



## AZUL, QUE TE QUERO VERDE

“A Terra é azul”. Foi o que o primeiro astronauta disse ao olhar o nosso planeta lá de cima. Com o auxílio dos satélites de sensoriamento remoto, o homem pode, entre outras coisas, identificar ocorrências que ameaçam o equilíbrio ecológico.

Tudo para que o nosso planeta continue azul e com muito verde.

A Secretaria de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico coordena um grande esforço das Universidades, Institutos, Fundações e da iniciativa privada para desenvolver projetos que integram o país à comunidade científica mundial.



ENCARTE  
INFANTIL

# CIÊNCIAHOJE

Revista de divulgação científica da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência Vol. 10 N° 56 Agosto de 1989 NCz\$ 15,00

Manaus e Rio Branco (via aérea) NCz\$ 19,50

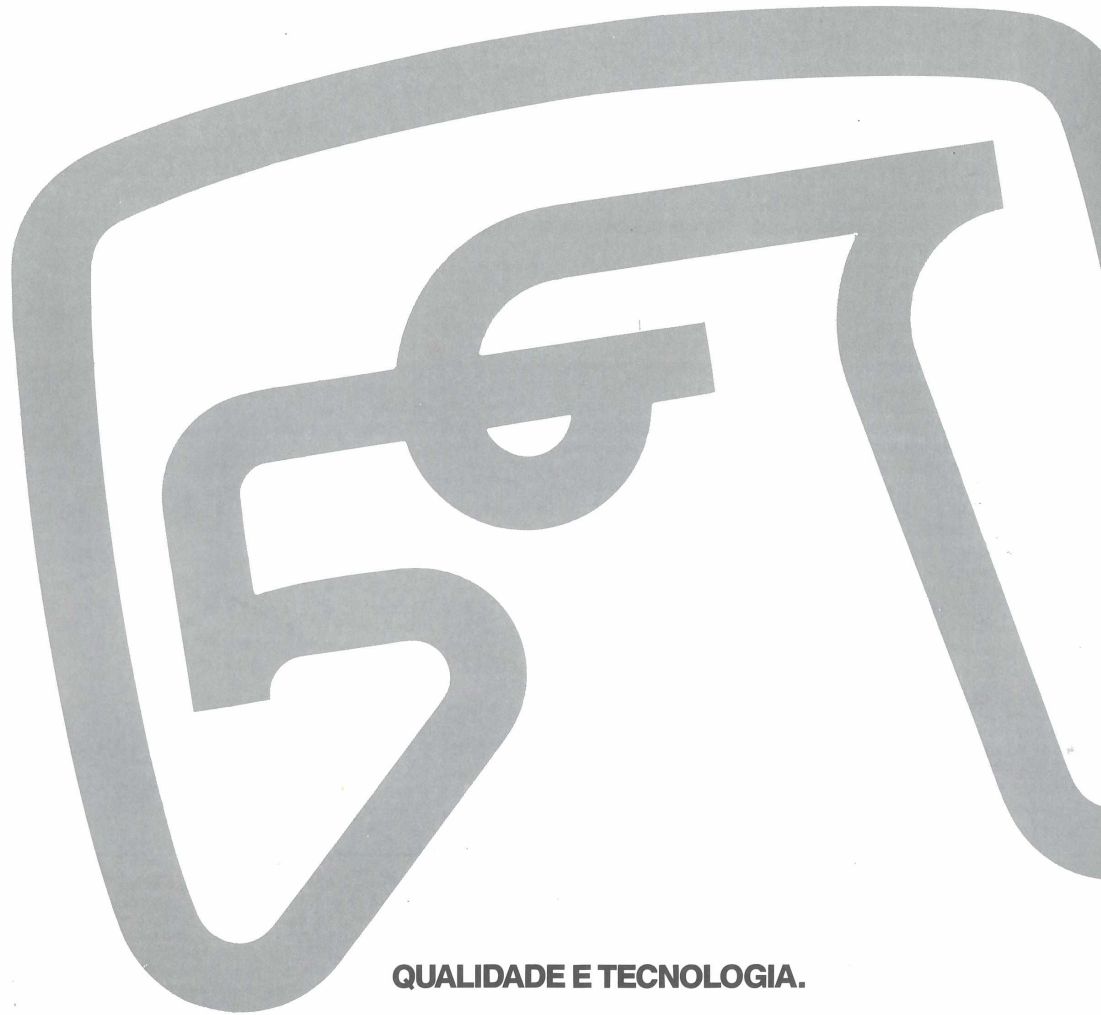
**SB  
PC**

**OS CONFLITOS  
DE ITAPARICA**

**A GUERRA  
DOS CUPINS**

**IMAGENS  
COMPUTADORIZADAS**

**A ELEBRA TEM 20 ANOS E DUAS PALAVRINHAS PARA DIZER A VOCÊ.**



**QUALIDADE E TECNOLOGIA.**

Na Elebra, as palavras tecnologia e qualidade são fundamentais. Uma não deve ser pensada sem a outra. Isso porque tecnologia significa muito mais do que conquistar avanços: significa principalmente atingir qualidade absoluta nos produtos. A Elebra sabe também que qualidade é resultado da contribuição e do talento de seus profissionais. Porque é através deles que a Elebra desenvolve produtos com tecnologia para as áreas mais importantes da informática: periféricos, computadores, comunicação de dados, controles e sistemas de defesa. Elebra, há 20 anos conquistando experiência e aperfeiçoando a maneira de unir qualidade e tecnologia.



# COMPUTAÇÃO GRÁFICA

**Jonas Miranda**

Instituto de Matemática Pura e Aplicada

**Luiz Velho**

Globo Computação Gráfica

Quando manipulamos uma grande quantidade de dados, precisamos organizá-los de forma adequada. Para isso, podemos utilizar tabelas ou outras formas de associação que permitam entendê-los mais claramente. Porém, nada mais efetivo que dar ouvidos ao velho provérbio: "uma imagem vale mais que mil palavras". De fato, a visualização dos dados freqüentemente é o melhor método para se obter informações qualitativas sobre eles. É neste ponto que a computação gráfica vem em auxílio das formas tradicionais de processamento de dados.

