



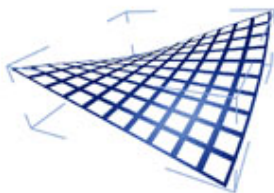
Universidade do Minho

# Computação Gráfica: Iluminação Global de Alta Fidelidade

Luís Paulo Peixoto dos Santos

Departamento de Informática  
Escola de Engenharia  
Universidade do Minho

31 de Março de 2004



**mestrado em computação gráfica  
e ambientes virtuais**  
**universidade do minho**



# Conteúdo

<b>I</b>	<b>Fundamentos Teóricos</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>3</b>
1.1	Alta Fidelidade versus Fotorealismo . . . . .	3
1.2	Iluminação Local <i>versus</i> Global . . . . .	6
1.3	A Natureza e Representação da Luz . . . . .	7
1.4	O Processo de Síntese de Imagens . . . . .	12
<b>2</b>	<b>BRDF e a Equação de Rendering</b>	<b>25</b>
<b>II</b>	<b>Algoritmos de Iluminação Global</b>	<b>27</b>
	<b>Apêndices</b>	<b>29</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>31</b>



# Lista de Figuras

1.1	Fotorealismo <i>versus</i> Alta Qualidade . . . . .	5
1.2	Iluminação Local . . . . .	7
1.3	Iluminação Global . . . . .	7
1.4	Ângulo Sólido e Direcção 3D . . . . .	10
1.5	Área Projectada . . . . .	11
1.6	O processo de síntese de imagens . . . . .	13
1.7	Plano da Imagem . . . . .	15
1.8	Modelos de Iluminação Local . . . . .	16
1.9	Modelo de Phong . . . . .	18
1.10	Factores de complexidade no transporte de luz . . . . .	20
1.11	Mapeamento de tons . . . . .	21
1.12	Mapeamento de tons local . . . . .	22



# Lista de Tabelas

1.1	Quantidades Radiométricas e Fotométricas . . . . .	9
-----	--	---

# Parte I

## Fundamentos Teóricos





# Capítulo 1

## Introdução

### Conteúdo

---

<b>1.1</b>	<b>Alta Fidelidade versus Fotorealismo . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>1.2</b>	<b>Iluminação Local <i>versus</i> Global . . . . .</b>	<b>6</b>
<b>1.3</b>	<b>A Natureza e Representação da Luz . . . . .</b>	<b>7</b>
1.3.1	Radiometria . . . . .	9
1.3.2	Fotometria . . . . .	12
<b>1.4</b>	<b>O Processo de Síntese de Imagens . . . . .</b>	<b>12</b>
1.4.1	Modelo Geométrico do Mundo . . . . .	13
1.4.2	Modelo de Iluminação Local . . . . .	15
1.4.3	Transporte de Luz . . . . .	19
1.4.4	Visualização da Imagem . . . . .	20

---

### 1.1 Alta Fidelidade versus Fotorealismo

A síntese de imagens por computador consiste no processo de, a partir de uma descrição geométrica tri-dimensional de um mundo, produzir uma imagem bi-dimensional correspondente a um determinado ponto de observação.

A descrição geométrica do mundo, normalmente designada por modelo do mundo, pode ter um grau de detalhe e precisão arbitrário, dependendo da aplicação a que se destina. Esta descrição pode incluir, além da geometria, as propriedades dos materiais presentes

na cena, as características e posições das fontes de luz, atributos do meio em que a luz se propaga, etc.

A síntese de imagens a partir deste modelo do mundo baseia-se num conjunto de regras que podem ser mais ou menos elaboradas, dependendo da qualidade final pretendida. A este conjunto de regras chamamos modelo de iluminação. Este descreve a forma como a luz é transportada desde as fontes de luz até ao observador, incluindo interações com os objectos presentes na cena. Muitos programas de CAD incluem modelos de iluminação simples, que permitem ao utilizador visualizar o modelo que está a desenvolver; no entanto, estas imagens são essencialmente geometricamente correctas, sendo menor a preocupação com a correcção da iluminação<sup>1</sup>. A indústria dos jogos para computador e do cinema concentrou-se em desenvolver técnicas que produzem efeitos especiais e imagens com grande impacto visual. Mas a reprodução fiel da realidade não é, usualmente, a maior preocupação destes programadores. Os avanços registados a partir do início da década de 80 em termos de modelos de iluminação levaram ao aparecimento da visualização fotorealista. As imagens assim produzidas parecem reais à maioria dos observadores, podendo portanto ser confundidas com fotografias de cenas concretas. As perguntas que se colocam são: Estas imagens são correctas? Representam a cena fielmente se o modelo a partir da qual foram geradas realmente existisse? A resposta, geralmente, é não, apesar do aspecto fotorealista das imagens (figura 1.1(a)).

O objectivo da síntese de imagens realistas, ou de alta qualidade, é o desenvolvimento de modelos de iluminação fisicamente correctos que produzam imagens sintéticas visualmente e/ou mensuravelmente indistinguíveis de imagens do mundo real [12, 24]. Estas imagens podem ser usadas de forma preditiva, isto é, para prever o aspecto final de algo que é construído baseado no modelo geométrico utilizado. Esta argumentação lembra imediatamente os objectivos das simulações em outros campos da engenharia: a indústria electrónica depende de simulações para o desenvolvimento de circuitos integrados complexos (microprocessadores, por exemplo), as indústrias automóvel e aeronáutica dependem de simulações para o desenvolvimento de motores, estudo da aerodinâmica, etc. Na realidade são imensos os exemplos da utilização de simulações no processo de desenvolvimento de produtos e estudo dos mais diversos fenómenos. Porque não aplicar o mesmo princípio à iluminação e transporte de luz? Os campos de potencial utilização são vários [8]:

Arquitectura – O produto final de um projecto de arquitectura pode ser visualizado, permitindo a introdução de alterações antes do início da construção. Além de mais

---

<sup>1</sup>Actualmente são já comuns os programas de CAD que incluem visualizadores com modelos de iluminação sofisticados, resultando em imagens com maior impacto visual



(a) POV-Ray

(b) RADIANCE

Figura 1.1: Fotorealismo *versus* Alta Qualidade

económico, o cliente pode saber previamente aquilo com que deve contar. A aplicação da síntese de imagens realistas não se limita ao desenho de edifícios, que se pode alargar ao desenho do interior de automóveis, mobílias, acessórios, etc.

Engenharia de iluminação – O projecto de iluminação de espaços fechados (casas, escritórios, armazéns, etc.) e espaços abertos (estádios, palcos, etc.) pode beneficiar de um estudo rigoroso do resultado final e da forma como a luz se distribuirá por todo o espaço;

Publicidade e marketing – O consumidor pode beneficiar do facto de visualizar um produto que ainda não foi produzido ou ao qual não tem acesso físico. Adicionalmente, terá a possibilidade de colocar este produto virtual no ambiente ao qual se destina, para avaliar cuidadosamente o resultado final;

Simuladores – quando utilizados para o treino de pessoal especializado, tais como pilotos, militares, atletas, etc., estes requerem uma visualização correcta do ambiente;

Cinema e jogos de computadores – apesar de ser constantemente debatido se a fidelidade à realidade é importante para os jogos (o utilizador aceita facilmente o facto de estar a interactuar com um mundo virtual alternativo), não existem dúvidas de que a indústria do cinema recorre amiúde a simulações para produzir grandes partes de filmes que se querem realistas. Creio que um elevado número de jogos podem

também beneficiar desta tecnologia, tornando-se mais credíveis e intuitivos aos olhos do utilizador.

