

Um Algoritmo Híbrido de Radiosidade e Ray-Tracing para a Geração de Imagens Realísticas

HELIO NIGRI ¹
MARCELO DREUX ²
RUBENS NASCIMENTO MELO ³

¹PROMON Engenharia
Praia do Flamengo, 154
22210-030 Rio de Janeiro, RJ, Brasil

²ICAD - Laboratório de CAD Inteligente
PUC-Rio - Depto. de Engenharia Mecânica
Rua Marquês de São Vicente, 225
22453-900 Rio de Janeiro, RJ, Brasil
dreux@icad.puc-rio.br

³ICAD - Laboratório de CAD Inteligente
PUC-Rio - Depto. de Informática
Rua Marquês de São Vicente, 225
22453-900 Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Abstract.

This work presents the RadioRay System, a hybrid model that combines the radiosity method with ray tracing, which aims to simulate the global illumination in computer generated images. It is proposed a new technique called Progressive Technique with Fixed Number of Steps, which allows arbitrary geometry to be used in the scene description. Since a hybrid radiosity/ray tracing model is adopted it is possible to compute the light propagation on diffuse and specular surfaces.

1- Introdução

A área de síntese de imagens realísticas por computador apresentou um grande desenvolvimento com a utilização de modelos de iluminação global como a técnica do ray tracing [WHIT80] [COOK84] e o método da radiosidade [GORA84] [COHE85] [COHE86]. No entanto, ambos os métodos não apresentam um tratamento fisicamente correto para modelar a propagação da luz em ambientes contendo superfícies especulares e difusas.

O método do ray tracing trouxe um dramático aumento no realismo das imagens ao conseguir representar fenômenos como o espelhamento e a refração em superfícies especulares. No entanto, a reflexão da luz em superfícies difusas, que representam a maioria das superfícies em ambientes reais, não é tratada corretamente. O método da radiosidade, por sua vez, representou um novo estágio para as aplicações inter-

essadas em imagens de modelos reais por apresentar um tratamento fisicamente correto para a reflexão da luz em superfícies difusas. No entanto, superfícies especulares não são tratadas por este método.

O sistema RadioRay propõe uma forma de combinar o método da radiosidade e o ray tracing com o objetivo de simular a iluminação global em ambientes complexos que contenham tanto superfícies especulares como difusas, além de tratar superfícies com geometria arbitrária. Sua utilização possibilita a representação de efeitos tais como recortes de sombra e penumbra, resultado do tratamento de fontes de luz com área, além do espelhamento e da refração. Com isso, por exemplo, um arquiteto pode ter na tela de seu computador não apenas a maquete eletrônica de seu projeto, mas também um estudo detalhado dos efeitos causados pela iluminação escolhida em todos os objetos da cena.

2 - A Busca de uma Solução Geral para o Problema de Iluminação

Extensões às formulações básicas do ray tracing e do método da radiosidade apareceram na literatura com o intuito de encontrar uma solução global que resolvesse as respectivas deficiências de cada método.

2.1 - Soluções Baseadas no Método da Radiosidade

A equação geral da radiosidade é dada por [SPAR78] [GORA84]:

$$b_j = e_j + \rho_j \sum_{i=1}^n b_i F_{ji} \quad j = 1, n \quad (1)$$

onde b_j é a intensidade correspondente à radiosidade da superfície j
 e_j é a intensidade correspondente à energia emitida pela superfície j
 ρ_j é a reflectividade da superfície j
 F_{ji} é a fração do fluxo de energia que sai de j e chega em i , sendo denominada de fator de forma.

O cálculo do fator de forma é obtido por [SPAR78]:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{(\cos\theta_i \cos\theta_j)}{\pi r^2} dA_j dA_i \quad (2)$$

onde θ_i é o ângulo entre a normal à superfície i e a direção da superfície j
 dA_i área do elemento diferencial i
 r distância entre as superfícies i e j

Para se chegar à equação 1, as superfícies são consideradas como sendo idealmente difusas. A solução da equação consiste em subdividir as superfícies em áreas discretas ou patches poligonais onde assume-se radiosidade constante. A intensidade de cada patch é expressa em termos das intensidades de todos os outros patches no ambiente. Isso resulta num sistema de n equações e n incógnitas, onde n é o número de patches.

