções na imagem. Essas distorções, que ocorrem também no processo de obtenção do holograma fotoquímico, são eliminadas no método baseado em difração, aqui discutido.

A FIGURA 3.16 mostra como o holograma pode ser formado a partir das hololinhas horizontais. Cada hololinha é o padrão formado pela interferência entre as frentes de onda do laser e a que é refletida por uma determinada seção na altura - eixo y - do objeto. O holograma final permitirá a paralaxe apenas no eixo

horizontal. Hololinhas são calculadas uma a uma e o holograma é formado pela sobreposição das hololinhas, referentes a cada seção vertical do objeto.

Como demonstra o Professor Lucente em sua Tese, através de várias simplificações chega-se à seguinte expressão matemática, que permite o cálculo das hololinhas a partir das localizações, num eixo de coordenadas cartesianas, dos pontos que formam o objeto:

$$I_{B(x)} = \sum_{p=1}^N \frac{ap}{r_p(x)} \cos[krp(x) + \phi_p - \Phi_R(x)] \quad \text{equação (4)}$$

Essa fórmula, diferentemente de outros processos, não requer a manipulação de números imaginários, tornando bem mais simples sua aplicação por parte de leigos em cálculo numérico. O que foi uma razão fundamental para que fosse escolhido este método. Essa facilidade, prescindir dos números chamados imaginários, pode aproximar artistas e cientistas, e unir duas atividades aparentemente tão distantes, mas realmente tão próximas.

PARTE IV

**IMPLEMENTAÇÃO
COMPUTACIONAL**

SEÇÃO 4.1

PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

De início a equação (4) foi calculada para a geração de hololinhas com apenas um ponto, localizado a pequena distância plano do holograma. Como o ângulo entre o ponto e o feixe de referência não pode ser mais que poucos graus, localizamos o laser virtual também a uma pequena distância do ponto e do holograma. Os primeiros resultados, produzidos no software Mathematica, comprovaram que a equação gera uma curva senoidal de alta frequência, e cuja aparência modifica-se consideravelmente com a mudança dos parâmetros da fórmula. Esses parâmetros permitem modificar, além das coordenadas que localizam a fonte laser e cada ponto do objeto, a frequência de emissão desta fonte, e a amplitude luminosa desses pontos. Ainda foi preciso manipular, através do programa, a geração de curvas em várias dimensões e resoluções. Após isso efetuamos o cálculo de curvas com mais de um ponto, e localizados em várias posições no eixo Z, ou seja, na profundidade perpendicular ao plano do holograma.

Para simplificar criamos linhas retas a partir do incremento de um ponto inicial, no eixo Z e, a seguir no eixo X. Uma figura, constituída de pontos, como uma letra u deitada, foi tomada como padrão e aplicada à fórmula com bons resultados, ao menos quanto ao aspecto geral das curvas. Sabendo-se que o cálculo da hololinha é uma função do tipo cosenoidal, e que a saída gráfica do programa deveria ser adequada para a impressão em fotolito, pudemos optar por um *software* que realizasse as duas funções. A etapa matemática é muito simples, pois exige apenas aritmética e uma função trigonométrica elementar, e a saída gráfica dos programas modernos são normalmente capazes de gerar vários formatos de arquivo.

Foi escolhido o programa Mathematica para as primeiras experiências com a fórmula proposta. Este software, criado pela Wolfram Research, dos EUA., é de larga utilização em laboratórios de Física em todo o mundo, e apresenta uma interface gráfica moderna e amigável, de rápido aprendizado.

A fórmula proposta na equação (4) é o somatório da parte real da transformada de Fourier para cada ponto do objeto, Isso é simplesmente a aplicação da função coseno aos valores de fase e distâncias envolvidas, e este é o grande mérito desse método. Embora o volume de dados a manipular seja enorme, a matemática envolvida é muito simples. O termo resultante $I_B(x)$, é a curva das amplitudes que formam o padrão desejado. A componente $r_p(x)$ indica a distância oblíqua do ponto no objeto até cada ponto da hololinha, e $\Phi_{R(x)}$ é a representação da fase da onda de referência, o feixe laser.

Utilizando o software Mathematica em um PC 486, chegamos ao programa da página seguinte, que implementa o método das franjas bipolares para o cálculo de hologramas. Cada variável da fórmula está traduzida para a linguagem do programa, e estas são aplicadas às funções, ou *procedures*, que efetivam o cálculo desejado.

$$I_B(x) = \sum_{p=1}^N \frac{a_p}{r_p(x)} \cos[k r_p(x) + \phi_p - \Phi_{R(x)}] \quad \text{e q u a ç ã o (4)}$$

$$r_p(x) = \sqrt{(x - x_p)^2 + (z_p^2)} \quad \text{e q u a ç ã o (4 . 1)}$$

$$\Phi_{R(x)} = \sqrt{(k((x - x_r)^2 + (z_r^2)))} \quad \text{e q u a ç ã o (4 . 2)}$$

```

ap=2                (*amplitude da luz no pontoObj*)
k=7.1726            (*constante espacial*)
zr=100              (*posicao em z do spotRef*)
xr=.8               (*posicao em x do spotRef*)
zp=8                (*posicao em z do pontoObj*)
xp=2.8              (*posicao em x do pontoObj*)
fp=Random[1]        (*fase randomizada do pontoObj*)
rp[x_]:= (x-xp)^2+(zp^2)^0.5 (*distância obliqua xp-holinha*)
Fr[x_]:= (k((x-xr)^2+(zr^2)))^0.5 (*fase do spotRef*)
Plot[(ap/rp[x])*Cos[k*rp[x]+fp-Fr[x]],{x,0,9}] (*curva resultante)

```

Neste programa definimos inicialmente a frequência de emissão do laser que será utilizado na reconstrução da imagem, especificando sua largura da onda, em centímetros. Este será certamente um laser He-Ne, o tipo mais comum, e disponível no Departamento de Física, A variável `kr` indica a largura da onda deste laser, e portanto, assume o valor de: 6328×10^8 centímetros. A variável `ap` define a intensidade luminosa do ponto, e pode ser usada para criar áreas de diferentes luminosidades na imagem, porém nestas primeiras experiências decidimos fixar este valor em 1. O valor numérico da fase da luz refletida no ponto é descrito por `fp`, e pode ser randomizado, ou seja, pode assumir valores aleatórios, como recomendou o Professor Lucente, em comunicação pessoal, via e-mail.

Faz parte da fórmula uma constante universal, indicada por `k`, necessária nas equações que tratam do assunto. Na linguagem do Mathematica podemos definir relações entre variáveis antes de definir seus valores, e então descrevemos com `rp` e `Fr` as *procedures*, ou operações, a serem submetidas as variá-

veis, para obtermos, respectivamente, a distância entre a superfície do holograma (a hololinha) e o ponto, , e o valor de fase do feixe-referência .

A seguir devemos localizar este laser, emissor do feixe-referência, definindo um ponto no espaço, que deve formar um pequeno ângulo, com os pontos que compõem o objeto. Com a profundidade em Z, indicada por z_r e a posição em X, por x_r , definimos a posição do laser e, analogamente com x_p e z_p , a posição de cada ponto do objeto.. A equação final, que produz a curva cosenoidal, é calculada pela *procedure lb* e tracejada pelo comando *plot*. Neste comando definimos a resolução desejada, além do intervalo de construção do gráfico.

Na FIGURA 4.1 vemos o resultado deste primeiro programa. Muitas alternativas a estes valores foram calculadas afim de determinarmos o peso de cada variável no gráfico final. Este resultado, de qualquer forma é para apenas uma hololinha. Da altura deste curva, depois de transformada em densidades, como a que mostra a FIGURA 4.2, dependerá a resolução vertical do holograma final. Ou seja, quanto mais finas e numerosas, melhor será a definição da imagem. Porém encontramos dificuldades exatamente ao tentarmos calcular uma série hololinhas finas, pois isto revelou-se um processamento realmente pesado.

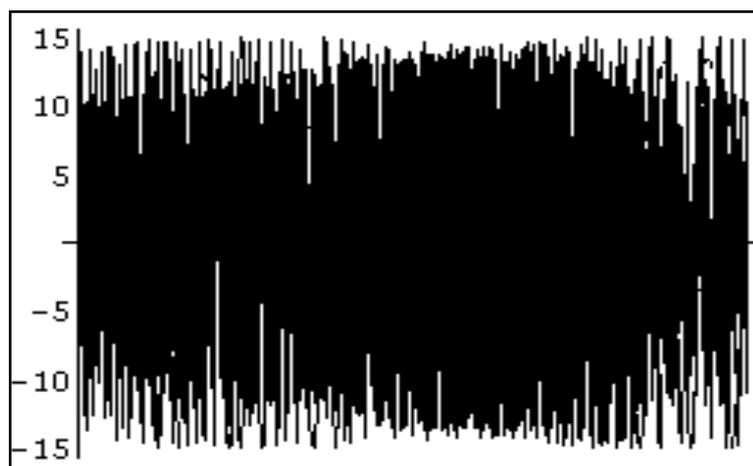


FIGURA 4.1 - Curva senoidal de alta frequência, resultado do cálculo de $IB(x)$.