A síntese de imagens realistas implica a modelação e simulação dos processos físicos subjacentes ao transporte da luz e respectiva interacção com os materiais. O resultado final será tão mais fiável, quanto maior a precisão desta simulação. O programa de síntese de imagens deve ser baseado em fenómenos e quantidades físicas, não recorrendo a heurísticas que invalidariam o resultado final. Actualmente existem técnicas para simular de uma forma fisicamente correcta um grande número de fenómenos relacionados com a luz, incluindo reflexão e transmissão difusa ou especular, interreflexões difusas, cáusticas, interacção da luz com o meio de propagação, fluorescência, fosforescência, polarização, etc. O maior obstáculo a uma maior utilização e divulgação destas técnicas é o seu elevado custo computacional: mesmo utilizando computadores de ponta e processamento paralelo uma simulação com elevado grau de precisão necessita de um tempo considerável para terminar.

## 1.2 Iluminação Local *versus* Global

Um algoritmo de iluminação pode ser genericamente classificado como local ou global. Algoritmos de iluminação local apenas consideram a iluminação directa, isto é a interacção entre cada objecto e a luz proveniente de cada fonte de luz. Todos os fenómenos resultantes de interacções entre objectos são ignorados, tais como sombras, reflexões e transmissões. Os objectos aparecem como flutuando no espaço devido à ausência de sombras (figura 1.2); efeitos comuns, tais como imagens reflectidas num espelho, objectos visíveis através de um outro objecto transparente, não são modelados. As imagens resultantes de algoritmos de iluminação local não são fotorealistas.

Os algoritmos de iluminação global consideram para a iluminação de cada objecto, além da iluminação directa, luz que incide no objecto após ter interagido com outros objectos da cena (figura 1.3). A complexidade do algoritmo determina a qualidade da simulação. São vários os fenómenos pelos quais a luz que incide num objecto pode vir a incidir noutros. Nestes incluem-se a reflexão, transmissão, refacção, difracção e interferência [25]. Estes serão apresentados com mais detalhe no capítulo 2. A iluminação global é essencial para capturar a iluminação indirecta que é maioritariamente responsável pelo aspecto final da maior parte das cenas. É, portanto, imprescindível para a síntese de imagens de alta qualidade.

Convém não confundir um algoritmo de iluminação local com o modelo de iluminação local.

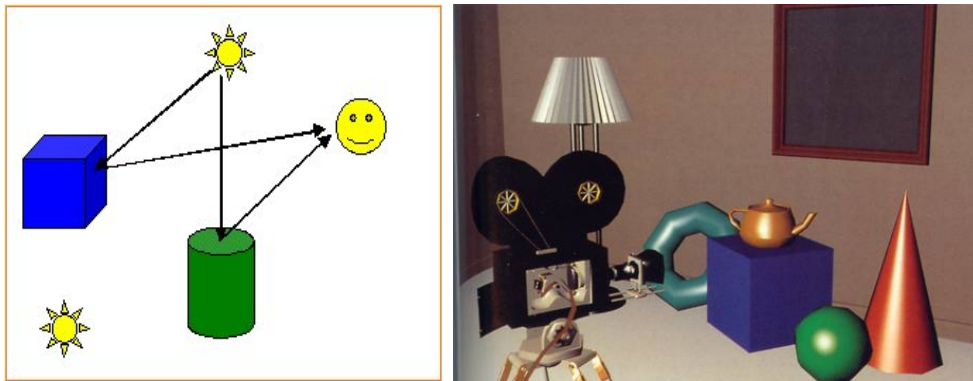


Figura 1.2: Iluminação Local

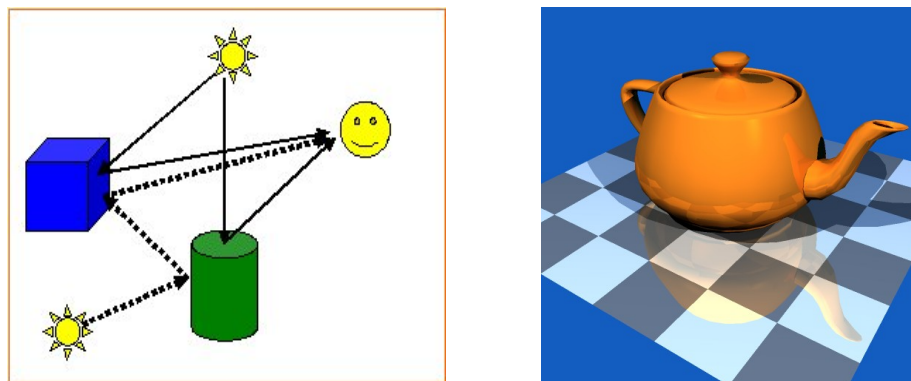


Figura 1.3: Iluminação Global

O primeiro, descrito nesta secção, permite iluminar uma cena usando apenas luz incidente nos objectos que tenha origem nas fontes de luz – iluminação directa. O segundo descreve como é que determinado material reflecte (ou transmite) luz incidente numa determinada direcção; a origem desta luz incidente não é tida em conta, podendo ser uma fonte de luz ou outro objecto presente na cena. Estes serão discutidos com maior detalhe no capítulo 2.

### 1.3 A Natureza e Representação da Luz

O objectivo da síntese de imagens de alta fidelidade é calcular a distribuição da luz, no estado de equilíbrio, num determinado modelo do mundo. Sendo a propagação da luz e a sua interacção com os objectos fenómenos físicos, este objectivo só pode ser atingido procedendo a uma simulação fisicamente correcta de todo o processo. A "luz" deve ser modelada usando unidades físicas bem definidas e todas as suas interacções com o mundo

devem respeitar as leis da física, tal como são conhecidas.

O elevado custo computacional desta simulação fisicamente correcta implica, frequentemente, a introdução de simplificações e heurísticas no modelo de iluminação utilizado. No entanto, os ganhos em tempo de computação obtidos com estas simplificações devem ser cuidadosamente ponderados com as perdas em termos de fiabilidade da imagem final; estas perdas podem inviabilizar o objectivo principal de utilizar a imagem com fins preditivos.

A natureza da luz ainda hoje não é completamente compreendida, existindo diferentes abordagens para capturar o seu comportamento dual: corpuscular e ondulatório. Os modelos baseados na natureza ondulatória da luz são mais adequados para simular fenómenos como interferência, polarização e difracção. Outros fenómenos, tais como a reflexão, transmissão e refacção prestam-se a uma modelação corpuscular, isto é, baseada em partículas e/ou raios. Actualmente, são fundamentalmente três os modelos utilizados para descrever o comportamento da luz [2, 8, 12, 14]:

**Óptica Quântica** — Modelo fundamental que explica a sua natureza dual. Descreve o comportamento da luz ao nível submicroscópico, fornecendo os fundamentos para compreender a interacção entre luz e matéria. Este modelo é considerado demasiado detalhado pela comunidade ligada à computação gráfica e raramente é utilizado no âmbito da síntese de imagens.

**Óptica Electromagnética** — Inclui o modelo baseado em ondas e é descrito pelas equações de Maxwell. Modela fenómenos que ocorrem quando a luz interage com objectos do tamanho do comprimento de onda. Também não é comum encontrar este modelo no âmbito da síntese de imagens.

**Óptica Geométrica** — É o modelo mais utilizado na área da Computação Gráfica. É baseado em algumas simplificações, tais como:

- a luz propaga-se sempre linha recta e não é afectada por factores externos tais como a gravidade, campo magnético, etc.;
- a luz propaga-se instantaneamente entre dois pontos;
- o comprimento da onda electromagnética é muito menor do que os objectos com os quais esta interage;
- quando interage com um material a luz é absorvida, reflectida e/ou transmitida.

### 1.3.1 Radiometria

Para calcular a distribuição da luz numa cena é necessário compreender as quantidades físicas que representam a luz. A radiometria estabelece uma terminologia precisa para esta representação; esta terminologia e respectivas unidades foram definidas como uma norma ANSI [1]. As quantidades e unidades radiométricas e fotométricas são sumariadas na tabela 1.1 e apresentadas com maior detalhe ao longo destas duas subsecções.