A solução da equação do fator de forma (equação 2) é a que apresenta maiores dificuldades, podendo-se afirmar que é o ponto crítico na implementação do método.

Para síntese de cenas complexas utilizando o método da radiosidade uma solução numérica para o cálculo do fator de forma e um método para subdivisão do ambiente são necessários. Foram desenvolvidos diversos algoritmos utilizando o método da radiosidade [GORA84], [COHE85] [COHE86] dos quais merece destaque a Solução por Refinamentos Progressivos proposta por Cohen et al [COHE88].

Esta solução propõe o cálculo da contribuição que cada patch envia para o resto do ambiente, reduzindo drasticamente o tempo de processamento e o armazenamento requerido no método da radiosidade convencional.

A solução convencional calcula a contribuição que cada patch recebe de todos os outros elementos do ambiente, atualizando apenas a radiosidade relativa a este patch. Pela solução progressiva toda a imagem é atualizada durante cada interação. Não é necessário calcular a contribuição enviada por todos os elementos, pois em muitos deles a contribuição é insignificante para o resultado final. Portanto calcula-se a contribuição de cada patch em ordem decrescente de radiação de energia.

Desta forma, evidentemente, a maioria das fontes de luz são calculadas primeiro, pois inicialmente todos os outros elementos tem radiosidade zero.

Em [IMME86] é proposto uma extensão no cálculo da radiosidade para incluir o tratamento de superfícies especulares. Ao invés de calcular o relacionamento entre cada patch e os demais patches que compõe o ambiente (expresso pelos fatores de forma na solução convencional), é calculado o relacionamento entre as direções de reflexão destes patches. Após o cálculo destes relacionamentos, passa-se à solução do sistema de equações que fornecerá a intensidade em cada direção para cada patch. Apesar de teoricamente correta, esta solução se torna impraticável pelo alto custo computacional e de armazenamento mesmo para as cenas mais simples.

2.2 - Soluções Baseados no Ray Tracing

O algoritmo do ray tracing clássico [WHIT80] calcula a iluminação apenas nas faces visíveis. A utilização de métodos estocásticos [COOK84] [KAJI86], onde diversos raios são distribuídos por pixel em diferentes direções controladas por uma função, ampliou o inverso de reflexões possíveis de serem tratadas pelo método do ray tracing. Isto possibilitou uma boa aproximação da iluminação global em superfícies difusas. No entanto, esta solução tem um custo muito alto devido à grande quantidade de raios que necessitam ser traçados. Além disso, situações em que a superfície difusa não recebe iluminação direta da fonte luminosa, como por exemplo o trecho do chão situado embaixo de uma mesa, são particularmente difíceis de serem tratadas.

Uma outra linha baseada no ray tracing com o objetivo de calcular a iluminação em superfícies difusas, é a solução em passos. O primeiro passo consiste em traçar raios a partir das fontes luminosas (ray tracing a partir das fontes de luz) e o segundo passo é composto de um ray tracing a partir

da posição do observador (ray tracing convencional). Esta linha é seguida em [ARVO86] [CHAT87] e [HECK90].

2.3 - A Solução em dois Passos Combinando o Método da Radiosidade e Ray Tracing

Esta solução utiliza o método da radiosidade para o cálculo da iluminação em superfícies difusas e o ray tracing para o cálculo da iluminação em superfícies especulares. Ela foi apresentada primeiramente por Wallace et al [WALL87], sendo posteriormente adotada em outros trabalhos [MALL88] [SHAO88] [SILL89]. Uma breve descrição destes algoritmos é apresentada em [NIGR91].

Analisando as pesquisas recentes percebe-se que a solução em dois passos é uma estratégia poderosa para simular a iluminação global e que provavelmente será a base para o desenvolvimento de novos algoritmos de iluminação. A seguir é descrito o sistema Radoray, desenvolvido dentro desta filosofia.