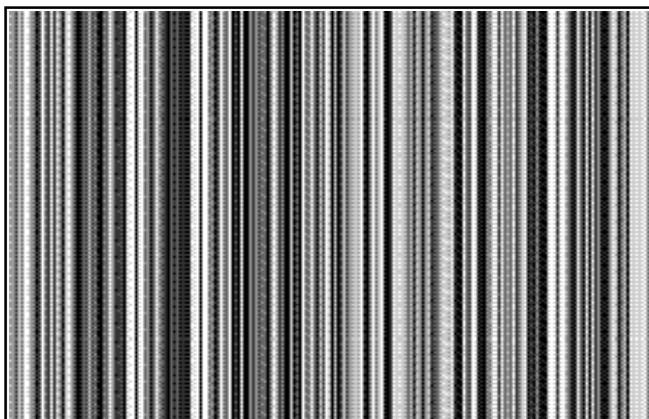


FIGURA 4.2 - Gráfico de densidades produzido pela curva de $IB(x)$.

Na FIGURA 4.3, podemos ver uma aproximação das curvas cosenoidais que descrevem as intensidades luminosas. Estas curvas devem ter comprimentos de onda em torno de 10 microns (0.01 mm) quando impressas na escala correta.

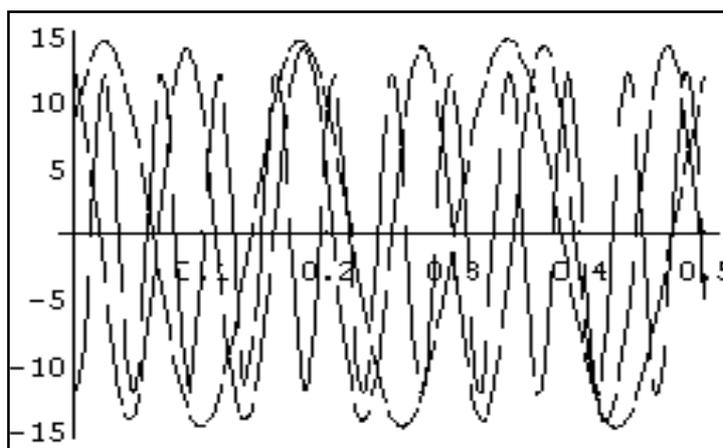


FIGURA 4.2 - Ampliação da curva na FIGURA 4.1.

Para proceder ao cálculo com maior resolução, tornou-se necessário utilizar processadores mais potentes, como os do Laboratório de Cálculo Científico do Departamento de Física, os quais estão equipados com o *software* Maple, de origem canadense. A interface para Windows 95 é bastante funcional e graficamente poderosa. O Maple é muito semelhante ao Mathematica, porém permite a utilização direta de seu Kernel, que é a unidade de cálculo, situação que possibilita ao programa dispor de mais memória, tornando-se mais rápido. Neste caso acessamos o Kernel diretamente pelo sistema operacional, seja DOS ou UNIX.

O seguinte programa foi desenvolvido na linguagem do Maple para produzir uma rede de difração que capaz de projetar dez pontos alinhados, em cada hololinha:

```

> lambda := 6328*10^(-8):
> ap := 1:
> fp := rand(1):
> k:=2*Pi/lambda:
> rp :=proc(x, xp, zp) ((x-xp)^2+zp^2)^.5 end:
> Fr :=proc(x, xp) k*((x-xr)^2+zr^2)^.5 end:
> lb :=proc(x, xp, zp) ap/rp(x, xp, zp)*cos(k*rp(x, xp, zp)+fp-Fr(x, xp)) end:
> zr :=10: xr :=2:
> xp:=0.5: zp:=4:
> q:=array(1..10, 1..2):
> for s from 1 to 10 do
    q[s, 1]:=xp+s/10:
    q[s, 2]:=zp+(1/s^2):
  od:
> j:='j': HL:=sum(lb(x, q[j, 1], q[j, 2]), j=1..10):
> plot(HL, x=0..3, numpoints=3000);

```

A FIGURA 4.4 mostra o conjunto de pontos, obtidos a partir do incremento exponencial de x_p e z_p , cuja localização inicial será de 8 cm no eixo Z, considerando-se a superfície do holograma como origem. No eixo horizontal o valor 2.8 cm determina sua posição ligeiramente à direita do eixo mediano da hololinha, e que formam o *array q*. Os pontos formam uma meia parábola na horizontal e esta é a forma que esperamos visualizar no holograma.

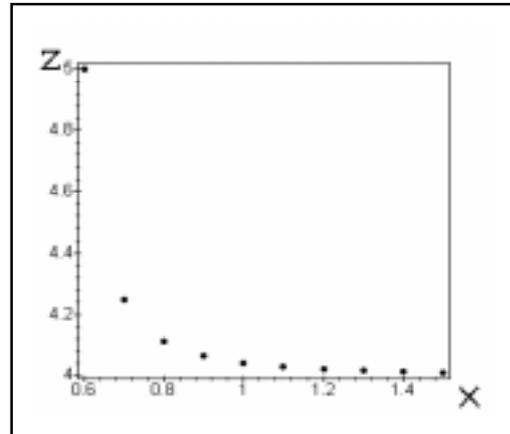


FIGURA 4.4

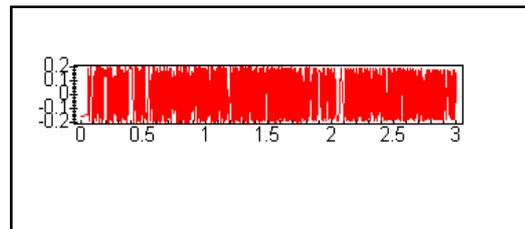


FIGURA 4.5

Na FIGURA 4.5 temos a curva resultante do processamento de .

Para refinar o cálculo resolvemos implementar a equação utilizando a linguagem Fortran, que permite muito melhor aproveitamento do processador. Para contar com máquinas ainda mais poderosas abrimos uma conta de pesquisa no Centro de Supercomputação da UFRGS, onde há uma máquina Cray X-MP. Foi desenvolvido um programa em Fortran, que deveria produzir o mesmo resultado obtido no Maple, mas surpreendentemente, isto não aconteceu. Considerando que a disparidade ao subprograma de geração de números aleatórios do Fortran, retornamos ao Maple, pensando em conseguir as hololinhas que fossem possíveis, ainda que comprometendo a resolução vertical.

Finalmente, após o cálculo das intensidades bipolares, devemos transformar esta curva em um gráfico que traduza estes valores em densidades, que então serão impressas pela *imagesetter*. Para isto utilizamos o comando *densityplot* do Maple. A seguir, na FIGURA 4.6 vemos o resultado desta operação, ainda sem a resolução necessária, mas em que podemos observar como se processa a formação das franjas de interferência.



FIGURA 4.6 - Curva de amplitudes, calculada por e impressa como densidades.

Antes de imprimir os hologramas, e por sugestão do Professor Lucente, em comunicação via Internet, decidimos experimentar a capacidade de resolução da impressora de fotolitos. Esta é uma *imagesetter* fabricada pela empresa Lynotype-Hell, modelo Ultrares 3000, e que utiliza um laser de 780 nm, radiação próxima do infra-vermelho. Para isso criamos curvas senoidais e quadráticas, programadas no Maple, e arquivadas em linguagem PostScript. A linguagem PostScript foi escolhida para o arquivamento, por ser a de uso mais geral em aplicações gráficas, e conseguimos a colaboração de uma empresa comercial de preparação de fotolitos, a UPLINE, para concretizar os hologramas.

A seguir mostramos um programa que produz ondas quadráticas e pode ser aplicado para geração de redes de difração de diversas frequências.

```
A:=array(1..1000,1..2);for s from 1 to 1000 do
```

```
  A[s,1]:=s : if s mod 4=0 or s mod 4=1 then
```

```
    A[s,2]:=5 else A[s,2]:=-5
```

```
fi: od:
```