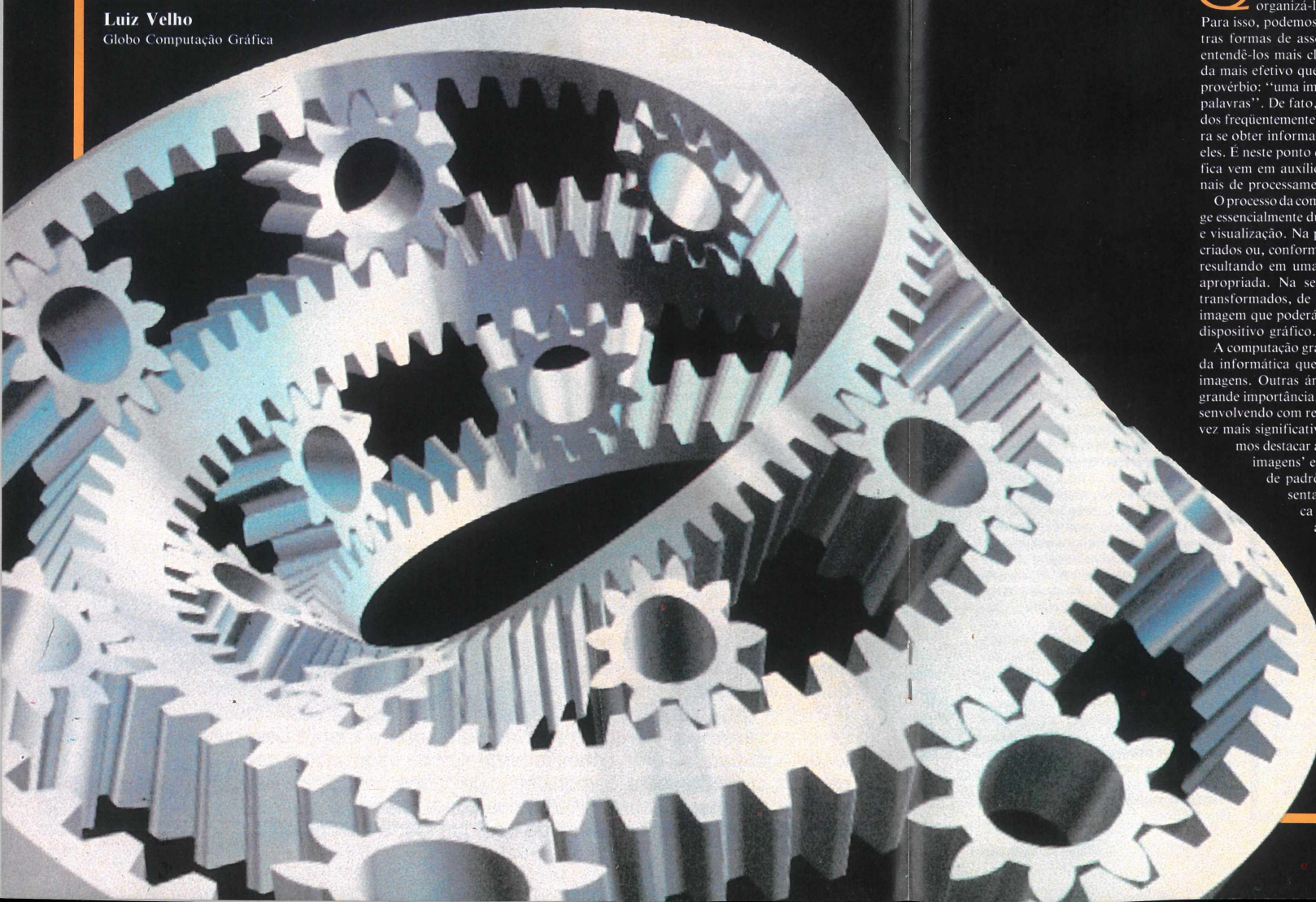
O processo da computação gráfica abrange essencialmente duas etapas: modelagem e visualização. Na primeira, os dados são criados ou, conforme o caso, modificados, resultando em uma estrutura geométrica apropriada. Na segunda, os dados são transformados, de modo a produzir uma imagem que poderá ser exibida em algum dispositivo gráfico.

A computação gráfica não é a única área da informática que relaciona dados com imagens. Outras áreas afins, também de grande importância, surgiram e vêm se desenvolvendo com resultados práticos cada vez mais significativos. Dentre elas podemos destacar a de 'processamento de imagens' e a de 'reconhecimento de padrões'. A figura 1 apresenta de forma esquemática a relação entre essas áreas. A computação gráfica tem propiciado progressos definitivos, tanto no contexto da comunicação homem-máquina como no da produção visual automatizada.

No primeiro caso, ela constitui uma linguagem de comunicação do usuário com o computador, permitindo que ambos tenham uma interação mais fácil e natural, contribuindo desta forma para a desmistificação da máquina e a disseminação de seu uso mesmo entre pessoas não especializadas. Exemplos disto são a utilização crescente de interfaces gráficas do tipo *window*. Na produção visual, a computação gráfica é empregada como uma ferramenta de geração e manipulação de imagens que virão a constituir um produto visual autônomo. Este é o caso típico da produção de animação para cinema e televisão, ou mesmo da fabricação de circuitos impressos e integrados na indústria eletrônica.

Não se pode precisar com exatidão quando a computação gráfica começou a desenvolver-se. Tem-se conhecimento do uso de gráficos simples já nos primórdios da era dos computadores. Mas, sem dúvida, o marco inicial da computação gráfica moderna foi o desenvolvimento do sistema Sketchpad, por Ivan Sutherland, em 1962. Pesquisador do Lincoln Lab, no Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), Sutherland trabalhava no projeto de sistema de defesa aérea dos Estados Unidos (Projeto SAGE). Desenvolveu então um sistema que foi o embrião do que é hoje conhecido como um editor gráfico. O programa permitia a criação e a manipulação de figuras bidimensionais na tela do computador, bem como a interação direta e imediata do usuário com o que estava representado na tela. Sua criação marca, portanto, o advento da computação gráfica interativa. Na mesma época, desenvolviam-se pesquisas para utilizar computação gráfica em projetos de automação industrial. Entre as empresas pioneiras nessa área destacam-se a General Motors e a Lockheed, nos Estados Unidos, e a Renault, na França.

O desenvolvimento inicial da computação gráfica esteve portanto ligado a indústrias de ponta e a aplicações militares. Não demorou muito, porém, para que ela marcasse presença em outras áreas. Dedicaremos a parte final deste artigo a uma descrição dessas aplicações.



Os dispositivos gráficos são equipamentos utilizados para a entrada e a saída de dados no computador. Os primeiros dispositivos de saída eram osciloscópios adaptados que funcionavam como terminais gráficos. Esses equipamentos são chamados de 'terminais caligráficos', pois, como se fossem uma caneta, traçam figuras geométricas por meio de segmentos de reta que ligam pontos sucessivos da tela. Toda a sequência de instruções para o traçado da figura deve ser armazenada numa memória interna denominada 'lista de *display*'. Na medida em que essa lista é interpretada, a figura é desenhada na tela do terminal. Depois de completa, a imagem desaparece dentro de curto período de tempo. Para que isto não interrompa o trabalho do usuário, a figura deve ser traçada consecutivamente, com uma frequência de aproximadamente 30 vezes por segundo. Esse mecanismo aumenta os custos dos equipamentos caligráficos que utilizam a lista de *display*.

Posteriormente, foram introduzidos os dispositivos caligráficos do tipo DVST (do

inglês *direct view storage tube*). Esses dispositivos retêm a imagem — uma vez traçada — na tela, dispensando a lista de *display*. O preço do equipamento foi assim reduzido, o que contribuiu de modo definitivo, nessa fase inicial, para uma maior disseminação da computação gráfica.

A segunda revolução na área de dispositivos gráficos de saída veio com os terminais do tipo 'varredura' (*raster*). Seu mecanismo é análogo ao de uma televisão, cuja tela é varrida horizontalmente certo número de vezes por segundo. Os dispositivos gráficos têm uma memória digital, chamada memória de imagem, em que há uma posição correspondente a cada ponto da tela. Foi o custo da memória que impossibilitou de início a larga utilização desses dispositivos e induziu a proliferação dos terminais caligráficos.

Ao contrário dos dispositivos caligráficos, os de varredura não traçam segmentos de reta. Como diz o nome, as imagens são geradas através da varredura de cada linha horizontal da tela. Nesse processo, cada ponto da linha é ativado ou não, depen-

dendo do valor armazenado na posição correspondente da memória de imagem. Para traçarmos um segmento de reta nesse tipo de dispositivo, precisamos fazer um programa para que as posições da memória de imagem que correspondem aos pontos do segmento sejam modificadas. A reta fica armazenada nessa memória, e os pontos da tela correspondente são ativados a cada varredura horizontal (figura 2).