Radiometria			Fotometria		
Símb.	Quantidade	Unidade	Símb.	Quantidade	Unidade
$Q_\lambda$	Energia Radiante Espectral	$J/nm$	—	—	—
$Q$	Energia Radiante	$J$	—	—	—
$\Phi$	Fluxo Radiante	$W$	$\Phi_v$	Fluxo Luminoso	<i>lumen</i>
$E$	Irradiância	$W/m^2$	$E_v$	Iluminância	<i>Lux</i>
$B$	Radiosidade	$W/m^2$	$B_v$	Exitância Luminosa	<i>Lux</i>
$I$	Intensidade Radiante	$W/sr$	$I_v$	Intensidade Luminosa	<i>candela</i>
$L$	Radiância	$W/m^2 sr$	$L_v$	Luminância	<i>candela/m^2</i>

Tabela 1.1: Quantidades Radiométricas e Fotométricas

**Energia de um fóton ( $e_\lambda$ ):** A quantidade básica em iluminação é o fóton. A energia de um fóton com comprimento de onda  $\lambda$  é dada por

$$e_\lambda = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

onde  $h \approx 6,63 * 10^{-34} J \cdot s$  é a constante de Planck e  $c = 299792,458 m/s$  é a velocidade da luz no vázio. A energia, no Sistema Internacional (SI), é medida em Joules ( $J$ ).

**Energia Radiante Espectral ( $Q_\lambda$ ):** A energia de  $n_\lambda$  fótons, com comprimento de onda  $\lambda$ , é dada por

$$Q_\lambda = n_\lambda e_\lambda = n_\lambda \frac{hc}{\lambda} \quad (1.2)$$

**Energia Radiante ( $Q$ ):** É a energia de um conjunto de fótons com diversos comprimentos de onda. É calculada integrando a energia radiante espectral no domínio de todos os comprimentos de onda:

$$Q = \int_0^\infty Q_\lambda \partial\lambda \quad (1.3)$$

**Fluxo (ou potência) Radiante ( $\Phi$ ):** É a quantidade radiométrica fundamental e é medida em Watts ( $W = J/s$ ). Expressa a quantidade de energia radiante que flui através



de uma superfície por unidade de tempo. A potência das fontes de luz é normalmente expressa em potência radiante.

$$\Phi = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (1.4)$$

**Densidade de Fluxo (ou potência) Radiante ( $\partial\Phi/\partial A$ ):** É o quociente do fluxo radiante pela área da superfície, expressando portanto a noção de densidade. Mede-se em  $W/m^2$ . É comum referir a densidade de fluxo que abandona uma superfície por *Exitância Radiante* ( $M$ ) e a densidade de fluxo incidente numa superfície num ponto  $p$  por *Irradiância* ( $E(p)$ ).

$$E(p) = \frac{\partial\Phi}{\partial A} \quad (1.5)$$

A *Exitância Radiante* é também referida como *Radiosidade* ( $B$ ), sendo a quantidade calculada pelo algoritmo de iluminação global com o mesmo nome.

**Intensidade Radiante ( $I$ ):** É o fluxo radiante numa determinada direcção. Formalmente, define-se como o fluxo radiante por unidade de ângulo sólido (figura 1.4),  $\partial\vec{w}$ , e mede-se em  $W/sr$ .

$$I(\vec{w}) = \frac{\partial\Phi}{\partial\vec{w}} \quad (1.6)$$

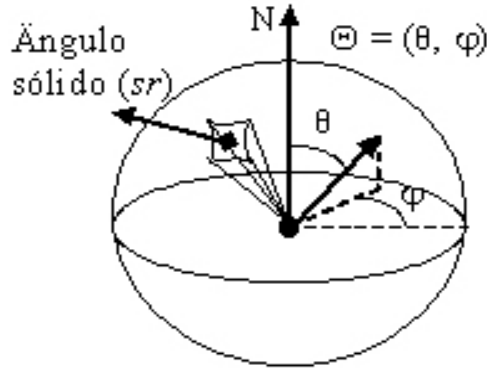


Figura 1.4: **Ângulo Sólido e Direcção 3D** - O ângulo sólido  $\Omega$  subentendido por uma área  $A$  na hemisfera é definido como  $\Omega = A/r^2$ . Uma hemisfera de raio 1 tem um ângulo sólido de  $2\pi sr$ . A direcção  $\Theta = (\theta, \varphi)$  é composta pelo ângulo de elevação  $\theta$  e pelo ângulo azimutal  $\varphi$ .

**Radiância ( $L$ ):** É o fluxo radiante por unidade de área da superfície projectada (figura 1.5) e por unidade de ângulo sólido; mede-se em  $W/m^2 sr$ .

$$L(p, \vec{w}) = \frac{\partial^2\Phi}{\partial A^\perp \partial\vec{w}} = \frac{\partial^2\Phi}{\partial A \cos\theta \partial\vec{w}} \quad (1.7)$$

onde  $p$  é o ponto da superfície onde pretendemos calcular a radiância e  $\theta$  é o ângulo entre a direcção considerada e a normal à superfície no ponto  $p$ . A radiância é uma quantidade com 5 dimensões: três coordenadas para o ponto  $p$  ( $x, y, z$ ) e dois ângulos para a direcção  $\vec{w}$  ( $\varphi, \theta$ ) (figura 1.4). A radiância é a quantidade mais importante em iluminação global,

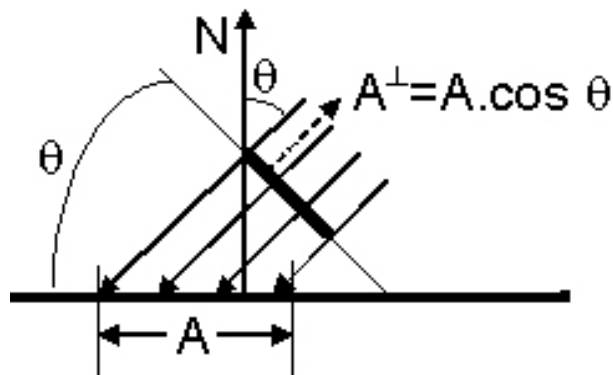


Figura 1.5: **Área Projectada** definida como a área da superfície  $A$  projectada no plano perpendicular à direcção de incidência.  $A^\perp = A \cos \theta$

pois é aquela que melhor captura a "aparência" de um objecto; isto aplica-se a qualquer dispositivo que detecte luz, incluindo o olho humano. A radiância pode ser vista como o número de fótons que chegam (ou partem) por unidade de tempo a uma determinada área diferencial e com uma determinada direcção; pode ser usada para descrever a intensidade da luz num determinado ponto no espaço e numa determinada direcção.

Ao longo deste texto será usada a notação  $L(x \rightarrow \Theta)$  para representar radiância emitida pelo ponto  $x$  na direcção  $\Theta$  e  $L(x \leftarrow \Theta)$  para representar radiância incidente no ponto  $x$  na direcção  $\Theta$ .  $L(x \rightarrow y)$  representa a radiância emitida pelo ponto  $x$  na direcção do ponto  $y$ .

No vácuo a radiância é constante ao longo de uma linha recta. Esta propriedade, que matematicamente se expressa como

$$L(x \rightarrow y) = L(y \leftarrow x) \quad (1.8)$$

significa que a radiância emitida por  $x$  na direcção de  $y$  é igual à radiância incidente em  $y$  na direcção de  $x$ . Esta propriedade é explorada por todos os algoritmos de *ray-tracing*; só não se verifica se o meio no qual a luz se propaga tem alguma influência no seu transporte (meios participativos, tais como o nevoeiro ou o fumo).