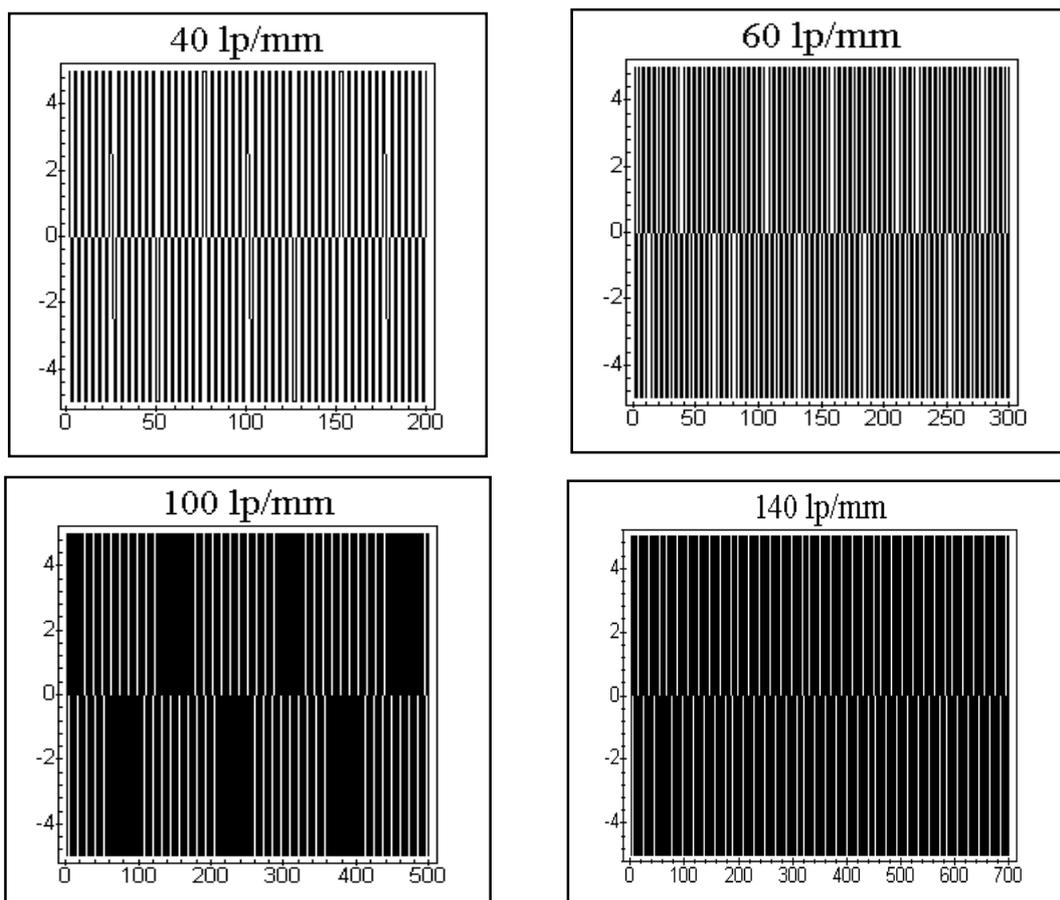


FIGURA 4.7 - Redes de baixa resolução, impressas nesse documento apenas como ilustração das diferenças no comprimento de onda entre redes.

Os gráficos da FIGURA 4.7 mostram redes com frequências possíveis de serem impressas nestas páginas, mas que evidentemente não provocariam difração em ondas visíveis. Uma rede impressa em fotolito pode ser vista na FIGURA 4.8.

Este fotolito comprovou ser uma rede de difração, ao ser atravessado pela luz do laser. Redes de difração embora não contenham imagens, são um interessante produto dessa pesquisa. Normalmente são produzidas em interferômetros, e utilizadas em muitas experiências de Física e Química. Por exemplo, servem para determinarmos facilmente a composição espectral de qualquer fonte luminosa, pois separa a luz em faixas, chamadas linhas de Frunhofer, evidenciando apenas as componentes próprias de cada substância, ao gerar luz. São utilizadas na análise espectral de compostos químicos, e em cristalografia.

Podemos encontrar o mesmo efeito em asas de borboleta, peixes e outras superfícies naturais, e nas superfícies metálicas finamente arranhadas, assim como em discos de audio, LPs e CDs. As primeiras redes de difração foram produzidas por Joseph von Fraunhofer (1787-1826), na Alemanha. No final do século passado, o norte americano Henry Rowland conseguiu redes com cerca de 8.000 linhas por cm, e atualmente podem ser produzidas redes com até 50.000 linhas por cm.



FIGURA 4.8 - Rede de difração produzida na imagesetter ULTRE 4000.

Uma vez confirmada a capacidade de impressão do sistema, passamos a produzir hololinhas e testa-las com a luz do laser. Experimentamos vários programas, como o que vem a seguir:

Constantes:

```
> lambda := 6328*10^(-8):
```

```
> ap := 1:
```

```
> fp := rand(1):
```

```
> k:=2*Pi/lambda:
```

Feixe Referência:

```
> zr := 10;xr := 5;xp:= 1;zp:= 10;
```

Funções:

```
> rp :=proc(x,xp,zp) ((x-xp)^2+zp^2)^.5 end:
```

```
> Fr :=proc(x,xp,zp) k*((x-xr)^2+zr^2)^.5 end:
```

```
> IB :=proc(x,xp,zp) ap/rp(x,xp,zp)*cos(k*rp(x,xp,zp)+fp-Fr(x,xp,zp)) end:
```

Definição dos pontos [xp,zp]

```
> q:=array(1..11,1..2):
```

```
> for s from 1 to 3 do
```

```
>   q[s,1]:=xp+s*0.25:
```

```
>   q[s,2]:=zp
```

```
> od:
```

```
> for s from 4 to 7 do
```

```
>   q[s,1]:=0.5:
```

```
>   q[s,2]:=zp+(s-4)*0.25
```

```
> od:
```

```
> for s from 8 to 11 do
```

```
>   q[s,1]:=2:
```

```
>   q[s,2]:=zp+(s-8)*0.25
```

```
> od:
> plot(q,x=0..3);
> zp:=9:
> p:=array(1..11,1..2):
> for s from 1 to 3 do
>   p[s,1]:=xp+s*0.05:
>   p[s,2]:=zp
> od:
> for s from 4 to 7 do
>   p[s,1]:=0.5:
>   p[s,2]:=zp+(s-4)*0.25
> od:
> for s from 8 to 11 do
>   p[s,1]:=1.2:
>   p[s,2]:=zp+(s-8)*0.25
> od:
> plot(p,x=0..3);
> zp:=11
> w:=array(1..11,1..2):
> for s from 1 to 3 do
>   w[s,1]:=xp+s*0.25:
>   w[s,2]:=zp
> od:
> for s from 4 to 7 do
>   w[s,1]:=0.5:
>   w[s,2]:=zp+(s-4)*0.25
> od:
> for s from 8 to 11 do
```