3 - Radoray

O Radoray utiliza uma variação do método da radiosidade para o cálculo da reflexão difusa e a técnica do ray tracing convencional para a determinação das superfícies visíveis e cálculo da reflexão especular. Para atender à premissa de permitir a utilização de superfícies não poligonais, foi desenvolvida uma técnica para o cálculo da radiosidade. Esta técnica, denominada Solução Progressiva com Passos Fixos, é a questão central do algoritmo apresentado.

3.1 - Solução Progressiva com Passos Fixos para o Cálculo da Radiosidade

A técnica da Solução Progressiva com Passos Fixos faz uma adaptação simplificada do Método de Refinamentos Progressivos, extendendo-o para representações não poligonais. Inicialmente, a técnica utiliza o conceito de superfícies fontes. Estas superfícies são definidas explicitamente pelo usuário e representam as fontes de luz e as superfícies muito brilhosas, isto é, que refletem muita luminosidade em função da proximidade às fontes de luz. A princípio o usuário pode considerar apenas as fontes de luz como superfícies fontes e após os primeiros resultados acrescentar, caso ache necessário, outras superfícies. No entanto, na maioria dos casos, é suficiente considerar apenas as fontes de luz. Estas superfícies fontes devem ser polígonos planos de tamanho pequeno, seguindo as mesmas restrições impostas pela solução convencional do método da radiosidade. Essas superfícies determinam o número de passos da solução progressiva, o que dá origem ao nome da técnica.

A modelagem das superfícies fontes por polígonos é a única restrição imposta pela técnica progressiva com passos fixos. Isso é necessário para a utilização da fórmula de cálculo dos fatores de forma.

É interessante notar que se modelarmos todo o ambiente utilizando superfícies fontes a solução recai no Método de Refinamentos Progressivos. De fato, como as superfícies fontes são poligonais e o número máximo de passos corresponde ao número de superfícies fontes, isso corresponderia ao método apresentado em [COHE88] com todos os passos calculados.

O cálculo das radiosidades finais é feito em duas etapas, conforme descrito pelo diagrama abaixo:

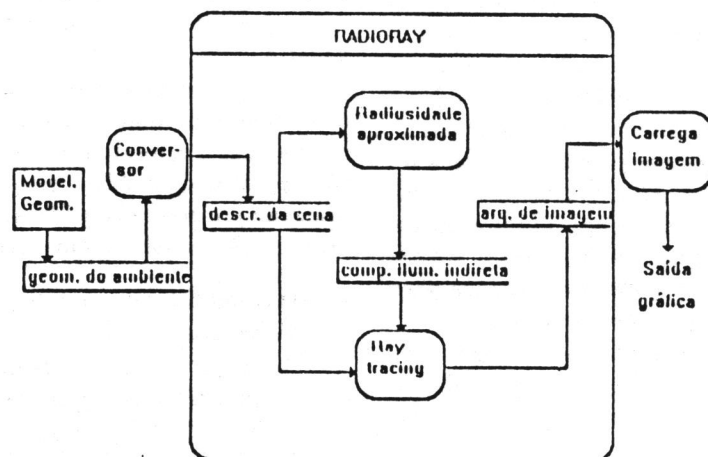


Figura 1. Diagrama de fluxo de dados para o ambiente de síntese de imagens realistas onde está inserido o Radoray [NIGR91]

A primeira etapa tem como objetivo calcular as componentes de iluminação indireta para cada superfície. Isso é feito em função da quantidade de energia "não enviada" ao ambiente, que é calculada utilizando-se o princípio da conservação de energia e o fato de conhecermos a quantidade de energia "enviada" (determinada pelas superfícies fontes). Essa energia "não enviada" será posteriormente distribuída proporcionalmente por todas as superfícies do ambiente através de um fator denominado componente de iluminação indireta.