### 1.3.2 Fotometria

A fotometria lida com a percepção que um observador humano normalizado tem da energia radiante. A resposta visual do olho humano no espectro que vai dos 380 aos 780 nanómetros (intervalo de comprimentos de onda que podemos sentir como luz) foi normalizada; as quantidades fotométricas incluem esta resposta normalizada nas suas definições. Uma vez que as quantidades fotométricas podem ser obtidas a partir das quantidades radiométricas e da resposta padrão, a maioria dos algoritmos de iluminação global lida com estas últimas. No entanto, a fotometria revela-se útil na altura de analisar a distribuição da luz (luminância) num ambiente destinado à utilização por humanos ou na altura apresentar as imagens ao observador, num processo designado por *tone mapping*.

**Fluxo Luminoso ( $\Phi_v$ ):** Expressa a resposta visual ao fluxo radiante e mede-se em *lumen*. 1 *lumen* é definido como o fluxo luminoso de radiação monocromática com comprimento de onda igual a 555 nm e fluxo radiante de 1/663W.

**Densidade de Fluxo Luminoso:** Quociente do fluxo luminoso pela área da superfície; mede-se em  $Lux = lumen/m^2$ . Designado por Iluminância,  $E_v$ , quando se trata de fluxo incidente e Exitância Luminosa,  $B_v$ , quando se trata de fluxo emitido.

**Intensidade Luminosa ( $I_v$ ):** É o fluxo luminoso por unidade de ângulo sólido,  $\partial\vec{w}$ , e mede-se em *candela* = *lumen/sr*. Uma vez que o ângulo sólido total existente numa circunferência é de  $4\pi$ , uma fonte de luz pontual com uma intensidade luminosa de 1 *candela* tem um fluxo luminoso de  $4\pi$  *lumen*.

**Luminância ( $L_v$ ):** É o fluxo luminoso por unidade de ângulo sólido e por metro quadrado; mede-se em *candela/m<sup>2</sup>*. É o equivalente fotométrico da radiância.

## 1.4 O Processo de Síntese de Imagens

O objectivo da síntese de imagens de alta qualidade é, portanto, produzir imagens correctas de modelos virtuais do mundo. Estas imagens podem ser usadas de forma preditiva, pois reflectem fielmente o que o observador veria se aquele mundo realmente existisse. Parece claro que este processo deve começar a partir da descrição do modelo do mundo e terminar com a apresentação de uma imagem. Quais as fases para realizar este processo? Estas estão representadas na figura 1.6 e são discutidas ao longo desta secção [2, 12].

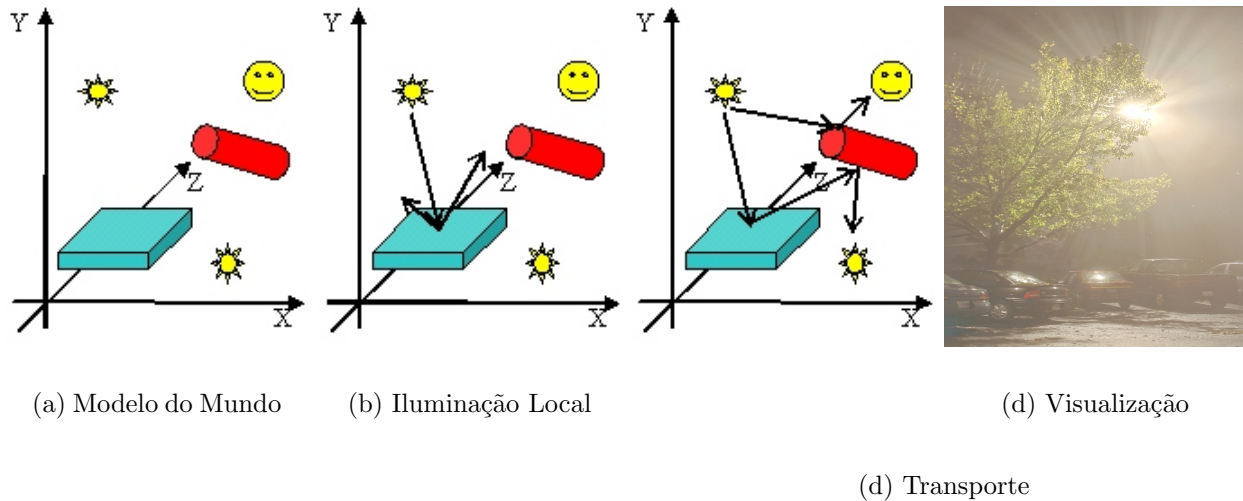


Figura 1.6: O processo de síntese de imagens

### 1.4.1 Modelo Geométrico do Mundo

O processo de síntese de imagens toma como entrada o modelo geométrico do mundo virtual que se pretende iluminar. Este modelo deve descrever a forma, orientação e localização de todos os objectos presentes no mundo, ou seja, toda a informação geométrica. A forma concreta da descrição geométrica a utilizar varia conforme o ambiente de modelação/simulação utilizado. Alguns ambientes permitem definições paramétricas de curvas em 3 dimensões, podendo abranger desde superfícies geométricas com uma representação analítica bem definida (uma esfera ou um plano, por exemplo) até superfícies de Bézier, B-splines, NURBS, etc. Representações alternativas consistem na utilização de malhas (*patches*) de polígonos e/ou Geometria Sólida Construtiva (CSG - *Constructive Solid Geometry*). A representação usando malhas de polígonos, particularmente triângulos, é frequente, pois trata-se da forma mais adequada para processamento pelas placas gráficas actuais; algoritmos de iluminação da classe do *ray tracing*, por exemplo, são mais adequados para representações usando definições analíticas ou paramétricas. É comum converter os modelos entre representações para os adequar ao processo de visualização a utilizar; no entanto, esta conversão resulta frequentemente em perda de precisão. Para mais informação sobre representação geométrica consultar [10, 11, 19, 25].

A descrição geométrica dos objectos não é, no entanto, suficiente. É necessário descrever o, ou os, materiais pelos quais estes são constituídos. É esta descrição que permitirá determinar a "cor" de cada ponto do objecto, num processo conhecido como *shading*. A

descrição do material, juntamente com o modelo de iluminação local utilizado, permitirá determinar a quantidade de "luz" absorvida, reflectida ou transmitida. Esta descrição pode ser arbitrariamente complexa, mais uma vez dependendo do modelo de iluminação (secção 1.4.2).

O modelo do mundo não está completo sem a descrição das fontes de luz. Apesar de a maior parte das aplicações permitir que se defina uma luz ambiente, não direccionada e omnipresente, esta resulta em imagens com um aspecto irreal, com os objectos iluminados de forma constante e sem sombras. A síntese de imagens realistas requer que as fontes de luz sejam devidamente posicionadas no mundo virtual e que a sua emissão seja caracterizada usando quantidades físicas. Algoritmos de iluminação global exigem que as fontes de luz sejam caracterizadas espacialmente (qual a sua posição, geometria e orientação), direcionalmente (qual a radiância emitida em cada direcção) e ao longo do espectro (qual a radiância para cada comprimento de onda); apesar de a distribuição espectral da luz poder ser simulada ao longo de todo o espectro visível, por razões de eficiência, isto é feito apenas para 3 valores do espectro, tipicamente, RGB. Embora a intensidade das fontes de luz seja muitas vezes indicada como o seu fluxo radiante, isto é, em Watts, são várias as aplicações que exigem que esta seja caracterizada em termos de radiância, isto é, em  $W/m^2sr$  [22]. A geometria da fonte de luz pode variar desde o caso ideal – fonte de luz pontual que emite com igual intensidade em todas as direcções – até geometrias mais complexas, tais como poligonais, esféricas ou com formas arbitrárias [8, 14, 24].

Alguns algoritmos poderão exigir ainda a especificação do ponto de vista, ou ponto do observador. Este corresponde ao ponto a partir do qual se pretende visualizar o mundo. A parametrização deste observador depende do modelo de câmara a utilizar. A mais simples corresponde a uma câmara idealizada como um ponto. Esta deve ser parametrizada com a posição da câmara, a direcção para onde está apontada, um vector que indica a direcção "para cima" e os ângulos de abertura horizontais e verticais; este conjunto de parâmetros define um plano da imagem, onde o resultado do algoritmo de síntese será projectado (figura 1.7). Para mais informação consultar [10, 11, 19].