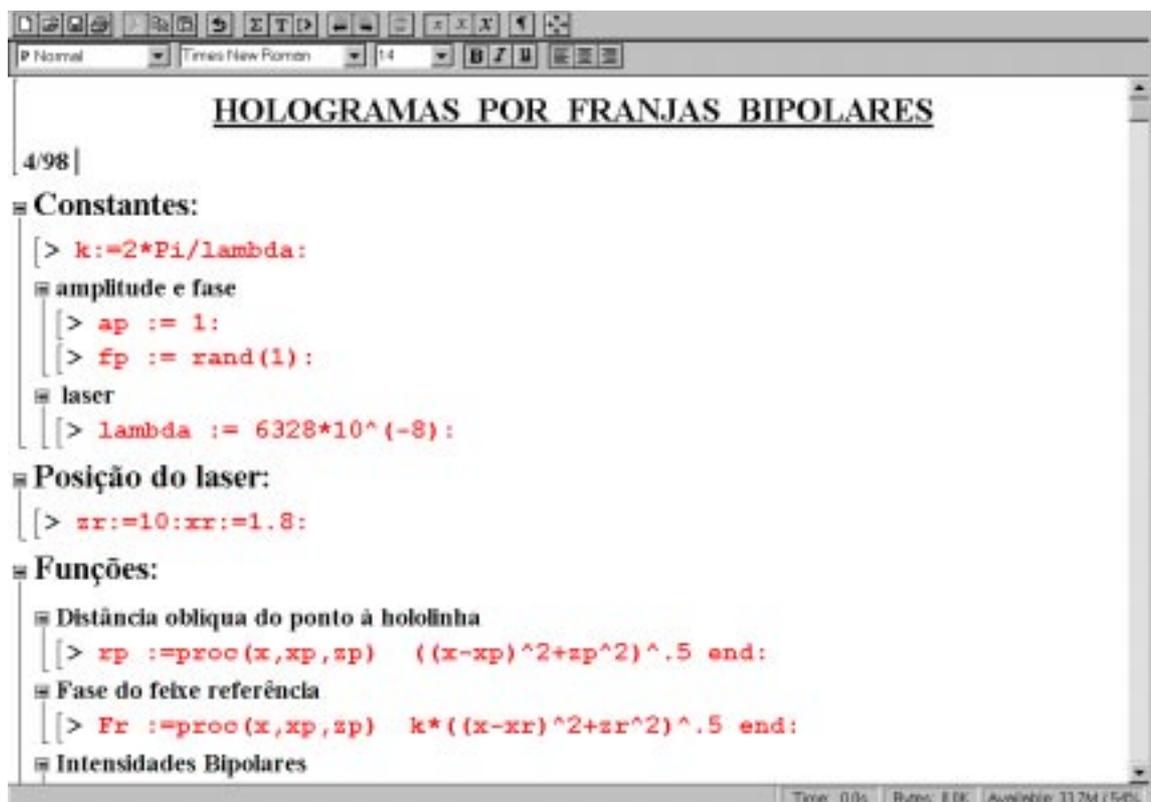
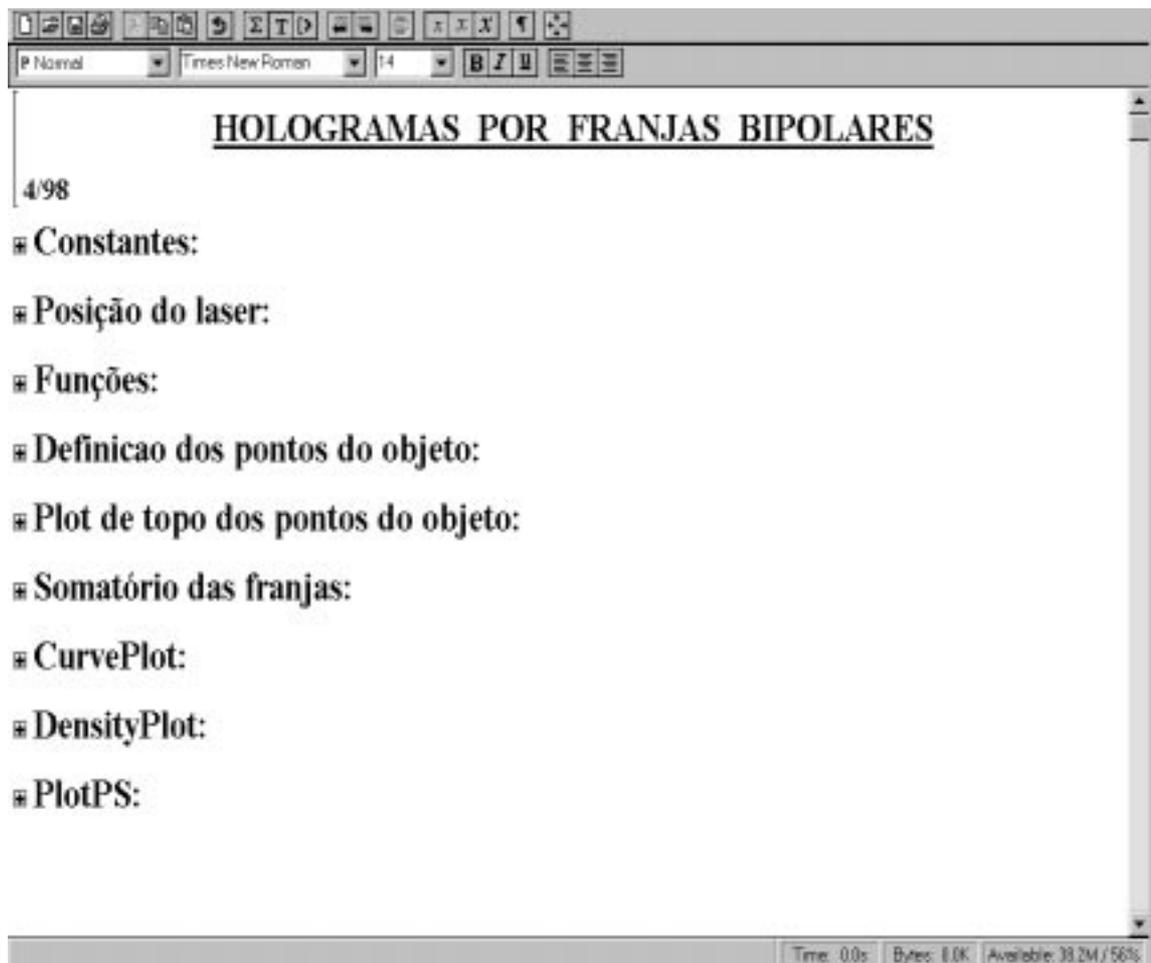
```

> w[s,1]:=2:
> w[s,2]:=zp+(s-8)*0.25
> od:
> plot(w,x=0..3);
Somatório dos pontos-objetos
> i:='i':
> HL1:=densityplot(sumIB(x,q[i,1],q[i,2]),i=1..11),x=0..3,IB=0..0.2))
> HL2:=densityplot(sumIB(x,p[i,1],p[i,2]),i=1..11),x=0..3,IB=0..0.2)):
> HL3:=densityplot(sum(IB(x,w[i,1],w[i,2]),i=1..11),x=0..3,IB=0..0.2)):
> display(HL1,HL2,HL3);

```

Este programa produz 3 hololinhas com diferentes pontos em cada linha, formando uma figura assimétrica, verticalmente. Para a geração dessas imagens formadas por pontos, é interessante trabalhar com *softwares* que criam figuras sólidas e sombreadas, e que permitam a extração dos dados de construção desses sólidos. Exemplos disso são o PolyRay e o PovRay, conhecidos programas de *ray-tracing*. Mas tanto o Mathematica quanto o Maple apresentam também esta facilidade, embora sem a sofisticação do sombreadamento, o que torna possível integrar todo o processo em um só software.

Assim criamos um *notebook*, como é chamado um sub-programa dentro da linguagem do Maple, que possa fornecer uma interface simples e prática para a geração de hologramas no computador, ou seja, de imagens holotrônicas. No Maple *for windows* um *notebook* se divide em seções e subseções, que são acessadas independentemente, realizando tarefas distintas, mas interconectadas. Podemos abrir a seção que define a posição do laser, e alterar somente isso por exemplo. A seguir mostro um primeiro estudo de *notebook*, primeiro fechado e depois com as seções abertas.



HOLOGRAMAS POR FRANJAS BIPOLARES

4/98

Constantes:

$$k := 2 * \pi / \lambda :$$

amplitude e fase

$$a_p := 1 :$$

$$f_p := \text{rand}(1) :$$

laser

$$\lambda := 6328 * 10^{-8} :$$

Posição do laser:

$$z_r := 10 : x_r := 1.8 :$$

Funções:

Distância oblíqua do ponto à hololinha

$$r_p := \text{proc}(x, x_p, z_p) \quad ((x - x_p)^2 + z_p^2)^{.5} \text{ end} :$$

Fase do feixe referência

$$F_r := \text{proc}(x, x_p, z_p) \quad k * ((x - x_r)^2 + z_r^2)^{.5} \text{ end} :$$

Intensidades Bipolares

$$I_B := \text{proc}(x, x_p, z_p) \quad a_p / r_p(x, x_p, z_p) * \cos(k * r_p(x, x_p, z_p) + f_p - F_r(x, x_p, z_p))$$

end:

Definicao dos pontos do objeto:

$$x_p := 0.5 : z_p := 2 :$$

$$D1 := \text{array}(1..11, 1..2) :$$

for s from 1 to 3 do

$$D1[s, 1] := x_p + s * 0.25 :$$

$$D1[s, 2] := z_p$$

od:

for s from 4 to 7 do

$$D1[s, 1] := 0.5 :$$

```

    D1[s,2]:=zp+(s-4)*0.25
od:
for s from 8 to 11 do
    D1[s,1]:=1.5:
    D1[s,2]:=zp+(s-8)*0.25
od:
zp:=3:
D2:=array(1..11,1..2):
for s from 1 to 3 do
    D2[s,1]:=xp+s*0.05:
    D2[s,2]:=zp
od:
for s from 4 to 7 do
    D2[s,1]:=0.5:
    D2[s,2]:=zp+(s-4)*0.25
od:
for s from 8 to 11 do
    D2[s,1]:=0.7:
    D2[s,2]:=zp+(s-8)*0.25
od:
zp:=2.5:
D3:=array(1..11,1..2):
for s from 1 to 3 do
    D3[s,1]:=xp+s*0.25:
    D3[s,2]:=zp
od:
for s from 4 to 7 do
    D3[s,1]:=0.5:

```

```
D3[s,2]:=zp+(s-4)*0.25
```

```
od:
```

```
for s from 8 to 11 do
```

```
  D3[s,1]:=1.2:
```

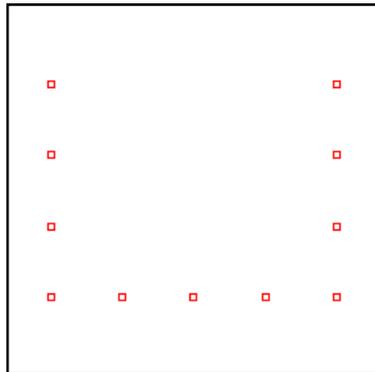
```
  D3[s,2]:=zp+(s-8)*0.25
```

```
od:
```

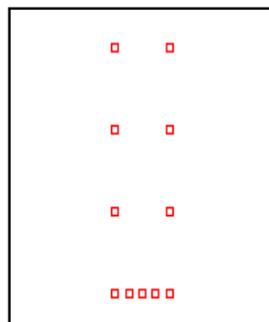
Vista de topo dos pontos do objeto:

```
with(plots):
```

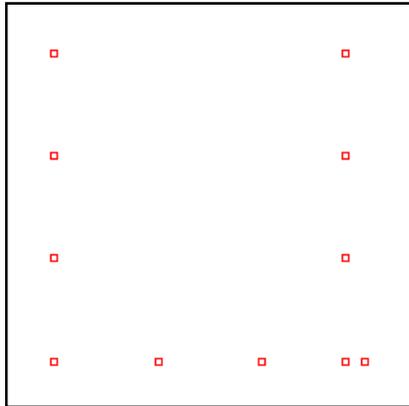
```
listplot(D1,style=POINT,color=red,scaling=CONSTRAINED);
```



```
listplot(D2,style=POINT,color=red,scaling=CONSTRAINED);
```



```
listplot(D3,style=POINT,color=red,scaling=CONSTRAINED);
```