De modo geral, para ser armazenada num computador uma imagem deve ser codificada numericamente. É o que chamamos 'imagem digital'. Para obter essa codificação, dividimos a imagem em amostras, cada uma das quais corresponde a um ponto da imagem e guarda as informações sobre a intensidade e a cor desse ponto. Numa imagem digital, cada amostra é chamada *pixel*, palavra que vem da expressão inglesa *picture element* (ver 'Supercomputadores: a batalha dos nanossegundos', em *Ciência Hoje* nº 25). Como ocorre em qualquer processo de amostragem, após a 'quantização' da imagem em *pixels* podemos perder informações do original, fenômeno chamado de *aliasing*. Como se pode observar na figura 3, existem vários métodos para minimizar esse problema.

Uma classificação geral para os dispositivos gráficos, tanto de entrada quanto de saída, divide-os em dispositivos vetoriais e matriciais. Os primeiros representam os dados gráficos como constituídos de segmentos de reta (vetores), ao passo que os segundos os representam como uma imagem digital. Nesta classificação, os terminais caligráficos são do tipo vetorial e os de varredura do tipo matricial. Outros exemplos de dispositivos matriciais de saída seriam terminais com tela de cristal líquido e impressoras a *laser* ou matriciais, hoje tão comuns. Na categoria dos dispositivos vetoriais temos ainda os plotadores, muito utilizados na indústria.

Com relação aos dispositivos de entrada de dados gráficos, podemos mencionar na categoria vetorial a mesa digitalizadora e o *mouse*, que permitem transmitir coordenadas ao computador. Na categoria matricial, há os digitalizadores de imagens (*scanners*), que captam uma imagem externa ao computador, transformando-a numa imagem digital.

A tendência no momento atual é a utilização de estações gráficas que utilizem dispositivos de saída gráfica matricial do tipo varredura, associados a um dispositivo de entrada vetorial. Essas estações possuem um computador integrado, de modo que podem funcionar independentemente de máquinas de grande porte. Pode-se perceber que se esboça uma evolução que culminará com a transformação dos microcomputadores atuais em verdadeiras estações gráficas.



Fig. 2. Dispositivos caligráficos e de varredura. Nos dispositivos do tipo varredura, o feixe de elétrons 'varre' cada linha horizontal sucessivamente, numa frequência de 30 vezes por segundo. Cada ponto da tela (*pixel*) que pertence à imagem a ser mostrada é ativado quando o feixe de elétrons varre a linha horizontal a que ele pertence. Nos dispositivos caligráficos, o feixe de elétrons se desloca ao longo dos segmentos sucessivos que constituem a figura, de acordo com as instruções que foram armazenadas na lista de *display*. Esse processo ocorre também numa frequência de 30 vezes por segundo, de modo a criar uma imagem estável na tela.

Para obter um gráfico num computador, precisamos inicialmente gerar os dados necessários. Ao processo de criação, manipulação e análise dos dados chamamos modelagem, e o objeto geométrico resultante desse processo é o modelo. Além de criar modelos, necessitamos por vezes alterar e corrigir os já existentes. Um aspecto importante da manipulação de um modelo é o problema da coerência: precisamos garantir a preservação integral de suas propriedades geométricas e topológicas. A manipulação incorreta de um modelo qualquer poderá dar origem a uma geometria inexistente. Além disso, se vários usuários trabalham simultaneamente em determinado modelo, é preciso garantir que este, além de coerente, esteja sempre com suas informações atualizadas.

A área da modelagem explora a convergência de três áreas distintas: a matemática, que define a geometria e a topologia do modelo; a interface com o usuário, que permite a utilização de técnicas adequadas para a manipulação do modelo; e banco de dados, cujos métodos são utilizados para armazenar informações e garantir a coerência global do modelo.

A computação gráfica comanda a interface homem-máquina e, portanto, não aparece apenas como uma técnica de visualização do modelo que está sendo manipulado. Das diversas formas existentes de representar um modelo no computador, destacamos três: representação por primitivas, representação CSG (*constructive solid geometry*) e o método de representação por meio de bordo ou B-Rep (*boundary representation*).

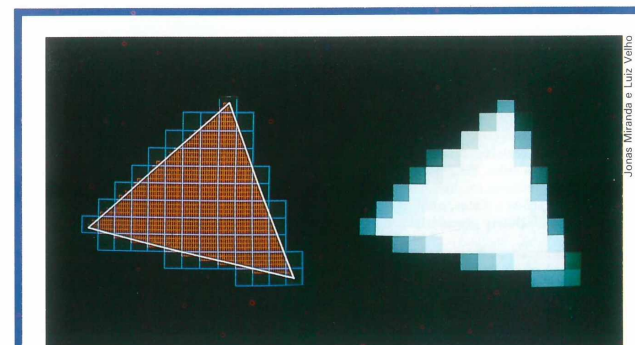
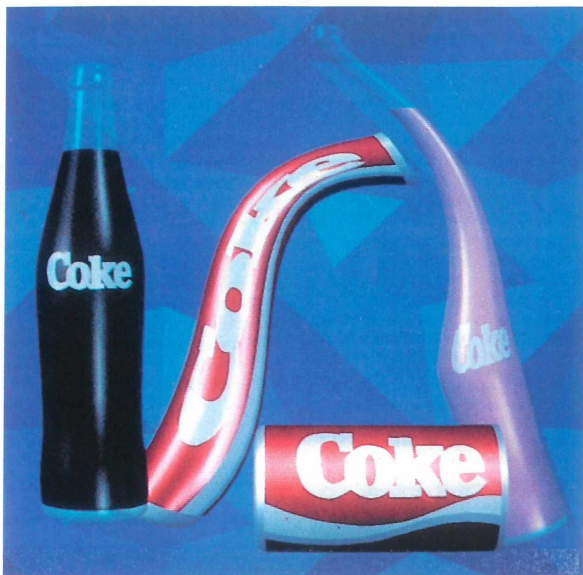


Fig. 3. Anti-aliasing. Quando tornamos discreto um sinal contínuo, temos o problema da perda de informação. Para evitar que isto ocorra, devemos impor restrições ao sinal original ou ao processo de amostragem. A inobservância dessas normas dará origem a um sinal cuja reprodução não se mantém fiel ao objeto. É o que chamamos *aliasing*. O termo se refere ao fato de que frequências acima de certo limite se manifestam na amostra por frequências baixas, que são *alias* daquelas frequências altas. Para evitar a ocorrência do *aliasing*, a taxa de amostragem deve ser igual a pelo menos duas vezes a maior frequência contida no sinal, conforme preconiza o teorema de Nyquist. Dessa maneira podemos filtrar o sinal original para eliminar as frequências incompatíveis com a taxa de amostragem, ou aumentar o número de amostras para compatibilizar a taxa de amostragem com o sinal original. Em computação gráfica temos o *aliasing* espacial, que pode ser identificado principalmente pela aparência serrilhada em linhas e nos contornos das figuras. As técnicas utilizadas para minimizar esse efeito envolvem métodos analíticos, de superamostragem e estocásticos. Os métodos analíticos calculam a área dos objetos geométricos no interior de cada elemento da imagem (*pixel*), que terá uma intensidade proporcional à parte de sua área ocupada por esses objetos. O método de superamostragem computa uma imagem numa resolução maior, que pode ser convertida para a resolução original fazendo-se uma média das intensidades dos grupos de *pixels* que correspondem a um único *pixel* na resolução baixa demais. É importante notar que este processo minimiza o *aliasing*, mas não garante necessariamente sua eliminação. Os métodos estocásticos fazem uma amostragem nos pontos da imagem ligeiramente alterados por uma perturbação aleatória. Isto elimina a regularidade da malha de amostras e introduz ruído no sinal quando ocorrem frequências que causariam *aliasing*.