Note-se porém que o resultado de um algoritmo de iluminação global não depende necessariamente da definição de um ponto de vista. Os algoritmos independentes do observador, como a radiosidade, calculam a iluminação no mundo dos objectos, sem a projectarem no plano de imagem. A visualização, correspondente a esta projecção do mundo dos objectos no plano da imagem, é um processo posterior; esta sim exige a definição de uma câmara virtual. Algoritmos da classe do *ray tracing*, por outro lado, são dependentes do observador, exigindo a definição da câmara desde o início.

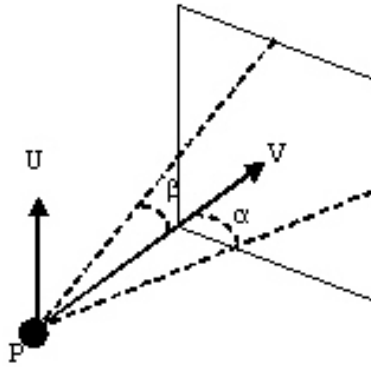


Figura 1.7: Plano da Imagem

P - ponto de vista; V - direcção de vista ; U - direcção superior ;  
 $\alpha$  - ângulo de abertura horizontal ;  $\beta$  - ângulo de abertura vertical

### 1.4.2 Modelo de Iluminação Local

O modelo de iluminação local representa a forma como a luz incidente num objecto interage com o mesmo. Descreve a forma como a radiância incidente num objecto é reflectida, transmitida ou absorvida. Este modelo é normalmente associado ao material pelo qual o objecto é composto. Diferentes materiais interagem com a luz de diferentes formas; alguns materiais comportam-se como espelhos, enquanto outros apresentam um aspecto difuso.

No caso mais geral, a radiância  $L(P_i \leftarrow \Theta_i)$  incidente na superfície de um objecto no instante  $t_i$ , num ponto  $P_i$ , com uma direcção de incidência  $\Theta_i$  e com um comprimento de onda  $\lambda_i$  pode ser emitida pelo objecto num outro instante  $t_r$ , outro ponto  $P_r$ , outra direcção  $\Theta_r$  e outro comprimento de onda  $\lambda_r$ . Ao longo deste texto iremos fazer algumas simplificações que facilitam a definição do modelo de iluminação local, impedindo, no entanto, a simulação de alguns fenómenos [8]:

- a radiância incidente no instante  $t_i$  é absorvida, reflectida ou transmitida instantaneamente, isto é, no mesmo instante  $t_i$ ; esta premissa impede a modelação da fosforescência;
- o comprimento de onda  $\lambda_i$  da radiância incidente não é alterado, isto é,  $\lambda_i = \lambda_r$ ; esta premissa impede a modelação da fluorescência;
- assumiremos ainda que o ponto de incidência  $P_i$  corresponde ao ponto de reflexão  $P_r$ ; esta premissa impede a modelação da dispersão da luz numa superfície.

Geralmente os modelos de iluminação indicam qual a percentagem de radiância incidente

numa determinada direcção que é absorvida, reflectida ou transmitida. A reflexão e a transmissão podem ser idealizadas como especulares ou difusas. Um material especular perfeito reflecte ou transmite apenas numa direcção bem definida, enquanto um material difuso perfeito reflecte ou transmite com igual intensidade em todas as direcções. Embora alguns modelos de iluminação modelam os materiais como especulares e/ou difusos perfeitos, estes fenómenos não se verificam no mundo real; a radiação é emitida simultaneamente em várias direcções com diferentes intensidades dando origem a fenómenos como a translucência e *glossiness*<sup>2</sup> (ver figura 1.8).

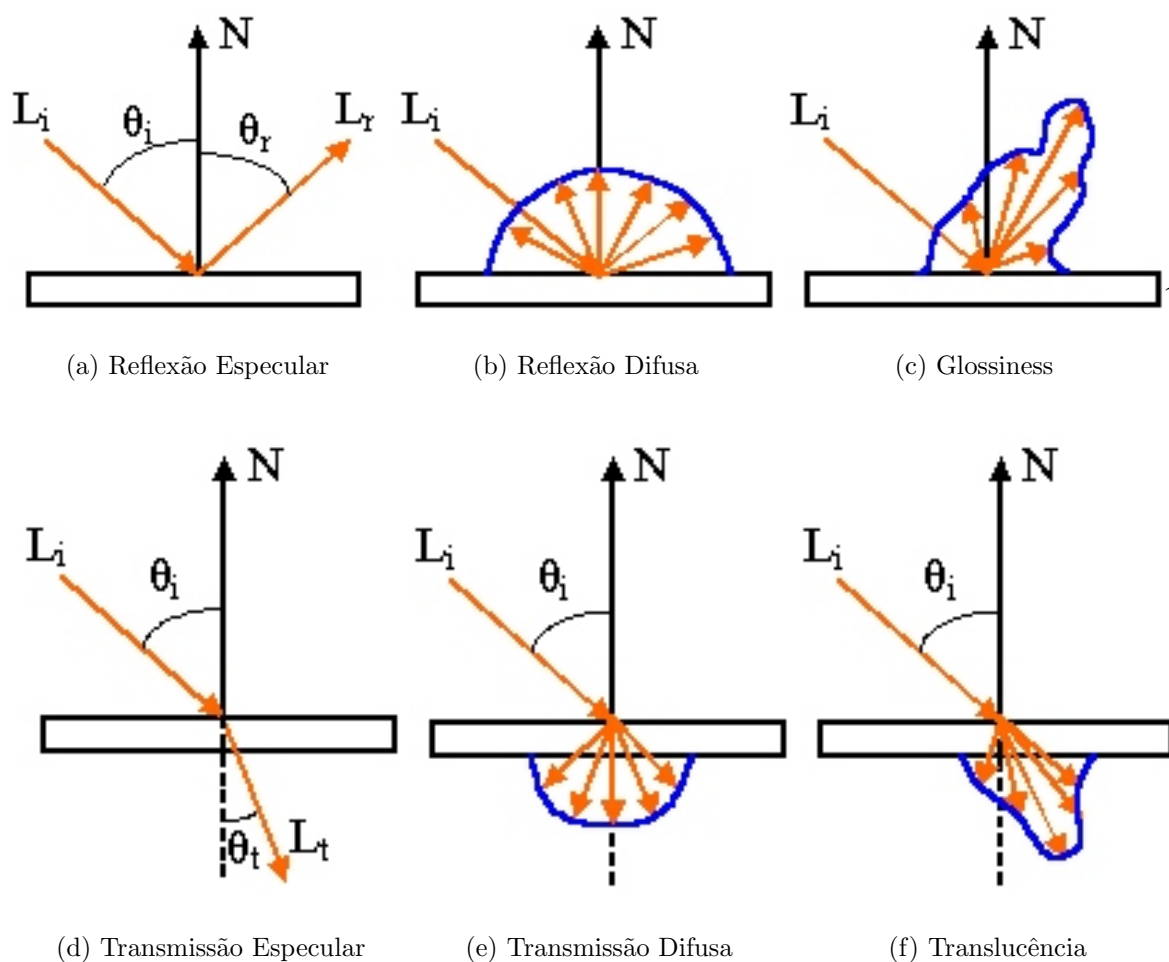


Figura 1.8: Modelos de Iluminação Local

Os primeiros modelos de iluminação desenvolvidos modelavam apenas a iluminação directa, isto é, luz proveniente directamente das fontes de luz. O mais simples destes modelos é o