Esta componente é análoga à componente ambiental da solução por refinamentos progressivos, com a diferença que esta última é utilizada apenas para a exibição, isto é, não é tratada como parte da solução. No entanto, sua utilização trouxe excelentes resultados, conforme comentado em [COHE88], onde uma cena foi gerada pelo Método dos Refinamentos Progressivos calculando-se apenas dois *hemi-cubes* e adicionando-se a componente ambiental.

Esta constatação reforça a proposta da Técnica Progressiva com Passos Fixos que incorpora a determinação da componente de iluminação indireta no cálculo das radiosidades finais. Além disso, ela se utiliza da técnica do ray tracing para o cálculo do fator de forma que é mais eficiente que o *hemi-cube* utilizado no método de refinamentos progressivos.

Antes do cálculo das componentes de iluminação indireta, é necessário calcular as radiosidades em todas as superfícies do ambiente. No entanto, o ambiente não está representado por patches, mas sim por polígonos, esferas, cilindros, etc. O cálculo das radiosidades em todos os pontos das superfícies que compõem o ambiente é computacionalmente inviável. Para resolver este problema adotou-se a seguinte simplificação: nas primitivas poligonais calcula-se as radiosidades nos vértices e nas demais primitivas o cálculo é feito nos vértices dos paralelepípedos que envolvem o objeto. Com isso calcula-se os valores aproximados das radiosidades em todo o ambiente.

Esta simplificação é válida pois esses valores serão utilizados basicamente para o cálculo da componente de iluminação indireta, onde o importante é manter a conservação de energia do ambiente. No entanto, esses valores também podem ser usados para uma visualização simplificada das radiosidades.

Esse cálculo é feito apenas uma vez para cada ambiente. Esses valores são armazenados podendo ser utilizados na geração de novas cenas com diferentes posições do observador.

A segunda etapa do cálculo da radiosidade é realizada durante o processamento do ray tracing.

Para o cálculo da radiosidade final não se pode simplesmente interpolar as radiosidades calculadas na primeira fase, pois além dos erros inerentes ao cálculo simplificado, não seria possível definir corretamente as bruscas variações nos valores das radiosidades em situações como, por exemplo, a existência de recortes de sombra. No método tradicional isso é resolvido através da subdivisão adaptativa das superfícies, que aumenta ainda mais a indesejada dependência entre a geometria e o cálculo do sombreado. No sistema **Radiatoray** isso foi resolvido utilizando-se a idéia do ray tracing como método de amostragem para o cálculo do fator de forma [WALL89]. Esta técnica utiliza o mesmo conceito apresentado no teste de sombra do ray tracing, só que, neste caso, para determinar a quantidade de energia que sai de uma superfície i e chega na superfície j . Portanto, esta parte do cálculo dos fatores de forma é feita apenas para as superfícies visíveis ao observador. A radiosidade final é o resultado da soma deste cálculo com a componente de iluminação indireta para esta superfície.

3.2 - Limitações do Sistema

As limitações do sistema se referem principalmente às simplificações adotadas, que têm o intuito de viabilizar o cálculo da radiosidade em ambientes não poligonais. As principais simplificações são as seguintes:

- A técnica da solução progressiva com passos fixos não possibilita que a solução prossiga automaticamente até onde o usuário desejar, como na técnica dos refinamentos progressivos [COHE88]. Há, no entanto, a possibilidade do usuário aumentar o número de passos aumentando o número de superfícies fontes, o que requer um trabalho adicional por parte do usuário.

- As simplificações existentes no cálculo da componente de iluminação indireta. Inicialmente os valores das radiosidades em primitivas não planas são aproximados. Além disso, a componente de iluminação indireta é considerada constante para cada face, o que também é uma aproximação.

4 - Análise Comparativa com Outros Sistemas Híbridos

A tabela 1 traz um resumo dos métodos de cálculo empregados por Wallace et al. [WALL87], Sillion e Puech [SILL89] e pelo **Radiatoray** para a determinação da radiosidade e da reflexão especular em um ambiente.