Fig. 1. Áreas correlatas. No procedimento tradicional, o computador recebe dados, faz algum tipo de processamento e devolve na saída dados de mesma natureza. É o que ocorre, por exemplo, no controle de contas bancárias: a entrada de dados é formada por valores positivos (créditos) ou negativos (débitos) que, depois de processados, têm como resultado o saldo atualizado do cliente. Na computação gráfica, os dados de entrada são transformados em imagem através de algum dispositivo de saída gráfica. Aproveitando o exemplo anterior, os dados poderiam ser os valores dos saldos de uma conta bancária, mas o objetivo seria produzir gráficos que mostrem a variação diária em um mês determinado. No processamento digital de imagens, o computador tem como entrada uma imagem e a saída é outra imagem. Exemplo bastante atual de aplicação de técnicas dessa área é a 'colorização' de filmes em preto e branco: a entrada é uma imagem monocromática e a saída é a mesma imagem, porém colorida. As técnicas da área de reconhecimento de padrões permitem obter, a partir de uma imagem (entrada), informações geométricas e topológicas sobre os modelos que deram origem a essa imagem. Um exemplo está na robótica: nas linhas de montagem automatizadas, os robôs utilizam informações extraídas de imagens provenientes de uma câmara para identificar as peças que serão manipuladas.



Scott R. Parry — Brigham Young University

Referimo-nos a alguns métodos de representação de modelos no computador. Restam, porém, várias perguntas a responder com relação às técnicas de modelagem. Como criar as primitivas nos métodos de representação por primitivas e CSG? Como construir as superfícies que vão constituir as faces na representação B-Rep? Um sistema de modelagem deve ser projetado com vistas à sua área de aplicação. Dependendo dela, um conjunto adequado de primitivas, associado a um grupo abrangente de transformações, permite obter todos os modelos desejados. Em alguns casos, temos que adicionar outros procedimentos para auxiliar a criação de modelos. Alguns de-

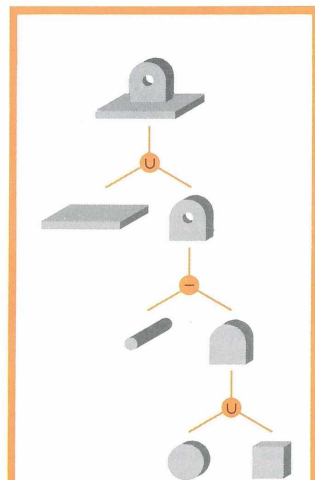


Fig. 5. Operações booleanas e CSG. Dados dois conjuntos A e B de pontos no espaço, definimos as operações booleanas de união ( $A \cup B$ ), interseção ( $A \cap B$ ) e diferença ( $A - B$ ) entre esses dois conjuntos. Se A e B representam primitivas geométricas, as operações booleanas dão origem a um novo modelo. No método de representação CSG, as primitivas estão sujeitas não apenas às transformações do espaço euclidiano, mas também interagem entre si através das operações booleanas. Nesse método, o modelo é representado por uma árvore binária, na qual cada folha representa uma primitiva geométrica do sistema ou uma transformação e cada nó representa uma operação do sistema efetuada com seus descendentes. No diagrama acima, para simplificar, omitimos as transformações. As primitivas (cilindro e cubo) são inicialmente transformadas e depois combinadas com as operações booleanas da parte inferior até o topo da árvore.

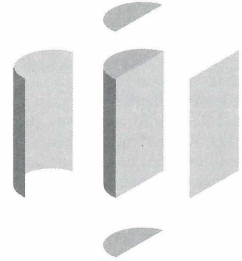


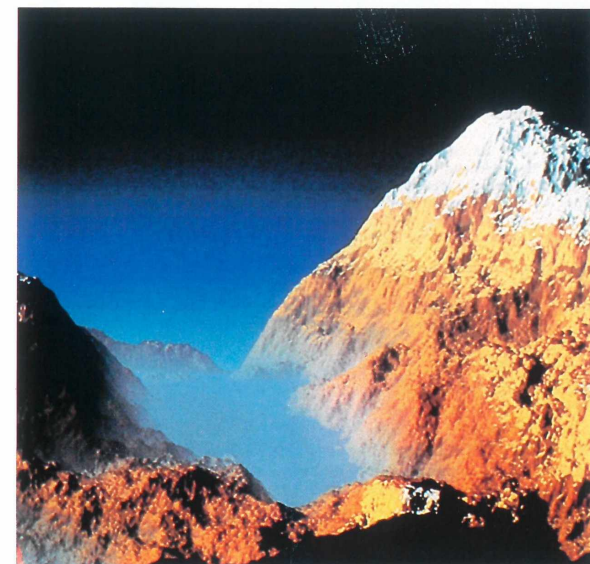
Fig. 6. B-Rep e operadores de Euler. No método de representação B-Rep, definimos o modelo enumerando as faces, arestas e vértices do objeto geométrico a representar. O modelo é formado por uma indicação de como esses elementos se associam. Sabe-se, pela topologia combinatória, que se nessa representação um modelo possui V vértices, A arestas e F faces, então a relação  $V - A + F$  é uma constante denominada 'característica de Euler'. Dois modelos que possuam a mesma característica de Euler serão topologicamente equivalentes, já que se pode deformar um no outro. Isto nos permite definir operadores que, agindo sobre um ou mais modelos, garantem a coerência do modelo resultante. O mais importante desses operadores é a 'soma conexa' de modelos, que consiste em se criar um novo modelo a partir de dois modelos existentes pela exclusão de uma face em cada modelo e a associação das arestas livres resultantes em cada um deles. Temos uma fórmula bem definida para a característica de Euler do modelo resultante, a saber:  
 $\chi(A \oplus B) = \chi(A) \oplus \chi(B) - 2$ .  
O sistema pode utilizar essa equação para verificar a consistência do modelo resultante e controlar futuras alterações.

perfície, pois apresentam natureza mutável e amorfa. Um método que se tem mostrado bastante adequado para abordar esse tipo de modelagem é a descrição procedural, técnica conhecida na literatura pelo nome de 'modelagem algorítmica'. Como exemplo desse tipo de modelagem podemos citar os fractais, que têm sido largamente utilizados na composição de cenas que envolvem fenômenos naturais, como a que aparece na figura 7 (ver 'Fenômenos de agregação', em *Ciência Hoje* n.º 55).

Na modelagem tradicional, os objetos geométricos são criados sem quaisquer compromissos com as leis físicas. O único compromisso é a coerência geométrica e topológica do modelo a ser obtido. Isso torna difícil criar objetos que sejam deformados pela interação com um sistema físico, se essas variações mudam com o tempo e se desejamos visualizá-las. Por isso, uma área que vem recebendo a atenção de pesquisadores é a de 'modelagem física', em que os modelos a serem criados são considerados parte de um sistema físico, estando pois submetidos às suas leis.