<sup>2</sup>A melhor tradução encontrada para este termo foi "lustroso"; continuarei a utilizar o termo em inglês

modelo de Lambert, que assume que todas as superfícies são reflectores difusos perfeitos. Assim, a radiância incidente num ponto  $x$  é reflectida com igual intensidade em todas as direcções da hemisfera centrada em  $x$ ; esta intensidade depende da direcção de incidência  $\Theta_i = (\theta_i, \phi_i)$  e do coeficiente de reflexão difusa para cada comprimento de onda  $k_d(\lambda)$ . A dependência da direcção de incidência deve-se ao facto de que quanto mais tangencial à superfície, maior a área abrangida pelo raio incidente; a radiância incidente deve portanto ser atenuada pelo cosseno do ângulo de incidência com a normal à superfície no ponto de incidência  $x$ , isto é,  $\cos(\theta_i) = \vec{L} \cdot \vec{N}$ , onde  $\vec{L}$  é a direcção da fonte de luz para o ponto  $x$  e  $\vec{N}$  é a normal à superfície em  $x$ . O modelo de Lambert é calculado de acordo com a equação 1.9 para  $l$  fontes de luz:

$$L_\lambda(x \rightarrow \Theta_r) = \sum_l k_d(\lambda) L_\lambda(x \leftarrow \vec{L}_l) (\vec{L}_l \cdot \vec{N}) \quad (1.9)$$

O modelo de Lambert é amplamente utilizado por vários modelos de iluminação local, complementado com componentes que modelam outros modos de interacção da luz com os objectos. O algoritmo de iluminação global designado por radiosidade, que apenas modela superfícies difusas, utiliza o modelo de Lambert.

O modelo de Phong [18], desenvolvido na Universidade de Utah em 1975, é talvez o modelo de iluminação local mais popular, suportado pela maioria das placas gráficas. Este modelo divide a reflectividade de um material numa componente difusa e numa componente especular. Os coeficientes  $k_d$  e  $k_s$  representam, respectivamente, a fracção de energia incidente reflectida de forma difusa e especular. Para incluir a iluminação indirecta é acrescentado um termo que representa a reflexão da luz ambiente, modelado por  $k_a$ . A direcção de reflexão especular máxima,  $\vec{R}$ , faz o mesmo ângulo com a normal à superfície ( $\vec{N}$ ) que a direcção de incidência  $\vec{L}$  e estes três vectores situam-se no mesmo plano.  $\vec{R}$  é dado pela equação 1.10:

$$\vec{R} = 2(\vec{N} \cdot \vec{L})\vec{N} - \vec{L} \quad (1.10)$$

Tratando-se de um modelo que apenas processa a iluminação directa a reflexão especular modela o reflexo das fontes de luz nos objectos. Estes aparecem como uma zona brilhante, *highlight*, na superfície do objecto. A intensidade deste reflexo depende do ângulo que a direcção do observador,  $\vec{V}$ , faz com a direcção de máxima reflexão,  $\vec{R}$ ; o cosseno do ângulo formado por estas duas direcções,  $(\vec{R} \cdot \vec{V})$ , é usado como factor de atenuação. A dimensão do reflexo é controlada usando um parâmetro  $n_s$ , utilizado como expoente deste cosseno,  $(\vec{R} \cdot \vec{V})^{n_s}$ ; quanto maior  $n_s$ , menor a área do reflexo (figura 1.9).

Os coeficientes de reflexão difusa e ambiente são normalmente dependentes do comprimento de onda,  $\lambda$ , enquanto o coeficiente de reflexão especular é independentemente do mesmo;



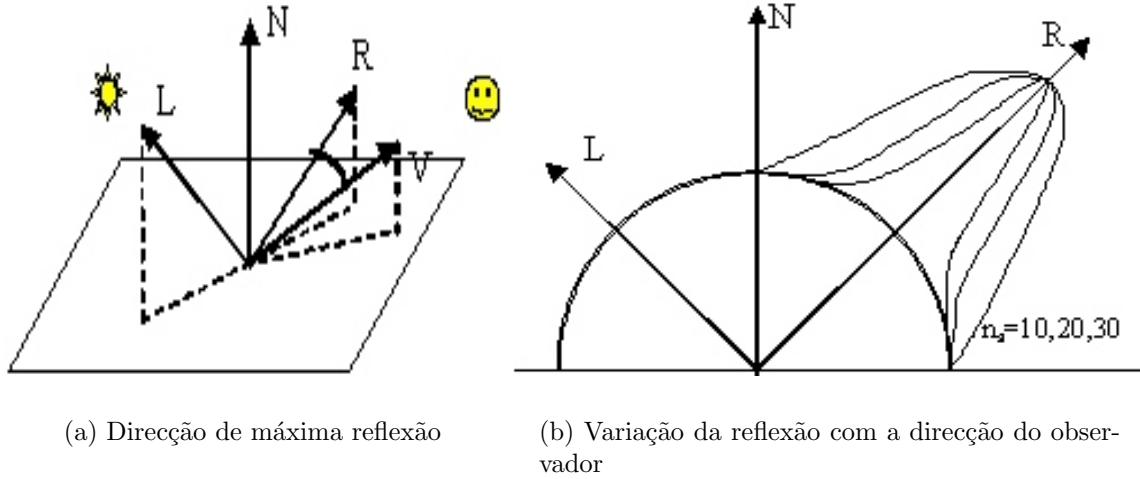


Figura 1.9: Modelo de Phong

o reflexo resultante é da cor da fonte de luz, de acordo com o mundo real. Materiais metálicos podem modificar a cor do reflexo, sendo portanto modelados com coeficientes de reflexão especular dependentes de  $\lambda$ ,  $k_s(\lambda)$ . O modelo de Phong é calculado de acordo com a equação 1.11 para  $l$  fontes de luz:

$$L_\lambda(x \rightarrow \Theta_r) = I_{\lambda,a}k_a(\lambda) + \sum_l L_\lambda(x \leftarrow \vec{L}_l) * (k_d(\lambda)(\vec{L}_l \cdot \vec{N}) + k_s(\vec{R} \cdot \vec{V})^{n_s}) \quad (1.11)$$

onde  $I_{\lambda,a}$  modela a luz ambiente resultante de múltiplas interreflexões difusas e a direcção  $\Theta_r$  corresponde à direcção de observação  $\vec{V}$ .

O modelo de Phong, apesar de amplamente divulgado e suportado em *hardware*, é um modelo empírico; não é uma representação precisa nem correcta da realidade. As imagens resultantes emitem, frequentemente, mais energia do que a recebida, não sendo portanto consistente no que respeita à conservação de energia [12]. De facto, a luz ambiente é uma aproximação demasiado simplista da iluminação resultante das interreflexões difusas; a iluminação resultante destas últimas não é constante ao longo de toda a cena, podendo sofrer grandes variações, mesmo que estas normalmente se produzam de forma suave.

As limitações destes modelos levaram ao aparecimento de outros, progressivamente mais correctos. Alguns exemplos incluem o modelo de Cook-Torrance [5], baseado na modelação das superfícies como micro-facetadas, o modelo de He [13] e modelo de Greg Ward [21] para materiais anisotrópicos, isto é, materiais cuja reflectividade muda de acordo com a sua rotação em torno da normal. O atributo utilizado para descrever o comportamento físico da luz quando interage com qualquer objecto é a função bidireccional de distribuição

da reflectância (*bidirectional reflectance distribution function*, normalmente designada por BRDF), que será apresentada no capítulo 2.

### 1.4.3 Transporte de Luz

Uma vez conhecidas a geometria e as funções de emissão e reflexão de luz para todos os objectos, é necessário simular o seu transporte a partir das fontes de luz até aos mais diversos objectos. As equações de transporte de luz são bem conhecidas [12, 15], mas a sua simulação com grande precisão para cenas complexas é um processo com elevado custo computacional.