Somatório das franjas:

```
i:=1:
```

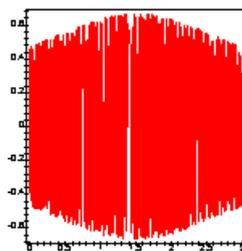
```
HL1:=sum(IB(x,D1[i,1],D1[i,2]),i=1..11):
```

```
HL2:=sum(IB(x,D2[i,1],D2[i,2]),i=1..11):
```

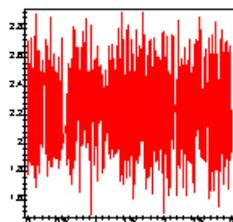
```
HL3:=sum(IB(x,D3[i,1],D3[i,2]),i=1..11):
```

CurvePlot:

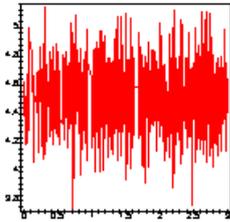
```
plot(HL1,x=0..3,axes=BOXED);
```



```
plot(HL2,x=0..3,axes=BOXED);
```



```
plot(HL3,x=0..3,axes=BOXED);
```



DensityPlot:

```
D1:=densityplot(HL1,x=0..3,lb=0.01..0.02,grid=[30,2],scaling=CONSTRAIN  
ED,style=PATCHNOGRID);
```

```
D2:=densityplot(HL2,x=0..3,lb=0.03..0.04,grid=[50,2],scaling=CONSTRAIN  
ED,style=PATCHNOGRID);
```

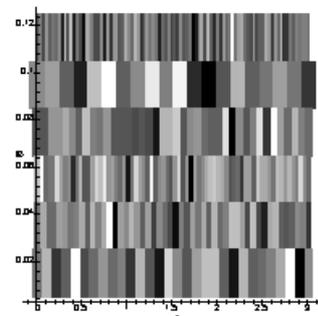
```
D3:=densityplot(HL3,x=0..3,lb=0.05..0.06,grid=[70,2],scaling=CONSTRAIN  
ED,style=PATCHNOGRID):display(D3);
```

```
D4:=densityplot(HL1,x=0..3,lb=0.07..0.08,grid=[40,2],scaling=CONSTRAIN  
ED,style=PATCHNOGRID):display(D4);
```

```
D5:=densityplot(HL2,x=0..3,lb=0.09..0.1,grid=[20,2],scaling=CONSTRAIN  
ED,style=PATCHNOGRID):display(D5);
```

```
D6:=densityplot(HL1,x=0..3,lb=0.11..0.12,grid=[90,2],scaling=CONSTRAIN  
ED,style=PATCHNOGRID):display(D6);
```

```
display(D1,D2,D3,D4,D5,D6);
```



PlotPS:

```
plotsetup(ps,plotoutput=`DHtest.ps`);
```

```
display(D1,D2,D3,D4,D5,D6);
```

SEÇÃO 4.2

PROGRAMAÇÃO GRÁFICA

A partir do gráfico produzido em formato PostScript, foi possível introduzir elementos de controle da saída gráfica tanto para a redução do tamanho das figuras, como para modificar o parâmetro espessura de linha, de modo a garantir o máximo de precisão no desenho das curvas. Em PostScript qualquer desenho, inclusive de letras, é criado através de instruções da linguagem PostScript, que determinam basicamente a movimentação e o preenchimento de áreas na página, permitindo o controle gráfico total da impressão. Essas instruções constituem um arquivo texto, passível de edição em qualquer editor comum.

É uma linguagem de descrição de página de alto-nível, e portanto trabalha com a manipulação de objetos gráficos abstratos em lugar de descrições limitadas a dispositivos ou programas. É curioso que a filosofia que desenvolveu esta linguagem mostra elementos que tem muito em comum com nossa pesquisa, como evidencia David Holzgang, quando afirma:

“PostScript parece nos retornar ao tempo do trabalho profissional e artístico, quando a criação de uma página de saída não era uma operação mecânica executada por prensas de alta velocidade, mas uma interação entre a mão e a mente humanas e a saída física. PostScript tem muito mais em comum com letras e caligrafia do que com prensas off-set e máquinas de escrever.” HOLZGANG(1990)

A seguir vemos um trecho do arquivo PostScript que descreve uma holineha, na resolução esperada. Em PostScript cada linha pode ser uma instrução, e neste caso, a alta densidade gerou mais de 3000 linhas de código, para apenas uma holineha. Reproduzo aqui apenas o cabeçalho do exemplo, um arquivo texto de 5 Mbytes.

```

%!PS-Adobe-3.0 EPSF
%%Title: DH2
%%Creator: MapleV
%%Pages: 1
%%BoundingBox: 0 0 288 288
%%DocumentNeededResources: font Courier
%%EndComments
20 dict begin
gsave
/m {moveto} def
/l {lineto} def
/C {setrgbcolor} def
/G {setgray} def
/S {stroke} def
/NP {newpath} def
%%%This draws a filled polygon and avoids bugs/features
%%% of some postscript interpreters
%%%GHOSTSCRIPT: has a bug in reversepath - removing
%%%the call to reversepath is a sufficient work around
/P {gsave fill grestore reversepath stroke} def
%%%This function is needed for drawing text
/stringbbox {gsave NP 0 0 m false charpath flattenpath
  pathbbox 4 2 roll pop pop 1.1 mul cvi exch 1.1 mul
  cvi exch grestore} def
/thin 3 def
/medium 7 def
/thick 16 def
/boundarythick 20 def %% thickness of bounding box
%%IncludeResource: font Courier
52 36 translate
%90 rotate
0.0432 0.0432 scale
1 setlinejoin
1 setlinecap
0.0 setgray
/inch {72 mul} def
/fheight 0.35 inch neg def
  0 G
0.0 setlinewidth
[] 0 setdash [] 0 setdash 0.113725 G
NP
4421 2499 m
4420 4421 1
4421 4421 1
4421 2499 1
P
NP
4421 2499 m
4420 2499 1
4420 4421 1
4421 2499 1
P
0.882353 G
NP
4420 2499 m
4419 4421 1
4420 4421 1

```

Dentre estes parâmetros, modificamos o que determina o tamanho final do objeto gráfico, para que o traçado das curvas correspondessem as dimensões físicas utilizadas durante o cálculo. Esta definição é dada pelo operador PostScript *scale*, que aplica aos eixos X e Y, respectivamente, a multiplicação pelo valor ali determinado. Desta forma podemos ajustar o tamanho do gráfico que será impresso e obter com precisão a resolução espacial desejada. A espessura da linha a ser desenhada foi modificada através do operador *setlinewidth*, que, assumindo o valor zero, força a impressora a utilizar o traço mais fino possível, limitado por *hardware*. Foi necessário ainda relocalizar a origem do gráfico para que coubesse na página impressa com maior economia, utilizando-se para isso o operador *translate*.

Após estas modificações, o arquivo estará pronto para ser processado pela *imagesetter* ULTRARES 3000. Esta impressora de fotolitos requer um *software* acoplado, do tipo RIP, ou *Raster Image Processor*. Neste caso foi utilizado o aplicativo ScriptWorks for Windows, da empresa norte-americana The Harlequin Group Limited. Rodando em um microcomputador Pentium 300 MHz, comanda a impressora *imagesetter*, e permite definir a resolução de impressão, o tipo de retícula, e alguns

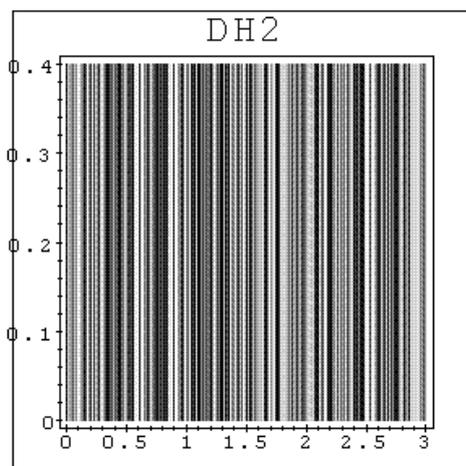


FIGura 4.9 - Hololinha expandida no eixo vertical.

outros parâmetros menos relevantes. Como o uso de retícula é obrigatório neste equipamento, optamos pelo tipo elipsoidal, e, embora o ideal fosse testar as várias opções do programa, a escolha revelou-se adequada, em primeira instância.

As primeiras tentativas não chegaram a produzir resultados consistentes. As relações de escala não foram bem definidas e as linhas eram impressas sobrepostas, ou muito distantes umas das outras. Este é a maior dificuldade quanto ao ajuste da impressão, porque, obviamente, a precisão deve ser absoluta. As hololinhas precisam ter, uma vez impressas, exatamente as mesmas dimensões calculadas, ou não serão vistos os pontos projetados. Na FIGURA 4.9 vemos uma hololinha que tem a largura projetada para 30 mm. Abaixo vemos a mesma hololinha ampliada cerca de 15 vezes.