Algoritmo	Geometria das superf. p/ calcular f. de forma	Método de cálculo do fator de forma	Geometria das superf. p/ calcular radiosidade	Cálculo da radiosidade	Reflexão especular	Observação
[WALL87]	poligonal	<i>Hemi-cube</i> com fator de forma para espelho	poligonal	método da radiosidade completo	<i>Z-buffer</i> modificado	só admite espelho plano como superfície especular
[SILL89]	arbitrária	<i>ray tracing</i> recursivo	poligonal	método da radiosidade completo	<i>ray tracing</i> clássico	
Radoray	arbitrária	<i>ray tracing</i>	arbitrária	solução progressiva com passos fixos	<i>ray tracing</i> clássico	cálculo da radiosidade aproximado pela componente de iluminação indireta

Tabela 1 - Análise comparativa de sistemas híbridos [NIGR91]

5 - Resultados Obtidos

As figuras apresentadas a seguir mostram imagens geradas pelo **Radoray** nos computadores do laboratório de CAD Inteligente da PUC-Rio. O tempo de processamento depende da quantidade de objetos, do número de superfícies fontes e do número de pontos utilizado para a geração de cada imagem.

A cena da figura 2 contém 25 objetos, sendo que sete foram modelados como superfícies fontes. Para simular a luz do abajur, utilizou-se duas fontes de luz poligonais nas partes superior e inferior da cúpula. Esta cúpula foi considerada como sendo opaca.

A figura 3 contém 5 esferas em cima de uma mesa com um espelho plano, totalizando 24 objetos na cena. Das duas esferas com superfícies espelhadas apenas uma possui reflexão total.

A figura 4 contém duas superfícies com reflexão total (um espelho plano e uma semi-esfera) com dois níveis de recursão. A cena contém 43 objetos e 11 superfícies fontes.

A cena apresentada na figura 5 foi gerada pelo método do *ray tracing* clássico. Como no método do *ray tracing* as fontes de luz são pontuais, utilizou-se um ponto de luz ao invés da luminária no teto.

6 - Conclusão

O sistema **Radoray** apresenta uma forma de

combinar os métodos da radiosidade e do *ray tracing*, mantendo as vantagens de cada um na solução do problema da iluminação global. Com isso, utiliza-se as radiosidades para a determinação da reflexão em superfícies difusas, possibilitando a representação de recortes de sombra e penumbra, devido ao tratamento de fontes de luz com área, aliado ao cálculo de espelhamento e refração em superfícies especulares provenientes da técnica do *ray tracing*.

Para solucionar o cálculo da radiosidade em ambientes não poligonais foi proposta a Solução Progressiva com Passos Fixos. Nesta técnica apenas algumas superfícies, denominadas superfícies fontes, são necessariamente poligonais. Esta técnica possibilita tornar o cálculo da radiosidade independente do modelo geométrico, facilitando a interface com os sistemas de modelagem tridimensional, o que não ocorre nas soluções encontradas na literatura.

No entanto, simplificações e aproximações tiveram que ser feitas para viabilizar esta técnica. O cálculo da componente de iluminação indireta utiliza valores aproximados das radiosidades. Além disso, esses valores são considerados constantes em grandes áreas. Apesar das aproximações, o princípio da conservação de energia no ambiente é mantido.

Uma vez que está garantida a conservação da

energia radiante, os erros inerentes a estas aproximações irão recair na distribuição desta energia indireta pelo ambiente. Quanto maior o número de superfícies fontes modeladas, menor será o valor da componente de iluminação indireta e, portanto, menor será este erro.

A técnica da solução progressiva com passos fixos acompanha as tendências atuais no sentido de considerar inicialmente as superfícies com maior luminosidade. A proposta do cálculo da radiosidade por refinamentos progressivos [COHE88] conclui que o tratamento uniforme de cálculo para todas as superfícies aumenta consideravelmente o tempo de processamento sem trazer grandes benefícios para a solução final. Esta conclusão é intuitiva, pois é fácil compreender que algumas superfícies refletem uma parcela de luz desprezível para o resto do ambiente.