Quando utilizamos um sistema de modelagem para uma aplicação qualquer, devemos especificar, além das propriedades geométricas, outras informações relativas a diversas características do modelo. Entre esses atributos adicionais, alguns são utilizados exclusivamente para fins de controle, como por exemplo o número de série dos componentes. Outros atributos, tais como cor e tipo do material, referem-se à aparência do modelo e serão utilizados posteriormente na fase de visualização. Um método bastante comum para ampliar a capacidade de descrição do banco de dados é o de 'mapeamento de textura', que consiste em associar informações de uma matriz n-dimensional a pontos do modelo. Um exemplo simples seria o mapeamento que associa a matriz de uma imagem digital à cor dos pontos da superfície de um cilindro, o que permite obter um recipiente com rótulo sem aumentar a quantidade de elementos geométricos do modelo (figura 8).

Os atuais métodos de modelagem exigem que o usuário especifique de modo muito detalhado todas as características do mo-



Richard F. Voss — IBM

Fig. 7. Fractais. Já no século passado, alguns matemáticos perceberam a existência de conjuntos que apresentavam comportamento geométrico intermediário entre curvas e superfícies. Recentemente, Benoit Mandelbrot, pesquisador do T.J. Watson Research Center, da IBM, utilizou o termo 'fractal' para designar esses conjuntos, em razão da natureza fracionária de sua dimensão. Coube também a Mandelbrot ressaltar a ocorrência desses conjuntos em diversos fenômenos físicos e na geometria da natureza. Pesquisadores da área de síntese de imagens desenvolveram algoritmos eficientes de aproximação poligonal de fractais. Esses modelos têm sido utilizados para a representação de diversas formas da natureza, como montanhas e plantas.

delo. Trata-se de uma das etapas mais demoradas no desenvolvimento de um projeto em computação gráfica e torna bastante laborioso o processo como um todo. Por isso, a meta das pesquisas nessa área é desenvolver sistemas inteligentes, que se responsabilizem pela geração automática dos detalhes de construção de forma coerente, permitindo a criação de modelos por meio de uma especificação concisa e direta por parte do usuário.

Uma vez criados, os modelos estão prontos para ser visualizados. Inicia-se a fase em que dados geométricos são convertidos em imagem. O processo de visualização

ra virtual permite considerar a visualização de modelos bidimensionais como um caso particular da visualização em três dimensões, em que os objetos da cena estão todos no mesmo plano.

Se for necessária uma representação mais realista que o desenho de linhas, além da descrição das propriedades geométricas os modelos precisam conter outros atributos relativos à aparência (como cor, reflectância e transmitância) para que os programas de síntese de imagem possam calcular de forma precisa a intensidade da luz refletida pela superfície. Para completar a definição da cena, podem ser incluídas ainda

as fontes de iluminação, que são os elementos fundamentais para a simulação da troca de energia radiante que, em última instância, irá produzir os estímulos luminosos correspondentes às variações de intensidade da imagem.

As fontes de iluminação podem ser classificadas de acordo com a sua forma de emitir luz. Assim, temos as fontes direcionais, em que todos os raios são paralelos, como no caso do Sol; as fontes pontuais, em que os raios emanam de um ponto comum, a exemplo das lâmpadas incandescentes; e os chamados focos de luz, em que os raios se originam no mesmo ponto e se

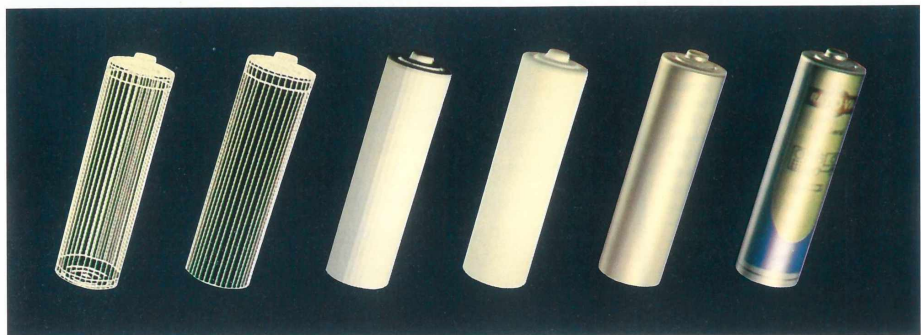


Fig. 8. Tipos de visualização. O resultado do processo de visualização varia segundo o grau de realismo desejado, como vemos nesta sequência de imagens. Da esquerda para a direita, temos: (a) imagem com desenho em linha da malha de polígonos que compõem a superfície modelo; (b) imagem na qual foram removidas as linhas correspondentes às partes ocultas da superfície; (c) imagem em que o cálculo da iluminação difusa foi efetuado com o uso das normais dos polígonos, produzindo aparência facetada; (d) imagem em que a iluminação difusa foi calculada, com o uso das normais da superfície nos vértices dos polígonos, e a cor obtida foi interpolada segundo o método de Gouraud; (e) imagem em que se acrescentou o cálculo da iluminação especular e a interpolação das normais da superfície foi efetuada com o uso do método de Phong; (f) imagem com mapeamento de textura, modificando a cor do objeto.

transforma a estrutura abstrata do modelo, no computador, numa representação concreta no dispositivo de exibição. Em função dos objetivos de cada aplicação e do tipo de equipamento gráfico disponível, o resultado obtido pode variar desde uma imagem com o desenho em linhas até uma imagem realista de uma cena tridimensional, como vimos na figura 8.

Em qualquer dos casos, para eliminar dependências dos periféricos de saída gráfica, utilizamos o paradigma da 'câmara virtual'. Nesse modelo, os objetos são definidos em relação a um espaço global em que posicionamos também uma câmara imaginária. Somente os elementos visíveis desse ponto de observação são mapeados no dispositivo de exibição. A câmara virtual é o artifício que nos auxilia a determinar a projeção, no plano de imagem, das várias formas geométricas que integram a cena, como está indicado na figura 9. É importante observar que a metáfora da câma-

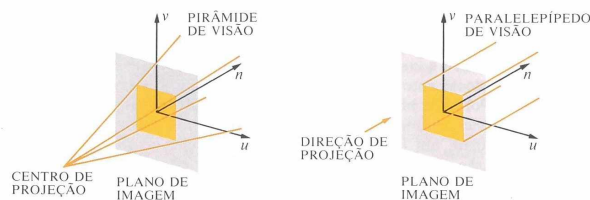


Fig. 9. Câmara virtual. A câmara virtual define a sequência de transformações que devem ser aplicadas aos modelos projetados no plano de imagens e mapeados no dispositivo de exibição. Essas transformações são especificadas por vários parâmetros que determinam: o tipo de projeção (perspectiva ou ortográfica); o centro de projeção (no caso da perspectiva) ou a direção de projeção (no caso da ortográfica); o sistema de coordenadas  $uvw$ ; o plano de imagem associado (tela virtual) e o volume de visão (que será uma pirâmide ou paralelepípedo, segundo utilizemos a projeção perspectiva ou ortográfica, respectivamente). Podemos imaginar a projeção ortográfica como uma projeção perspectiva cujo centro de projeção está no infinito.