Muitos gráficos foram calculados e impressos, mas poucos revelaram suficiente resolução para provocar uma difração eficaz, como era esperado. Foram conseguidas redes que possuíam pouco mais de 200 linhas por milímetro. Isso representa talvez 10% do mínimo necessário para se obter imagens tridimensionais. Mas acreditamos que em pouco tempo essa limitação pode ser alterada.

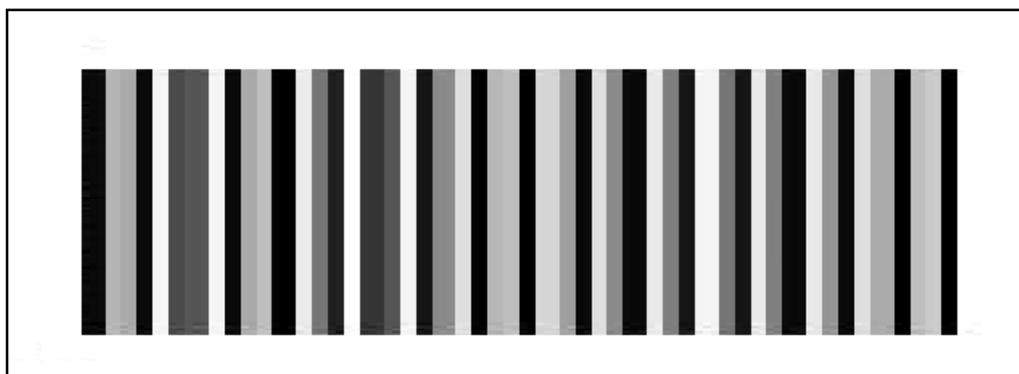


FIGURA 4.10 - Hololinha em ampliação de 15:1 evidenciando as finíssimas linhas que formam a franja de interferência

SEÇÃO 4.3

APLICAÇÕES

Holografia é uma tecnologia que vem se adaptando lentamente à computação e ao sinal digital. O modelo do registro holográfico, que é não linear e simultâneo, traz a informação do campo eletromagnético, e requer, para ser manipulado no computador, gigantescas memórias e alta capacidade de processamento. No entanto vemos atualmente um rápido incremento nestas duas áreas da informática, o que nos leva a crer que estas dificuldades serão minimizadas em breve. Analogamente, o material sensível utilizado em Holografia exige uma resolução centenas de vezes maior do que a do filme convencional. E, embora tenha sido eventualmente fabricado em escala comercial, este filme atualmente só pode ser adquirido por encomenda, uma vez que a AGFA descontinuou sua produção.

Além de exigir altíssima definição, tanto os sistemas de *display* volumétrico, quanto os de impressão exigidos para a criação de hologramas estão bem longe das técnicas convencionalmente utilizadas para produzir imagens. No Massachusetts Institute of Technology foi desenvolvido um dos primeiros *displays* holográficos, ao qual foi dado o nome de Holoideo, pois se apresenta como uma pequena televisão dotada de profundidade. A segunda versão do *display*, denominada Mark-II, produziu imagens de 150x75x150mm e 36 graus de paralaxe, atualizadas uma vez por segundo.



FIGURA 4.11 - Imagem da saída do display de holoideo Mark-II, um carro da Honda.

Neste sistema de projeção tridimensional, a primeira imagem divulgada foi a de um protótipo de automóvel da Honda, empresa que financia esta pesquisa (Honda Research and Development Co. Ltd.) , ao lado da NEC Corporation, da IBM Corp., das Forças Armadas americana - através da Advanced Research Projects Agency (ARPA) -, e do Television of Tomorrow Research Consortium do Media Laboratory, no MIT. LUCENTE(1996)

No caso da impressão holográfica já existem sistemas automatizados, de alto custo, baseados em processos foto e eletroquímicos, para a produção comercial de hologramas de segurança em alumínio. Também no MIT, desenvolvem-se pesquisas nesta área. As imagens holotrônicas, obtidas pelo processo descrito nesta dissertação, são realmente hologramas impressos em filme fotográfico, porém dispensam o laser e a mesa anti-sísmica, tornando barato e acessível o processo, desde que incrementada a capacidade dos computadores e impressoras. Ainda que requeiram impressoras especiais., eventualmente poderá se tornar um serviço corriqueiro a impressão de hologramas e redes de difração, que podem em breve ilustrar livros e outras publicações populares. Penso que não está longe o dia em que poderemos trivialmente gerar e copiar um holograma num computador pessoal. Esta pesquisa pretende ser um passo nessa direção

O que podemos fazer com hologramas produzidos tão facilmente? A lâmpada, por exemplo, já era esperada antes de ser inventada, mas muitos outros usos foram imaginados após Edison inventa-la. Hologramas já são largamente utilizados, mas seus usos são restritos. Vemos hologramas em cartões de crédito e selos de segurança, em adesivos infantis e mais raramente em museus ou vitrines de galerias de arte, mas essa técnica permite muitas e variadas aplicações.

A seguir estão descritas algumas possibilidades de utilização de hologramas e de redes de difração. De certa forma a presente pesquisa é parte do desenvolvimento dessas idéias. Algumas já estão plenamente implementadas e têm aplicação comercial, e outras estão à espera de viabilização prática:

Holografia com ondas não visíveis: o mesmo processo de registro das ondas luminosas visíveis pode ser aplicado a outros comprimentos de onda, não perceptíveis ao olho humano. Com isso podemos criar imagens tridimensionais usando raios-X, para obter visualizações impactantes do corpo ou de objetos naturais. Atualmente esta é uma das ferramentas mais poderosas de pesquisa da estrutura atômica da matéria. Uma empresa norte americana, a Voxel, utiliza um processo híbrido entre radiografia e holografia e produz imagens estereoscópicas de órgãos humanos para hospitais. Ondas acústicas também podem produzir padrões espaciais, revelando comportamentos inusitados do som.

Interferometria: É a técnica que, utilizando a interferência das ondas luminosas, permite uma avaliação muito precisa das pequenas distâncias, e do comportamento de todo tipo de vibração mecânica. Pode-se registrar diferenças e deformações micrométricas. É extensivamente utilizada na indústria de precisão, na simulação de fenômenos energéticos, e também em radioastronomia, para medir estrelas em tamanho e brilho. .

Display de navegação: Já existem protótipos militares, mas ainda não foram aplicados comercialmente. Trata-se de um mostrador suspenso no ar, para carros e aviões, que pode aumentar muito a segurança, facilitando o trabalho do condutor. Também será aplicado em sistemas de teleconferência para monitoramento remoto, útil em operações cirúrgicas, por exemplo.

Memórias de computador Na armazenagem de informação digital, um holograma pode conter imensa quantidade de “páginas” que são acessadas por diferente ângulos de iluminação, permitindo inúmeros registros na mesma placa. A informação digital fica reduzida a pontos brilhantes ou não, na superfície do holograma.

PARTE V

CONCLUSÕES

CONCLUSÕES

O objetivo primordial desta pesquisa foi alcançado. Compreender como a luz pode se transformar em números, e novamente em luz, e como esse processo pode criar imagens tridimensionais. E trazer esse conhecimento para o âmbito dos artistas, seguindo a natural evolução tecnológica da Arte, em busca de novos meios de realização.

Conseguimos programar e proceder ao cálculo de redes de difração que, quando observados sob a luz do laser, mostram a divisão da luz em vários pontos luminosos. Foram produzidas redes de várias frequências de forma a testar os limites da *imagesetter*. E também alcançados os limites de computação nos equipamentos e aplicativos que utilizamos durante a pesquisa. Nos servidores ALPHA do Departamento de Física deve ser verificada a capacidade de processamento usando-se FORTRAN, o que aumenta muito a quantidade de informação passível de manipulação pela CPU.

Com um programa em FORTRAN será possível realizar o cálculo em supercomputadores, e então conseguir alta densidade de linhas. A dificuldade pode ser a transformação dos resultados em curvas de densidades, o que vai exigir o uso de um *software* gerador de curvas de densidades. O programa ORIGIN pode ser o mais adequado. Para obter resultados mais complexos será imprescindível trabalhar com a linguagem FORTRAN.

Na etapa gráfica o arquivo PostScript revelou-se ideal. É um arquivo gráfico baseado em texto, fácil de editar, e que permite total controle do que vai ser impresso, uma vez que utiliza instruções em linguagem PostScript. Permite excelente portabilidade, e é de uso comum na área gráfica. No entanto, em algumas poucas tentativas de impressão, a *imagesetter* testada não foi capaz de ler todo o arquivo, por falta de memória. Este sistema não possui a resolução necessária para produzir hologramas com paralaxe, mas recorrendo à fotoredução em filme holográfico, poderemos ainda usar este equipamento para criar imagens holotrônicas, pelo método das franjas bipolares. Além disso a tecnologia de impressão desenvolve-se rapidamente, e mesmo em Brasília, algumas gráficas já possuem uma máquina de maior capacidade, a *imagesetter* Hercules, de até 9.000 dpi. Novos processos são criados todos os dias e rapidamente comercializados. Vamos talvez esperar um pouco para podermos imprimir hologramas numa *deskjet*, mas será possível, com certeza.