Tendo em vista a qualidade das imagens geradas e as novas possibilidades que esta técnica trouxe, conclui-se que a estratégia adotada é pertinente. Em outras palavras, é vantajoso perder-se um pouco da precisão no cálculo das radiosidades de cada superfície (mantendo-se a conservação de energia no ambiente como um todo) nos modelos híbridos, pois os resultados variam muito pouco e ganha-se muito em flexibilidade na utilização do sistema.

7 - Bibliografia

- ARVO86 - J. Arvo, "Backward Ray Tracing", Development in Ray Tracing, SIGGRAPH Course Notes, vol. 12, AGO 1986.
- CHAT87 - S. Chattopadhyay & Fujimoto, "Bi-Directional Ray Tracing", Computer Graphics 1987: Proceedings of CG International 87, Springer-Verlag, Tokio, 1987.
- COHE85 - M. F. Cohen & D. P. Greenberg, "A Radiosity Solution for Complex Environments", ACM Computer Graphics (SIGGRAPH85), JUL 1985, vol. 9, n. 3, pp. 31-40.
- COHE86 - M.F. Cohen, D.P. Greenberg, D.S. Immel & P.J. Brock, "An Efficient Radiosity Approach for Realistic Image Synthesis", IEEE Computer Graphics and Applications, MAR 1986, vol. 6, n. 2, pp. 26-33.
- COHE88 - M. F. Cohen, S. E. Chen, J. R. Wallace & D. P. Greenberg, "A Progressive Refinement Approach to Fast Radiosity Image Generation", ACM Computer Graphics (SIGGRAPH88), AUG 1988, vol. 22, n. 4, pp. 75-84.
- COOK84 - R.L.Cook, T. Porter & L. Carpenter, "Distributed Ray Tracing", ACM Computer Graphics (SIGGRAPH84), JUL 1984, vol. 18, n. 3, pp. 137-145.
- GORA84 - C. M. Goral, K. E. Torrance, D. P. Greenberg & B. Battaile, "Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces", ACM Computer Graphics (SIGGRAPH84), JUL 1984, vol. 18, n. 3, pp. 213-222.
- HECK90 - P. S. Heckbert, "Adaptive Radiosity Textures for Bidirectional Ray Tracing", ACM Computer Graphics (SIGGRAPH 90), AUG 1990, vol. 24, n. 4, pp. 145-154.
- IMME86 - D. S. Immel, M. F. Cohen & D. P. Greenberg, "A Radiosity Method for Non-Diffuse Environments", ACM Computer Graphics (SIGGRAPH 86), AUG 1986, vol. 20, n. 4, pp. 133-142.
- KAJI86 - J.T. Kajiya, "The Rendering Equation", ACM Computer Graphics (SIGGRAPH 86), AUG 1986, vol. 20, n. 4, pp. 143-150.
- MALL88 - H. Nigri, "Técnicas Existentes para Síntese de Imagens Realistas por Computador", IV Congresso da Associação Brasileira de Usuários Intergraph, OUT 1989, pp. 150-165.
- NIGR91 - H. Nigri, "Uma Solução Híbrida para Sínteses de Imagens Realistas Combinando o Método da Radiosidade com o Ray Tracing", Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Informática, JUL 1991.
- SHAO88 - M. Shao, Q. Peng & Y. Liang, "A New Radiosity Approach by Procedural Refinements for Realistic Image Synthesis", ACM Computer Graphics (SIGGRAPH88), AUG 1988, vol. 22, n. 3, pp. 93-101.
- SILL89 - F. Sillion & C. Puech, "A General Two-Pass Method Integrating Specular and Diffuse Reflection", ACM Computer Graphics (SIGGRAPH89), JUL 1989, vol. 23, n. 3, pp. 335-344.
- SPAR78 - E. M. Sparrow & R.D. Cess. "Radiation Heat Transfer", Hemisphere Publishing Corp., Washington DC., 1978.
- WALL87 - J.R. Wallace, M. F. Cohen & D. P. Greenberg, "A Two-Pass Solution to the Rendering Equation: A Synthesis of Ray Tracing and Radiosity Techniques", ACM Computer Graphics (SIGGRAPH87), JUL 1987, vol. 2, n. 4, pp. 311-328.
- WHIT80 - T. Whitted, "An Improved Illumination Model for Shaded Display", Communications of the ACM, JUN 1980, vol. 23, n. 6, pp. 343-349.
- WALL89 - J. R. Wallace, K. A. Elmquist & E. A. Haines, "A Ray Tracing Algorithm For Progressive Radiosity", ACM Computer Graphics (SIGGRAPH 89), JUL 1989, vol. 23, n. 3, pp. 315-324.