Fig. 10. Transformações de visibilidade. Uma série de transformações convertem o sistema de coordenadas a que os modelos estão associados, de modo que certas operações de visualização possam ser realizadas de forma mais conveniente. Assim, os objetos descritos num sistema local de coordenadas são transformados para o espaço global da cena durante a modelagem. Em seguida, a transformação de normalização os leva para o espaço da câmara em que o plano de projeção está associado ao plano  $xy$  do espaço euclidiano e a linha de visão ao eixo  $z$ . Neste sistema de coordenadas, o volume de visão corresponde a um sólido canônico próprio para a operação de 'recorte' (clipping), que seleciona os objetos interiores ao campo de visão da câmara virtual. Esses modelos irão passar pela perspectiva que deforma a geometria em função das distâncias relativas ao centro de projeção. Isto faz com que os objetos próximos apareçam maiores que os distantes. Dadas as suas características, esse espaço normalizado é o ideal para o cálculo da visibilidade, pois o problema se reduz à comparação da profundidade entre os elementos de cada superfície. O passo final é mapear os pontos visíveis dos modelos para as coordenadas do dispositivo de exibição, onde os pontos da imagem serão coloridos de acordo com as intensidades determinadas pelo cálculo da iluminação.

concentram ao longo de uma direção, formando um cone de luz, como acontece nos refletores de teatro.

O processo de visualização compõe-se de várias etapas que, em conjunto, solucionam duas classes de problemas distintos: visibilidade e iluminação. Para que uma imagem da cena seja produzida, precisamos em primeiro lugar descobrir, utilizando as leis da óptica geométrica, quais são as superfícies visíveis em cada ponto da imagem e, em segundo lugar, por meio do cálculo da iluminação, encontrar a cor final da imagem em cada um desses pontos.

A determinação da visibilidade envolve inicialmente a transformação dos modelos do sistema global de coordenadas para o sistema de coordenadas da tela com uma projeção no plano de imagem (figura 10). Em seguida, devemos determinar, entre os modelos contidos no campo de visão da câmara virtual, os que estão mais próximos em relação a ela, pois estes estarão na frente dos demais, sendo portanto visíveis. Este é, basicamente, um problema de ordenação e corresponde a uma das etapas mais importantes da visibilidade.

Os métodos propostos para resolvê-lo são denominados 'algoritmos para eliminação de superfícies ocultas'. Eles diferem grandemente entre si, em relação a muitos aspectos que determinam a eficiência e a flexibilidade dos programas de visualização. Uma classe de algoritmos procura resolver o problema na precisão do modelo. É o caso dos métodos que classificam e subdividem as superfícies até que as relações de ordenação sejam exatamente determinadas. A outra classe de algoritmos solucionam aproximadamente o problema na resolução do dispositivo de exibição. Um exemplo é o método de  $z$ -buffer, em que cada ponto da imagem contém, além da cor, a distância em relação à câmara virtual. Na medida em que processamos cada modelo

da cena, comparamos sua profundidade naquele ponto com a dos pontos da imagem correspondente. A superfície só poderá ocupar aqueles pontos da imagem se os valores forem menores, isto é, mais próximos da câmara virtual.

Uma vez efetuada a seleção das superfícies visíveis, o passo seguinte é o cálculo da iluminação. Este problema consiste basicamente numa aproximação, em graus variáveis, das relações de dispersão da energia luminosa entre os elementos que compõem a cena. Para solucioná-lo, existem

duas abordagens possíveis, que correspondem respectivamente ao cálculo local e ao cálculo global da iluminação.

Para o cálculo local, utilizamos, além das fontes de luz, apenas informações restritas a uma vizinhança da superfície para a qual desejamos obter a cor final. Em geral, define-se uma equação de iluminação que inclui três termos, referentes às reflectâncias ambiente, difusa e especular da superfície (figura 11). Essa equação, que envolve parâmetros geométricos e de aparência do modelo, deve ser calculada para os pontos

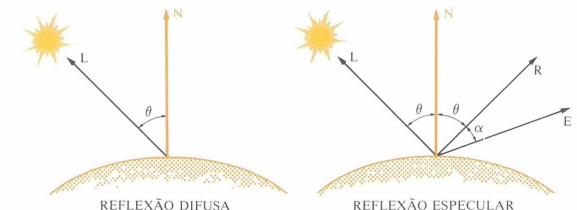


Fig. 11. Cálculo local da iluminação. Ele é obtido por meio da equação

$$I = I_a k_a + \sum_{j=1}^m L_j (k_d \cos \theta_j + k_s \cos^n \alpha_j)$$

que inclui os termos relativos à iluminação ambiente e às contribuições de cada fonte de luz para a reflexão difusa e especular. Os coeficientes  $k_a$ ,  $k_d$  e  $k_s$  correspondem às reflectâncias das superfícies relativas a cada um desses tipos de iluminação. O parâmetro  $I_a$  representa a intensidade de iluminação ambiente, que é constante em toda a cena. A contribuição difusa segue a lei de Lambert, segundo a qual a intensidade de luz refletida por um difusor perfeito é proporcional ao co-seno do ângulo  $\theta_j$ , formado pela direção da luz incidente e o vetor normal à superfície. A contribuição especular pode ser computada segundo diversos modelos com diferentes graus de complexidade. Na equação acima, usamos o método mais simples, pelo qual a intensidade de luz refletida de forma especular é aproximada pela  $n$ -ésima potência do co-seno do ângulo  $\alpha_j$ , formado pelo vetor de luz refletido e a direção de observação. O valor do expoente  $n$  determina a distribuição espacial da luz refletida especularmente. Valores grandes de  $n$  causam um brilho concentrado na direção da reflexão, enquanto valores baixos de  $n$  produzem o efeito oposto.

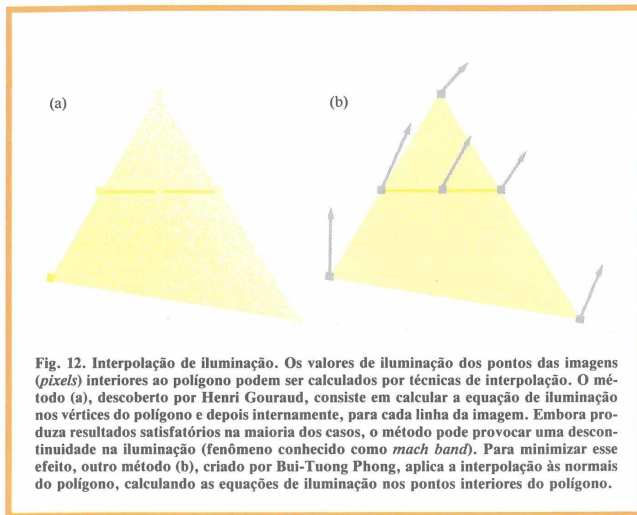


Fig. 12. Interpolação de iluminação. Os valores de iluminação dos pontos das imagens (*pixels*) interiores ao polígono podem ser calculados por técnicas de interpolação. O método (a), descoberto por Henri Gouraud, consiste em calcular a equação de iluminação nos vértices do polígono e depois internamente, para cada linha da imagem. Embora produza resultados satisfatórios na maioria dos casos, o método pode provocar uma descontinuidade na iluminação (fenômeno conhecido como *mach band*). Para minimizar esse efeito, outro método (b), criado por Bui-Tuong Phong, aplica a interpolação às normais do polígono, calculando as equações de iluminação nos pontos interiores do polígono.

visíveis da superfície em todas as fontes de luz da cena. No caso de objetos transparentes, adiciona-se posteriormente a contribuição transmitida pelas superfícies por eles encobertas. Para reduzir o número de pontos para os quais calculamos a iluminação, podemos empregar esquemas de interpolação, de modo a utilizar esses resultados na determinação da cor final em outros pontos da imagem, aumentando assim a eficiência do processo (figura 12).