Esta é uma forte razão para que esta pesquisa tenha continuidade. Consideramos que este trabalho é apenas um grão de areia, num universo tecnológico muito amplo e avançado, cujo acesso fica em geral reservado para quem nasce acima da linha do Equador, mas podemos ir adiante. O momento requer que estejamos preparados e confiantes. A pesquisa por uma imagem tridimensional mal começou, e muitos caminhos ainda precisam ser percorridos. Importante é que também trilhemos estes caminhos.

Finalmente, por nos ter acompanhado desde o início, deixo para Leonardo da Vinci as últimas linhas deste humilde trabalho.

“Ó Pesquisador das coisas, não te vanglories de coisas que não conheces, as quais a natureza em sua ordem, reservou para si mesma, mas te alegra em saber do objetivo e fim das coisas que teu próprio espírito esboça.”

GLOSSÁRIO

GLOSSÁRIO

Acomodação Focalização em geral espontânea do sistema óptico da vista humana, que possibilita observar objetos a diferentes distâncias, com igual nitidez.

CGH [*computer generated hologram*], imagem holotrônica.

Coerência Espacial concordância das ondas luminosas no eixo do deslocamento espacial, ou seja, além de possuírem a mesma frequência, as ondas concordam em fase.

Coerência Temporal concordância das ondas no tempo, e indica que possuem a mesma frequência, condição em que a luz é monocromática.

Comprimento de onda a distância entre dois pontos na onda cuja diferença de fase é igual a um período inteiro, como entre dois picos, por exemplo. O mesmo que largura de onda.

Difração [lat. *di* + *fractio*, 'ato de quebrar'.] Fenômeno que ocorre quando uma onda é limitada, em seu avanço, por um objeto opaco que deixa passar apenas uma fração das frentes de onda, e que pode ser observado como uma propagação da onda para regiões além do objeto e situadas na sombra deste em relação à direção da onda incidente, ou como a propagação da onda em direções preferenciais. Mudança da trajetória da luz. Tecnicamente o termo inclui tanto a reflexão, quanto a refração.

Estereogramas RDS [*Random Dot Stereogram*] imagens planas criadas pela fusão de formas e padrões aleatórios que, quando observadas com visão convergente ou divergente, mostram volume e paralaxe.

Fase Uma etapa, de uma evolução que compreende um ciclo de modificações. A relação entre a posição de um pico de onda e um ponto de referência. É medida em radianos, graus ou frações de ciclo.

Feixe de Referência a porção do feixe que sai do laser, e não é afetada pelo objeto holografado.

Feixe do Objeto a porção do feixe que sai do laser e atinge o objeto, conseqüentemente modulando a luz que atinge o filme.

Franja padrão formado por áreas opacas e transparentes causadas pela interferência entre ondas de luz coerente.

Holografia técnica de registro simultâneo da fase e da amplitude de uma onda luminosa.

Holograma registro da fase e da amplitude de uma onda luminosa, na forma de uma rede de difração complexa. Usualmente em suporte de materiais fotosensíveis, produz uma imagem com paralaxe total, quando iluminado corretamente.

Hololinha uma linha de um padrão de interferência (holograma) calculado pelo método das Franjas bipolares.

HPO [*horizontal parallax only*] Imagem holográfica que não permite paralaxe vertical.

Imagem Pseudoscópica imagem reconstruída que inverte as relações espaciais dos objetos holografados, ao formar uma vista “por dentro” dos objetos. Ocorre também com estereogramas RDS, quando visto com a direção do olhar invertida.

Imagem Real aquela que é projetada em direção ao observador, e apresenta correta visão estereoscópica.

Imagem Virtual a imagem que se forma atrás do plano do holograma. A imagem que se forma em espelhos também é virtual.

Interferência efeito resultante da superposição de ondas de luz coerente. Pode ser construtiva, quando a onda resultante tem um valor de amplitude maior do que o das ondas componentes. Caso se subtraíam é chamada destrutiva.

Laser fonte de luz monocromática, muito intensa, coerente e colimada, na qual a emissão de radiação se faz pelo estímulo de um campo externo, é uma sigla para “emissor de luz coerente por ativação eletrônica”.

Luz Coerente emissão de energia visível em que os fótons irradiam-se sincrônica e paralelamente.

Luz não-coerente emissão de energia visível em que a propagação é radial, omnidirecional

Oclusão superposição de objetos opacos.

Padrão de interferência imagem bidimensional gerada pela interação de frentes de ondas de luz coerente. Franjas são padrões de interferência.

Paralaxe de movimento mudança na imagem decorrente do deslocamento do ponto de vista do observador.

Paralaxe temporal efeito de profundidade causado pelo deslocamento de um objeto.

Perspectiva aérea diferenças de definição e luminosidade da cena, causadas pela distância de visualização.

Perspectiva linear sistema de registro das diferenças de tamanho relativo causadas pela distância.

Radiação eletromagnética ondas de energia em que coexistem componentes elétricas e magnéticas, das quais o Espectro Visível é somente um pequeno intervalo de freqüências.

Rede de difração Sistema óptico formado por um conjunto de ranhuras paralelas e eqüidistantes, traçadas sobre uma superfície com que se pode desdobrar, em seus componentes, uma radiação policromática. Todo holograma é constituído por uma rede de difração.

Transformada de Fourier tratamento matemático dos espectros de frequência de ondas complexas, que permite o cálculo dos padrões de interferência entre diferentes fontes de luz. Também conhecido por Análise de Fourier, foi desenvolvido pelo matemático francês Jean Baptiste Fourier, ainda no século passado.

**REFERÊNCIAS
BIBLIOGRAFIA
e *WEB LINKS***

REFERÊNCIAS

- BAUDRILLARD (1980) - Simulacri e impostura, Capelli, Bologna
- BERGSON (1969) - A Evolução Criadora, Zahar Editores, Rio de Janeiro
- BRANDÃO;CREMA (1991) - O Novo Paradigma Holístico, Ed. Summus, São Paulo
- BASTOS (1987) - Panorama das Idéias Estéticas do Ocidente - ED. Universidade de Brasília, Brasília
- BENYON; WEBSTER (1985) - Pulsed holographic art practice, SPIE vol. 615
- BOURDIEU (1979) - LA FOTOGRAFIA, un Arte intermedio, Editorial Nueva Imagen. México
- CAHEN (1989) - L 'Image en relief, de la photographie stereoscopique à la vidéo 3D, Masson Ed., Paris
- CÂMARA, MIGUEL (1988) - Concretização experimental da Transformada de Fourier através da técnica holográfica, Tese de Mestrado PUC-RJ
- CLARET(1985) - O Pensamento Vivo de Da Vinci, Martin Claret Editores, SP
- COGAN;O`CONNOR (1995) - Computer generated holograms using medium resolution photographic film, SPIE seminars, vol. 2406
- DELEUZE (1985) - Cinema- A imagem-movimento, ed. Brasiliense, São Paulo
- DENISYUK (1978) - Fundamentals of Holography, Editorial MIR, Leningrad
- EL SUM, (1952) - Reconstructed Wavefront Microscopy, PhD. Thesis Stanford University, USA, citado por GABOR (1971)
- FABRIS (1987) - Imagens por computação gráfica, InFoto - FUNARTE MEC
- FONSECA (1996) - Um Sistema para Animação Holográfica
Proposta de Tese, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo
- FRAGA(1996) - Simulações Estereoscópicas Interativas, LSI -USP
- FRANÇON (1987) - Holographie - Ed. Masson, Paris

- FRANÇON (1972) - Optique, formation et traitement des images,
Masson e Cie.,Ed., Paris
- GABOR (1971) - Holography, past, present and future, SPIE seminar
- GOMBRICH (1979) - A História da Arte, Zahar Editores, Rio de Janeiro
- HOLZGANG (1990) - Descobrimdo a linguagem Post Script, Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro
- KASPER; FOLLER(1987) - The Complete Book of Holography, John Willey Inc., NY
- KIENSLE; ROESS (1969) - Einfuhrung in die Technique der Holografie, Frankfurt
- KUHN (1970) - A Estrutura das Revoluções Científicas, Ed. Perspectiva, São Paulo
- LOHMAN (1971) - How to make Computers Holograms, SPIE seminar, April 1971
- LUCENTE (1993) - Interactive Computation of Holograms using a Look-up Table,
Journal of Eletronic Imaging, v.2 n. 1, January 1993
- LUCENTE (1994) - Diffraction-Specific Computation for Electro-Holography,
Doctoral Thesis Dissertation, Dept. of Eletrical Engeneering and Computer Science, Massachusetts Intitute of Technology, September 1994
- LUCENTE; GALYEAN (1996) - Rendering Interactive Holographic Images, Media Lab, Massachusetts Intitute of Technology
- LEITH; UPATNIEKS (1972) - Progress in Holography, Physics Today, March 1972
- LUNAZZI (1985)- A Luz Congelada, Ciência Hoje vol 3, n. 16, 1985
- MACHADO (1984) - A Ilusão Especular, Editora Brasiliense/MEC/Funarte
- MACGREGOR (1992) - Computer Generated Holography from dot matrix and laser printers, American Journal of Physics 60 (9) Sept. 1992
- MARSH; SMITH (1976) - Computer holograms with a desk-top calculator, American Journal of Physics, vol.44, n.8 August