Um modelo fisicamente correcto deve processar todas as direcções ao longo da hemisfera centrada em cada ponto de interesse da cena. Para cada uma destas direcções é necessário calcular a visibilidade, isto é, qual o objecto visível naquela direcção, e avaliar o modelo de iluminação local, isto é, a BRDF. Cada ponto da cena pode receber energia de qualquer outro ponto, directa ou indirectamente. Este conceito de avaliação de todas as direcções possíveis de incidência é irrealizável, pois o seu número é infinito. A computação da BRDF pode também ser um processo computacionalmente muito pesado, pois esta pode ter uma complexidade arbitrariamente grande. O cálculo da visibilidade, que na maior parte dos algoritmos implica intersectar um raio com os objectos da cena para determinar qual o objecto mais próximo da origem do raio, é frequentemente apontado como a principal causa para os elevados tempos de execução. Para ultrapassar estas limitações a grande maioria dos algoritmos de iluminação global, incluem simplificações no seu modelo de transporte de luz:

- limitação da complexidade da BRDF;
- avaliação de um conjunto restrito de direcções de incidência criteriosamente seleccionadas;
- utilização de técnicas de aceleração para computar a visibilidade;
- avaliação do transporte de luz num subconjunto de pontos de interesse, usando alguma forma de interpolação para prever o valor da radiância na vizinhança.

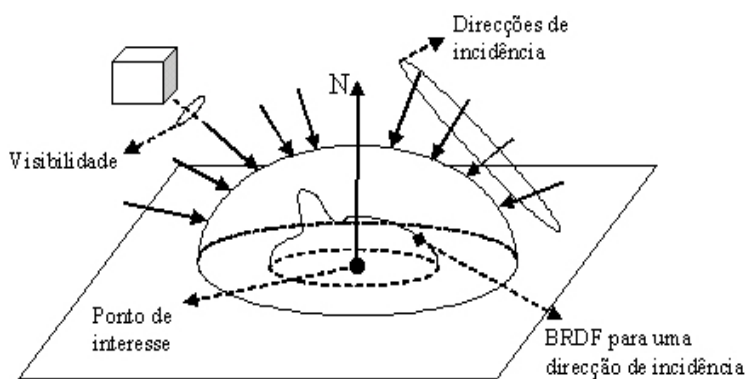


Figura 1.10: Factores de complexidade no transporte de luz

#### 1.4.4 Visualização da Imagem

O passo final de um algoritmo de síntese de imagens de alta qualidade deve ser a produção de uma imagem que possa ser visualizada. Um algoritmo de iluminação global fisicamente correcto produz como resultado final um mapa bidimensional de radiâncias; estas são números reais cujo intervalo de valores pode ser muito amplo. Na verdade bem mais amplo do que aquele que é representável em dispositivos de visualização comum, tais como um monitor de computador ou o papel de fotografia. Uma vez que a principal preocupação nesta fase é a apresentação da imagem a humanos, é comum utilizarem-se quantidades fotométricas em vez de radiométricas; isto é facilmente conseguido convertendo as radiâncias em luminâncias. Uma cena real pode apresentar luminâncias que variam desde  $10^{-6}$  *candela/m<sup>2</sup>* até  $10^8$  *candela/m<sup>2</sup>*, correspondendo, respectivamente, a zonas mais escuras e mais claras. Estas imagens, designadas por *High Dynamic Range Images*, podem ser visualizadas por um observador humano, cujo sistema visual se consegue adaptar a intervalos com 14 ordens de magnitude. A gama de luminâncias suportada pelos monitores comuns não ultrapassa a razão 100:1, ou seja, cerca de 2 ordens de magnitude [20]. Os valores presentes na imagem sintetizada têm, portanto, que ser mapeados na gama de valores suportados pelo dispositivo de visualização, recorrendo a um processo conhecido como *tone mapping*, ou mapeamento de tons.

Numa primeira abordagem ao problema ocorrem imediatamente duas alternativas:

- o intervalo de luminâncias pode ser truncado para coincidir com o intervalo suportado pelo dispositivo de saída. Esta truncagem pode ser feita para qualquer sub-intervalo dos valores originais. Este processo é semelhante ao que se verifica em fotografia quando se aumenta a exposição numa tentativa de adaptação às condições da cena

a fotografar. O problema com esta técnica é que uma diminuição da exposição (truncagem dos valores mais baixos de luminância) resulta numa imagem sem visibilidade nas zonas mais escuras da imagem (figura 1.11(a)), enquanto um aumento da exposição resulta numa saturação provocada pelos altos valores de luminâncias (figura 1.11(b)).

- o intervalo de luminâncias pode ser comprimido para coincidir com o intervalo suportado pelo dispositivo de saída. Esta compressão resulta geralmente em perda de contraste e visibilidade de detalhes; a imagem resultante tem um aspecto "plástico" devido ao baixo contraste.

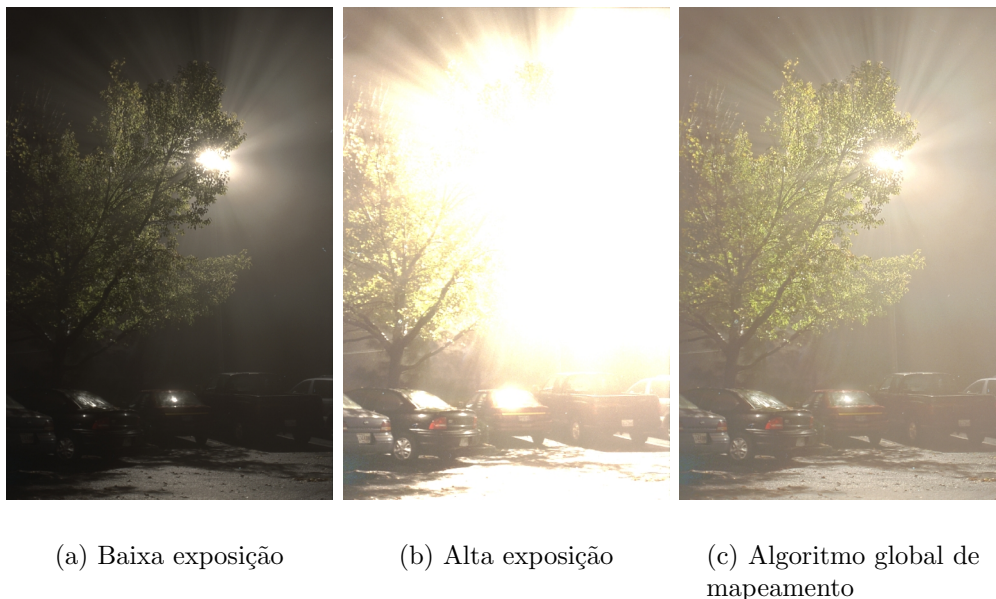
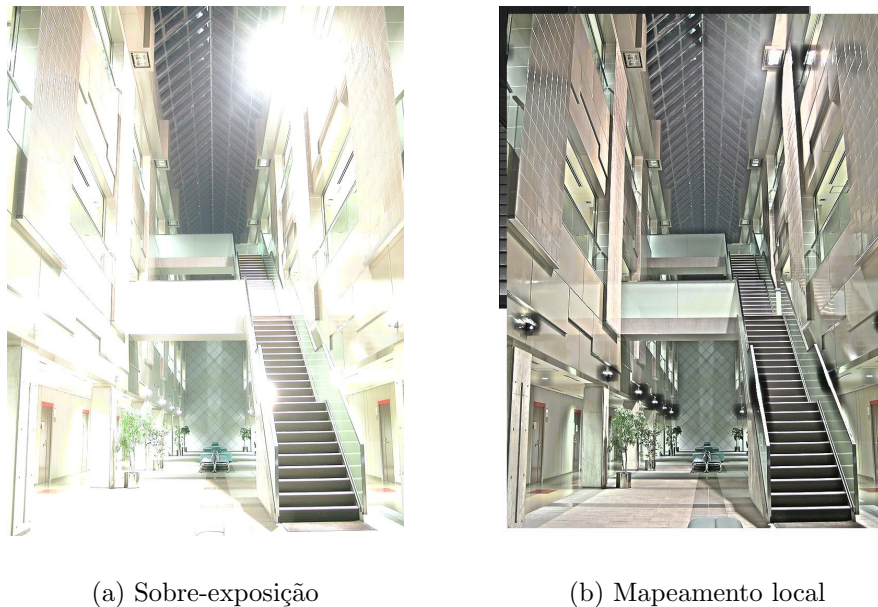