O cálculo global da iluminação envolve potencialmente informações sobre todos os elementos dispostos na cena, simulando sua interação de maneira bem mais precisa do que o cálculo local. Os dois métodos empregados para esse propósito, o do 'traçado de raios' e o 'radiosidade', são bastante complexos, podendo sua solução demandar muitas horas de uso de um computador de grande porte.

O método do traçado de raios é o mais adequado para simular os efeitos especulares de reflexão e transmissão da luz entre as superfícies. Raios primários são traçados do centro de projeção da câmara, passando por cada ponto da imagem em direção à cena. Quando um raio encontra uma superfície, ele pode gerar raios secundários que são refletidos ou refratados segundo as leis da óptica, dependendo dos atributos do modelo. Em cada um desses pontos de interseção, resolvemos a equação de iluminação local para todas as fontes de luz na cena. Dessa forma temos 'árvores' de raios que correspondem ao percurso da energia luminosa desde as fontes de luz até o plano de imagem. A cor final dos pontos da imagem é calculada percor-

rendo-se cada uma dessas árvores no sentido inverso, acumulando a contribuição de todos os seus raios (figura 13).

O método de radiosidade é o ideal para simular os efeitos de iluminação difusa entre os elementos de cena. Tendo como ba-



Fig. 13. Traçado de raios. Nesta imagem, reproduzida por técnicas de traçado de raios, nota-se a simulação perfeita da reflexão e refração, bem como das sombras e da textura.

se a lei fundamental da conservação da energia em sistemas fechados, utiliza resultados conhecidos da engenharia termodinâmica. Essencialmente, buscamos um equilíbrio na troca de energia radiante, considerando as relações entre todos os elementos da cena. Dessa forma, como mostra a figura 14, todos os elementos têm influência na iluminação, seja diretamente, emitindo luz (no caso das fontes), seja indiretamente, refletindo-a (no caso das demais superfícies).

A principal diferença entre o método de traçado de raios e o da radiosidade está em que o primeiro simula reflexão especular, dependendo portanto do ponto de vista da câmara, ao passo que o segundo simula a reflexão difusa, que independe da visão do observador. Isto sugere uma complementaridade entre os dois métodos, que poderiam beneficiar-se mutuamente. De fato, pesquisas recentes mostram resultados promissores na formulação de um modelo integrado de iluminação global (figura 15).

A geração de imagens com alto grau de realismo, envolvendo cenas complexas, requer grande capacidade computacional. Isto se deve ao elevado número de elementos geométricos presentes em cada cena, somado aos cálculos necessários para a iluminação da mesma. Estudos estatísticos indicam que, nessa situação, são consumidas em média 300 operações para um cálculo



Fig. 14. Radiosidade. Efeitos de sombra e iluminação difusa obtidos pela reflexão da luz entre as superfícies com o método da radiosidade.

de um *pixel* 'interessante' da imagem (isto é, um *pixel* com informações relevantes para a cena). Se considerarmos que uma imagem de televisão possui 262.144 *pixels* (resolução 512 x 512), concluímos que são necessárias aproximadamente 78 milhões de operações para o seu cálculo.

Como podemos ver, são inúmeras as etapas a vencer para criar dados e transformá-los em imagens. São vários também os métodos utilizados para transpor cada etapa, o que gera muitos problemas de incompatibilidade entre programas desenvolvidos em lugares distintos com os mesmos objetivos. Em agosto de 1985, a Organização Internacional de Padrões (ISO) aprovou o GKS (*graphics kernel system*) e o adotou como padrão internacional de sistema gráfico. Mas, quando se estabelece um padrão numa área em desenvolvimento, corre-se o sério risco da defasagem tecnológica. A grande demora no estudo e estabelecimento do padrão faz com que a evolução da tecnologia possa não estar mais refletida nos parâmetros nele estabelecidos. Ocorreu isso com o GKS. Quando ele foi concebido ainda não havia a predominância dos dispositivos gráficos matriciais; além disso, os sistemas de processamento distribuído, com larga utilização de redes, não estavam estabelecidos. Há no momento uma proposta para o estabelecimento de um no-



Fig. 15. Radiosidade e traçado de raio. Esta imagem reflete o resultado das pesquisas atuais na área de iluminação, visando a obter um modelo de iluminação global que combine as vantagens dos métodos de traçado de raios e de radiosidade.



Globo Computação Gráfica

**Fig. 16. O avião Brasília.** Os dados que possibilitaram a geração da imagem do avião Brasília em computador foram obtidos do sistema de CAD (computer aided design) da Embraer. Após serem transformados para o formato utilizado pelo sistema gráfico da Globo Computação Gráfica, foram determinados os atributos de textura, luz, cor e material, fundamentais para que se obtivesse a cena acima. As nuvens da cena também foram sintetizadas no computador e são um exemplo de modelagem procedural.

Pelo seu poder de síntese, a computação gráfica se transformou na linguagem natural que liga o homem com o computador. Como consequência, ela se faz presente em todas as áreas de aplicação que utilizam esse instrumento. Além disso, tem ajudado a disseminar ainda mais o uso do computador em novas áreas.

O matemático John von Neumann, responsável pela concepção da estrutura lógica dos computadores, preconizou a importância dessas máquinas no desenvolvimento das ciências como um todo e da matemática em particular. Recentemente, com o advento da supercomputação e o avanço da tecnologia de estações gráficas, o sonho de von Neumann vem se transformando em realidade. A utilização da computação gráfica na pesquisa, em ciência pura e aplicada, tem contribuído para progressos significativos na compreensão de fenômenos fundamentais para a evolução do conhecimento. Essa área, que se vem expandindo rapidamente, tal a sua importância, já ganhou nome próprio: 'visualização científica' (ver 'Superfícies mínimas na computação gráfica').

Ainda no campo científico, a computação gráfica é uma ferramenta poderosa na visualização de dados multidimensionais. Para um exemplo simples dessa aplicação, remetemos o leitor ao artigo 'O hiper-cubo', indicado nas sugestões de leitura.

Na área de automação industrial, a participação da computação gráfica é irreversível: a estação gráfica substitui a tradicional prancheta de trabalho. O projeto é concebido e criado com o auxílio do computador e, uma vez pronto, sua fabricação pode ser agilizada, também de forma automática, por meio de máquinas de controle numérico. A computação gráfica é fundamental nesse processo, não apenas para a criação e visualização dos elementos do projeto, mas também para a simulação visual com modelos, o que permite que falhas sejam detectadas e corrigidas antes do processo de fabricação, com redução de gastos e diminuição de prazos.

A área de entretenimento foi certamente a que mais contribuiu para a penetração da computação gráfica no cotidiano de nossa sociedade. Quem não ficou fascinado pela magia dos vídeo-games? Quem ainda não admirou os efeitos especiais computadorizados, cada vez mais presentes nos filmes de ficção científica? Para ficarmos mais perto, bastaria de fato mencionar as fascinantes vinhetas de televisão que invadem nossas casas diariamente.