- MCNAIR (1983) - How to Make Holography, TAB Books, USA
- NINIO (1994) - Estereomagia, Editora Martins Fotes São Paulo
- OSTROWER (183) - Universos da Arte, Editora Campus, Rio de Janeiro
- READ(1978) - O Sentido da Arte, IBRASA, São Paulo
- PISKUNOV (1977) - Cálculo Diferencial e Integral, Editorial MIR , Moscou
- SHARF (1968) - Art and Photography, Penguin Books, England
- SMIGIELSKI; FAGOT; ALBE (1985) - Progress in holographic cinematography,
SPIE proceedings vol.600,
- STILES; SELTZ (1996) - Theories and Documents of Contemporary Arts,
University of California, USA
- STROKE (1966) - An Introduction to Coherent Optics and Holography,
Academic Press, NY
- SMUTS (1926) - Holism and evolution, MacMillan, London, - citado por
BRANDÃO;CREMA (1991)
- TOBEN;WOLF (1975) - Espaço-Tempo e Além, Ed. Cultrix, São Paulo

BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

- ALMEIDA, Virgílio; ÁRABE, José - INTRODUÇÃO À SUPERCOMPUTAÇÃO,
Universidade Federal de Minas Gerais,
Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., São Paulo, 1991
- CHIEN-HSIEN; CHIA-LUN; FIDDY - Iterative Procedure for improved CGH
reconstruction, Applied Optics, vol.32, n. 26, September, 1992
- GEORGE; MATTHEWS - Holographic diffraction gratings,
Applied Physics Letter, vol 9, n. 5, 1966
- HIGGINS, R. J. - Fast Fourier Transform: an introduction with some minicomputer
experiments, American Journal of Physics, vol.44, n.8 August 1976
- HOLOGRAPHIC MOTION PICTURES SYSTEMS - American Cinematographer,
March 1984
- HOLOGRAFIA - Centro de Holografia de Alicante, Alicante, Espanha 1985
- HOWARD, John N.- OPTICS TODAY
American Institute of Physics, New York, 1986
- ISHII - Artistic Holography in Japan, SPIE vol. 615, 1985
- KALWICK, David - 3D GRAPHICS, Tips, Tricks, & Techniques
Academic Press Inc., New York, USA, 1996
- LUCENTE; ST.HILLAIRE; BENTON; ARIAS; WATLINGTON - New approaches to
holographic video, SPIE proceeding #1732, July 1992
- MAGALHÃES, Léo Pini - COMPUTAÇÃO GRÁFICA
Editora Papyrus/Unicamp, São Paulo, 1986
- MALLICK;ROBLIN - Fourier transform Holography using a quasimonochromatic
incoherent source, Applied Optics, vol.10, n.3, 1971
- MCCORMACK, Sharon - Special effects for integral holograms,
SPIE proceedings, vol. 615, 1985

POLE - 3-D imagery and holograms of objects illuminated in white light,
Applied Physics Letter, vol.10, n. 1, January 1967

ROGERS, David F. - PROCEDURAL ELEMENTS FOR COMPUTER GRAPHICS
McGraw-Hill Book Company 1985

SAXBY, Grahan - HOLOGRAMS, How to make and Display them
Focal Press Inc, New York, 1980

SHERMAN - Hologram copying by Gabor Holography of transparencies, Applied
Optics vol.6, n.10, October, 1967

ST. HILLAIRE; BENTON; LUCENTE; JEPSEN; KOLLIN; YOSHIKAWA; UNDERKOFFLER -
Electronic Display system for computational holography, SPIE, 1990

ST. HILLAIRE; BENTON; LUCENTE - Electronic Holography: the , MIT 1994

VANDEWAKER; SNOW - Low spatial frequency holograms of solid objects,
Applied Physics Letter, vol.10, n.2 1967

WATERS, James - Holographic image synthesis utilizing theoretical methods,
Applied Physical Letters,v.9, n. 1, December, 1966

WEB LINKS

["http://www.media.mit.edu/people/lucente/holo/PhDthesis/contents.html"](http://www.media.mit.edu/people/lucente/holo/PhDthesis/contents.html)
[**Mark Lucente, EECS Doctoral Thesis Dissertation**](#)

["http://tech.appl-opt.physik.uni-essen.de/AG/Publikationen.html"](http://tech.appl-opt.physik.uni-essen.de/AG/Publikationen.html)
[**Liste der Publikationen AG Prof. O. Bryngdahl**](#)

["http://www.research.ibm.com/imaging/"](http://www.research.ibm.com/imaging/)
[**Imaging science and technology**](#)

["http://www.media.mit.edu/people/lucente/holo/holovideo-links.html"](http://www.media.mit.edu/people/lucente/holo/holovideo-links.html)
[**Links to Holovideo-Related Web Pages**](#)

["http://prism.ph.ed.ac.uk/~sergei/hmaster.html"](http://prism.ph.ed.ac.uk/~sergei/hmaster.html)
[**Holomaster 1. A phase hologram design program.**](#)

["http://panda.ecs.cst.nihon-u.ac.jp/oyl/oyl_home.eng.html"](http://panda.ecs.cst.nihon-u.ac.jp/oyl/oyl_home.eng.html)
[**Yoshikawa Lab. ECS. CST. Nihon Univ.**](#)

["http://holomex.com/"](http://holomex.com/)
[**Hologramas de Mexico**](#)

["http://www.epm.ornl.gov/%7Ebatsell/OC.html"](http://www.epm.ornl.gov/%7Ebatsell/OC.html)
[**Optical Computing**](#)

["http://w3.osa.org/pub%26svc/default.html"](http://w3.osa.org/pub%26svc/default.html)
[**OSA Publications**](#)

["http://www.hmt.com/holography/index.html"](http://www.hmt.com/holography/index.html)
[**HyperMedia Technologies- Holography**](#)

["http://www.dsphere.net/"](http://www.dsphere.net/)
[**DesignSphere Online**](#)

["http://www.siggraph.org/conferences/siggraph95/ExhibitorList.html"](http://www.siggraph.org/conferences/siggraph95/ExhibitorList.html)
[**SIGGRAPH 95 Exhibitor List**](#)

["http://euroweb.com/nlcon/b2b/ehol/randd.htm"](http://euroweb.com/nlcon/b2b/ehol/randd.htm)
[**European Holography On-Line**](#)

["http://www.camtech.com.au/~austholo/"](http://www.camtech.com.au/~austholo/)
[**AUSTRALIAN HOLOGRAPHICS**](#)

["http://quark.gmi.edu/~redbeard/i_raytrace.html"](http://quark.gmi.edu/~redbeard/i_raytrace.html)

[Raytracing Links](http://quark.gmi.edu/~redbeard/i_raytrace.html)

["http://www.islandnet.com/~royal/sergey.htm"](http://www.islandnet.com/~royal/sergey.htm)

[Net@Works Exhibition](http://www.islandnet.com/~royal/sergey.htm)

["http://www.enter.net/~holostudio/visitor.html"](http://www.enter.net/~holostudio/visitor.html)

[The Internet Webseum of Holography Visitor Center](http://www.enter.net/~holostudio/visitor.html)

["http://www.primenet.com/holoplex/"](http://www.primenet.com/holoplex/)

[Holoplex](http://www.primenet.com/holoplex/)

["http://www.ece.gatech.edu/research/labs/oisl/oisllinks.html"](http://www.ece.gatech.edu/research/labs/oisl/oisllinks.html)

[Georgia Optoelectronic Lab](http://www.ece.gatech.edu/research/labs/oisl/oisllinks.html)

["http://www.voxel.com/"](http://www.voxel.com/)

[VOXEL medical 3-d](http://www.voxel.com/)

["http://www.eskimo.com/%7Ebillb/amateur/holo1.html"](http://www.eskimo.com/%7Ebillb/amateur/holo1.html)

[HAND DRAWN HOLOGRAMS](http://www.eskimo.com/%7Ebillb/amateur/holo1.html)

["http://www.yorku.ca/research/vision/eye/"](http://www.yorku.ca/research/vision/eye/)

[Vision: The Book](http://www.yorku.ca/research/vision/eye/)

["http://www.cm.cf.ac.uk/cgi-bin/Ray.TracingLink.pl?Rendering_Packages+Others"](http://www.cm.cf.ac.uk/cgi-bin/Ray.TracingLink.pl?Rendering_Packages+Others)

[Rendering Packages](http://www.cm.cf.ac.uk/cgi-bin/Ray.TracingLink.pl?Rendering_Packages+Others)

["http://accept.la.asu.edu/PiN/hologram2.html"](http://accept.la.asu.edu/PiN/hologram2.html)

[Holograms II](http://accept.la.asu.edu/PiN/hologram2.html)

["http://sdsc.edu/vrml/"](http://sdsc.edu/vrml/)

[The VRML Repository](http://sdsc.edu/vrml/)

Professor Juliano Serra Barreto

UNB 131245

Este trabalho foi finalizado em 22 de junho de 1998.

***Edição realizada em Adobe PageMaker 4.01 e
impressão em jato de tinta HP 698.***

Brasília D.F.