Figura 1.11: Mapeamento de tons

Os algoritmos de *tone mapping* mais comuns tentam preservar contraste, visibilidade e brilho aparente; a imagem final resulta de um compromisso entre estes objectivos distintos e, geralmente, contraditórios (figura 1.11(c)). Muitos destes algoritmos processam a imagem baseados em valores globais, calculados apenas uma vez para toda a imagem [9, 16, 20, 23, 26]. O Sistema Visual Humano (SVH) processa os seus *inputs* de forma local, pelo que algoritmos locais parecem mais promissores. Estes procedem ao mapeamento de cada pixel baseados na vizinhança desse pixel; as primeiras tentativas de mapeamento local resultavam em inversões do gradiente entre regiões claras e escuras, levando ao aparecimento de faixas mais escuras em zonas da imagem onde a variação de luminância deveria

ser progressiva [3] (figura 1.12(b)). Este problema foi posteriormente parcialmente resolvido recorrendo a técnicas de filtragem mais sofisticadas [4, 7].



(a) Sobre-exposição

(b) Mapeamento local

Figura 1.12: Mapeamento de tons local - A visibilidade aumenta, mas os halos à volta das lâmpadas são bem visíveis

Um aspecto importante do processo de mapeamento de tons é que a imagem apresentada ao observador deve parecer real, logo deve ter em consideração a forma como este a vai perceber. As características perceptuais e o estado de adaptação visual do observador devem ser incluídos no algoritmo de mapeamento; a área de percepção de imagem, intimamente relacionada com o SVH, torna-se fundamental nesta última fase da síntese e visualização de imagens. Algumas características importantes do SVH a ter em conta incluem: a gama de luminâncias e cores que são perceptíveis, a mínima luminância perceptível para uma dada luminância ambiente, o deslocamento para o azul e perda de acuidade visual com a diminuição da luminância, a completa perda de sensibilidade à cor com luminância inferiores a  $0.1 \text{ candela/m}^2$ , o efeito de dispersão da luz provocado por zonas de elevada luminância (*glare effects*), etc. O estado de adaptação visual do observador à luminância ambiente é importante em animações em que ocorrem grandes variações desta última, isto é, transições de cenas luminosas para escuras e vice-versa. No momento da transição o SVH reage com uma compressão da resposta que diminui a gama de luminâncias perceptíveis; posteriormente ocorre um processo de adaptação que repõe a gama de respostas, permitindo a percepção de detalhes invisíveis no princípio. Este processo de adaptação, incluído em alguns algoritmos [6, 9, 17], dura até 3 minutos quando a luminância ambiente

aumenta bruscamente e até 40 minutos quando esta diminui.



## Capítulo 2

# BRDF e a Equação de Rendering





## Parte II

# Algoritmos de Iluminação Global



# Apêndices



# Bibliografia

- [1] AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. *Nomenclature and Definitions for Illumination Engineering*. 1986. ANSI/IES RP-16-1986.
- [2] CHALMERS, A., DALY, S., MCNAMARA, A., MYZKOWSKI, K., AND TROSCIANKO, T. Image Quality Metrics. *SIGGRAPH'2000* (July 2000). Course 44.
- [3] CHIU, K., HERF, M., SHIRLEY, P., SWAMY, S., WANG, C., AND ZIMMERMAN, K. Spatially Nonuniform Scaling Functions for High Contrast Images. In *Graphics interface* (May 1993).
- [4] CHOUDHURY, P., AND TUMBLIN, J. The Trilateral Filter for High Contrast Images and Meshes. In *Eurographics Symposium on Rendering* (2003), pp. 1–11.
- [5] COOK, R., AND TORRANCE, K. A Reflectance Model for Computer Graphics. *ACM Transactions on Graphics* 1, 1 (1982), 7–24.
- [6] DURAND, F., AND DORSEY, J. Interactive Tone Mapping. In *Eurographics Workshop on Rendering* (June 2000), Springer Verlag.
- [7] DURAND, F., AND DORSEY, J. Fast Bilateral Filtering for the Display of High Dynamic Range Images. *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH'2002)* 21, 3 (July 2002), 257–266.
- [8] DUTRÉ, P., BEKAERT, P., AND BALA, K. *Advanced Global Illumination*. AK Peters, 2003.
- [9] FERWERDA, J., PATTANAIK, S., SHIRLEY, P., AND GREENBERG, D. A model of visual adaptation for realistic image synthesis. In *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (1996), ACM Press, pp. 249–258.

- [10] FOLEY, VANDAM, FEINER, AND HUGHES. *Computer Graphics: Principles and Practice*, 2nd ed. Addison-Wesley, 1990.
- [11] GLASSNER, A., Ed. *An Introduction to Ray Tracing*. Academic Press, 1997.
- [12] GREENBERG, D. A Framework for Realistic Image Synthesis. *Communications of the ACM* 42, 8 (August 1999), 44–53.
- [13] HE, X., TORRANCE, K., SILLION, F., AND GREENBERG, D. A Comprehensive Physical Model for Light Reflection. *Computer Graphics (SIGGRAPH 1991 Proceedings)* 25 (July 1991), 175–186.
- [14] JENSEN, H. *Realistic Image Synthesis using Photon Mapping*. AK Peters, 2001.
- [15] KAJIYA, J. The Rendering Equation. *Computer Graphics (SIGGRAPH 1986 Proceedings)* 20, 4 (August 1986), 143–150.
- [16] PATTANAİK, S., FERWERDA, J., FAIRCHILD, M., AND GREENBERG, D. A Multi-scale Model of Adaptation and Spatial Vision for Realistic Image Display. In *ACM SIGGRAPH'98* (1998), ACM Press.
- [17] PATTANAİK, S., TUMBLIN, J., YEE, H., AND GREENBERG, D. Time-Dependent Visual Adaptation for Fast Realistic Image Display. In *SIGGRAPH'2000* (2000), ACM Press.
- [18] PHONG, B. Illumination for Computer Generated Images. *Communications of the ACM* 18, 6 (June 1975), 311–317.
- [19] SHIRLEY, P. *Realistic Ray Tracing*. AK Peters, 2000.
- [20] TUMBLIN, J., AND HODGINS, J. Two Methods for Display of High Contrast Images. *ACM Transactions on Graphics* 18, 1 (January 1999), 56–94.
- [21] WARD, G. Measuring and Modeling Anisotropic Reflection. In *SIGGRAPH'92 - 19th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* (1992), ACM Press, pp. 266–272.
- [22] WARD, G. *The Radiance Rendering System 3.5 - Reference Manual*, 2003.
- [23] WARD, G., RUSHMEIER, H., AND PIATKO, C. A Visibility Tone Matching Reproduction Operator for High Dynamic Range Scenes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 3, 4 (December 1997).

- [24] WARD, G., AND SHAKESPEARE, R. *Rendering with Radiance: the art and science of lighting visualization*. Morgan Kaufmann, 1998.
- [25] WATT, A., AND WATT, M. *Advanced Animation and Rendering Techniques: Theory and Practice*. Addison-Wesley, 1992.
- [26] WINDER, S. *From Cones to Contours: a Parallel Simulation of Neural Mechanisms in the Primate Vision System*. PhD thesis, Bath University, Bath, UK, 1995.