Utilizando técnicas de uma área da computação gráfica conhecida como 'síntese de imagens', essa aplicação tem exigido a descoberta de novos algoritmos para a criação de imagens fotorrealistas em computador. No Brasil, a Globo Computação Gráfica vem desenvolvendo pesquisas nessa

## SUPERFÍCIES MÍNIMAS NA COMPUTAÇÃO GRÁFICA

A matemática esteve fortemente ligada às origens do computador, através dos trabalhos de J. von Neumann e de A. Turing (ver 'O leitor pergunta', em *Ciência Hoje* n° 52). Apesar disso, ela foi uma das últimas ciências a se utilizar das técnicas computadorizadas de visualização de dados. Hoje em dia, no entanto, já é muito grande o número de situações nas quais o uso de técnicas de computação gráfica teve influência, algumas vezes decisiva, para que se encontrasse a solução de determinado problema. Um dos exemplos mais interessantes é o estudo das superfícies mínimas, que são o modelo matemático mais adequado para representar o que ocorre com películas finas quando submetidas a forças de tensão superficial. Um modelo físico que permite grande número de experimentos sobre este tema é o da película que se obtém mergulhando um contorno de arame em uma solução de água e sabão (ver 'Matemática das películas de sabão', em *Ciência Hoje* n° 11).

A existência de exemplos é muito importante para o desenvolvimento de uma teoria matemática, pois eles funcionam como uma coleção de protótipos para testes de novos resultados e conjecturas. Atualmente, os experimentos com superfícies mínimas têm sido realizados com a ajuda de figuras geradas em computador, abandonando-se assim as tradicionais películas de sabão. Há nisso uma grande

área desde 1978. Tendo sido a pioneira na introdução dessa tecnologia em nosso país, a empresa mantém uma equipe de pesquisadores e vem desenvolvendo sistemas de animação por computador para utilização em vinhetas e comerciais de televisão.

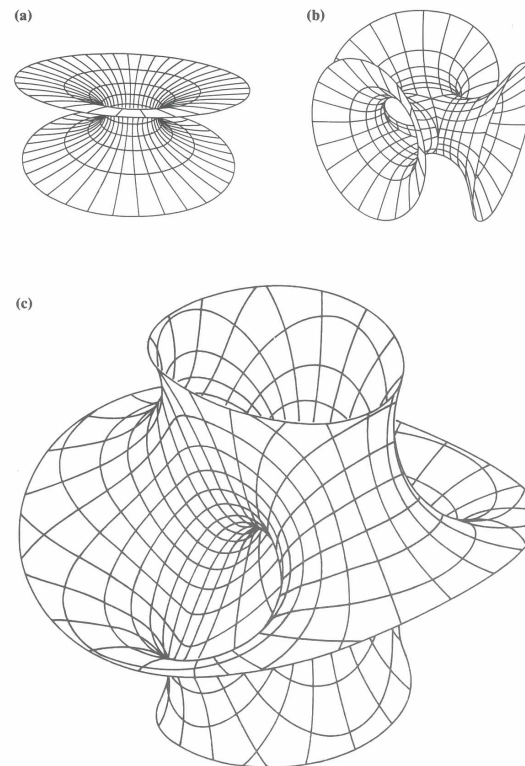
As aplicações da computação gráfica também se fazem presentes em medicina, simulação, robótica, gerência empresarial, cartografia, publicação e educação, para mencionar apenas as mais conhecidas.

Desde o sistema Sketchpad, de I. Sutherland, até nossos dias, passaram-se 26 anos. Podemos considerar ser esta a idade da computação gráfica. Pouco tempo. Porém, o suficiente para que ela tenha alterado o modo de pensar de cientistas das mais diversas áreas e para que possa, ela mesma, ser considerada uma ciência.

vantagem: passa-se a determinar a forma da superfície apenas com equações matemáticas, eliminando-se as restrições inerentes a qualquer modelo físico.

Do ponto de vista matemático, uma superfície no espaço é uma transformação de um espaço de duas dimensões (M), chamado espaço de parâmetros, no espaço-ambiente de três dimensões. Em geral, o espaço M é um subconjunto do plano.

Mas os exemplos mais interessantes são obtidos quando se tomam espaços com topologia mais complexa. A topologia da superfície é determinada pela topologia do espaço M. Mesmo que o espaço de parâmetros possua uma topologia simples, a transformação que define a superfície pode apresentar grande complexidade. Se a superfície não possui auto-interseções, dizemos que ela é 'mergulhada'.



**Fig. 17. Em (a), o catenóide, que é uma superfície mínima obtida a partir da esfera, com a omissão de dois pontos; pode-se observar que, quando prolongados, seus 'fins' não se intersectam; trata-se, portanto, de uma superfície mergulhada. Em (b), o catenóide de três fins, uma superfície mínima também obtida a partir da esfera, mas com a omissão de três pontos; não é uma superfície mergulhada, pois seus fins se intersectam quando prolongados. Em (c), a 'superfície de Costa'. A visualização, em computador, da superfície descoberta pelo matemático brasileiro Celso J. da Costa, do Impa, permitiu a compreensão de suas propriedades e resolveu uma questão importante para a teoria das superfícies mínimas, que começou a desenvolver-se há quase 200 anos. Esta foi a primeira superfície descoberta que apresenta as seguintes características: é completa, mergulhada e tem topologia simples.**

Podemos obter uma família de exemplos de superfícies mínimas se tomarmos o espaço M como sendo uma esfera da qual se omita um número finito de pontos. Se omitirmos apenas um ponto, obtém-se o plano e o helicóide. Se omitirmos dois pontos, só se pode obter o catenóide mostrado na figura 17(a). Observe-se que a cada ponto omitido corresponde uma parte da superfície — chamada 'fim' da superfície — que se estende para o infinito. Se omitirmos mais de dois pontos, obteremos uma família de superfícies mínimas não mergulhadas. Em 17(b) mostramos o catenóide de três fins, exemplo obtido pela retirada de três pontos.

Acreditava-se que, além do plano, do helicóide e do catenóide não existiam outros exemplos de superfícies mínimas mergulhadas e dotadas de topologia simples. Mas, em 1982, em sua tese de doutoramento no Impa, Celso José da Costa mostrou um novo exemplo de superfície mínima obtido com o mesmo processo, ou seja, pela omissão de pontos de uma superfície de topologia simples. Ele tomou o espaço de parâmetros M como sendo o 'toro' com três pontos omitidos e obteve um novo exemplo de superfície mínima que, por suas propriedades matemáticas, apresentava evidências de que deveria ser mergulhada. Utilizando técnicas de computação gráfica, David Hoffman e William H. Meeks III, da Universidade de Massachusetts (EUA), puderam comprovar este fato. A 'superfície de Costa', mostrada na figura 17(c), transformou-se assim no primeiro exemplo de uma superfície mínima, mergulhada e com topologia simples, distinto das três outras superfícies. Utilizando as mesmas técnicas, exemplos análogos foram descobertos posteriormente.



### SUGESTÕES PARA LEITURA

- SUTHERLAND I. E., 'Computer inputs and outputs', *Scientific American*, setembro, 1966.  
SUTHERLAND I. E., 'Computer displays', *Scientific American*, junho, 1970.  
VAN DAM C., 'Computer software for graphics', *Scientific American*, setembro, 1984.  
CROW F., 'Shaded computer graphics in the entertainment industry', *IEEE Computer*, março, 1978.  
MACHOVER C., 'A brief, personal history of Computer Graphics', *IEEE Computer*, novembro, 1978.  
WHITTED T., 'Some recent advances in Computer Graphics', *Science*, vol. 215, 12 de fevereiro de 1982.  
GOMES J. M., SANTOS G. T., 'O hiper-cubo', *Matemática Universitária*, n° 6, dezembro de 1987.