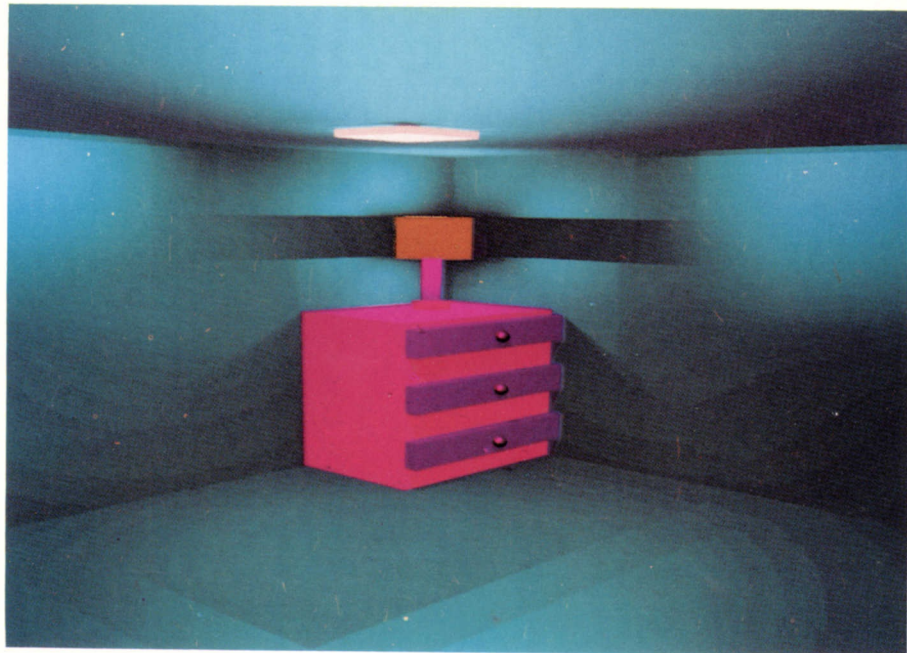


Figure 2 - Cena com um armário e um abajur ligado



Figure 3 - Cinco esferas em cima da mesa e um espelho plano



Figure 4 - Cenas com espelhos, armário, luminária e abajur

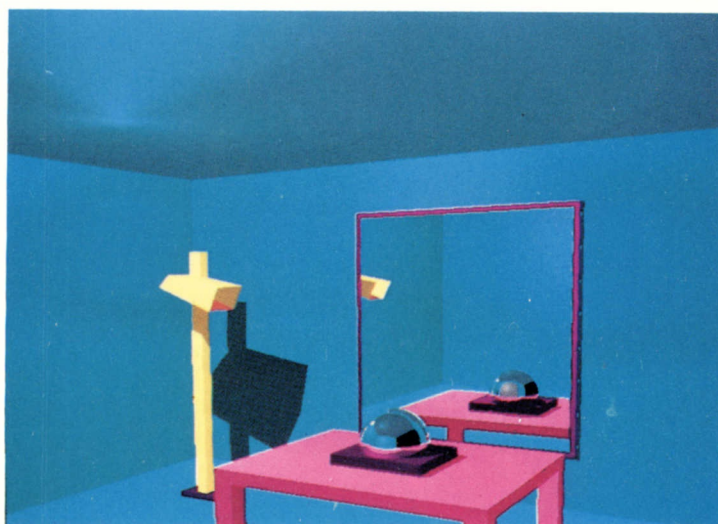


Figure 5 - Imagem gerada pelo algoritmo de ray tracing clássico