
Modelos Globais de Iluminação

Radiosidade e Ray-tracing

Computação Gráfica



Agenda

- Modelos de iluminação

- Modelos **locais**
 - Phong
- Modelos **globais**
 - Radiosidade
 - *Ray-tracing*

Modelos de iluminação global: O que são

- Até agora a componente global da iluminação foi modelado de forma pouco realista
 - Ex: Modelada através da componente ambiente do modelo de *Phong*
- Como tal, os modelos até agora apresentados designam-se modelos de iluminação local
 - Apenas consideram a **luz emitida directamente pelas fontes de luz**
- Um modelo de iluminação global vai mais longe...
 - Todos os objectos podem (e devem) ser considerados para efeitos de iluminação, uma vez que a luz directa origina um conjunto de **reflexões e refracções**
 - Os algoritmos aqui apresentados tentam-se aproximar de um modelo mais real, considerando a componente difusa, especular e transmitida a um nível global e não local

Ray-tracing vs. Radiosidade



Ray-tracing

Radiosidade



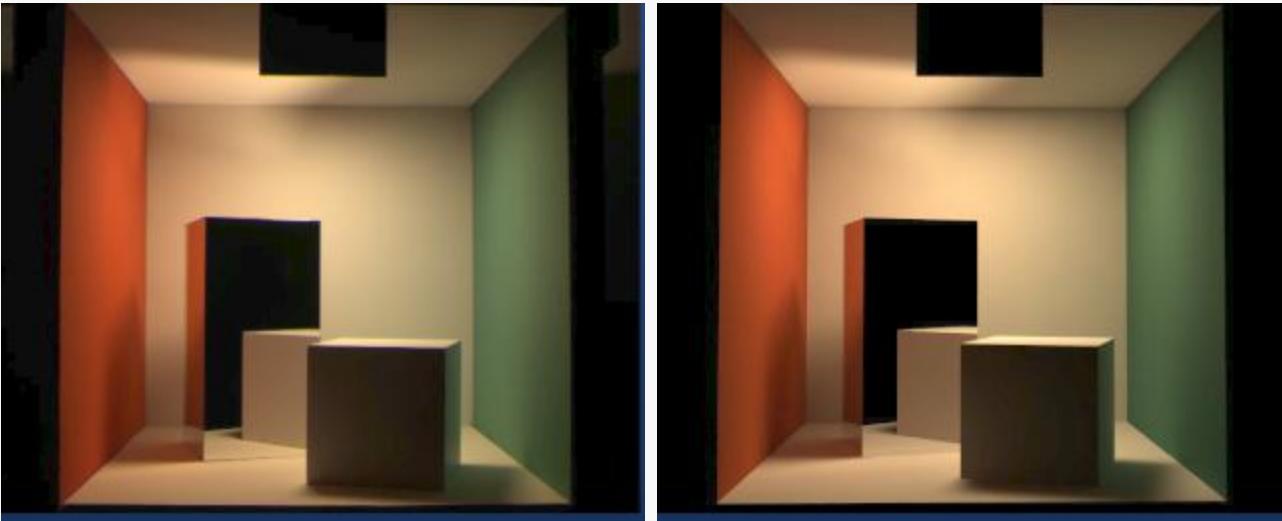
Computação Gráfica – Ray-Tracing e Radiosidade
(CG, JS, ND)

Radiosidade

Computação Gráfica



Radiosidade



Real

Sintetizada



Diferença

Radiosidade

- A radiosidade deriva de um modelo utilizado em transferências térmicas e **baseia-se no cálculo das trocas de radiação térmica entre superfícies**
 - Desenvolve-se a partir da noção de conservação da energia radiante num ambiente controlado (fechado)
- Note-se que a energia é radiada uniformemente em todas as direcções
- A adaptação para computação gráfica foi efectuada em 1984 por Goral, Torrance, Greenberg e Battaile
- **Este método tem como objectivo o cálculo da iluminação e sombreamento, em cenas onde as superfícies são, predominantemente, reflectoras difusas**

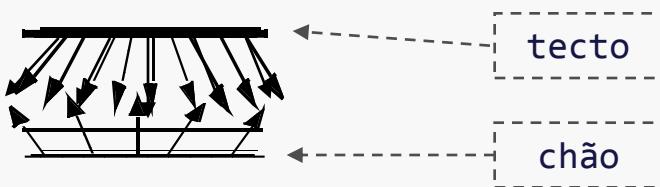
Radiosidade - conservação da energia

Assim, temos, energia...

- **Absorvida (a)**
 - fracção da irradiação total incidente que é absorvida;
- **Reflectida (r)**
 - fracção da irradiação total incidente que é reflectida;
- **Transmitida (t)**
 - fracção da irradiação total incidente que é transmitida através do corpo da superfície.

$$a + r + t = 1$$

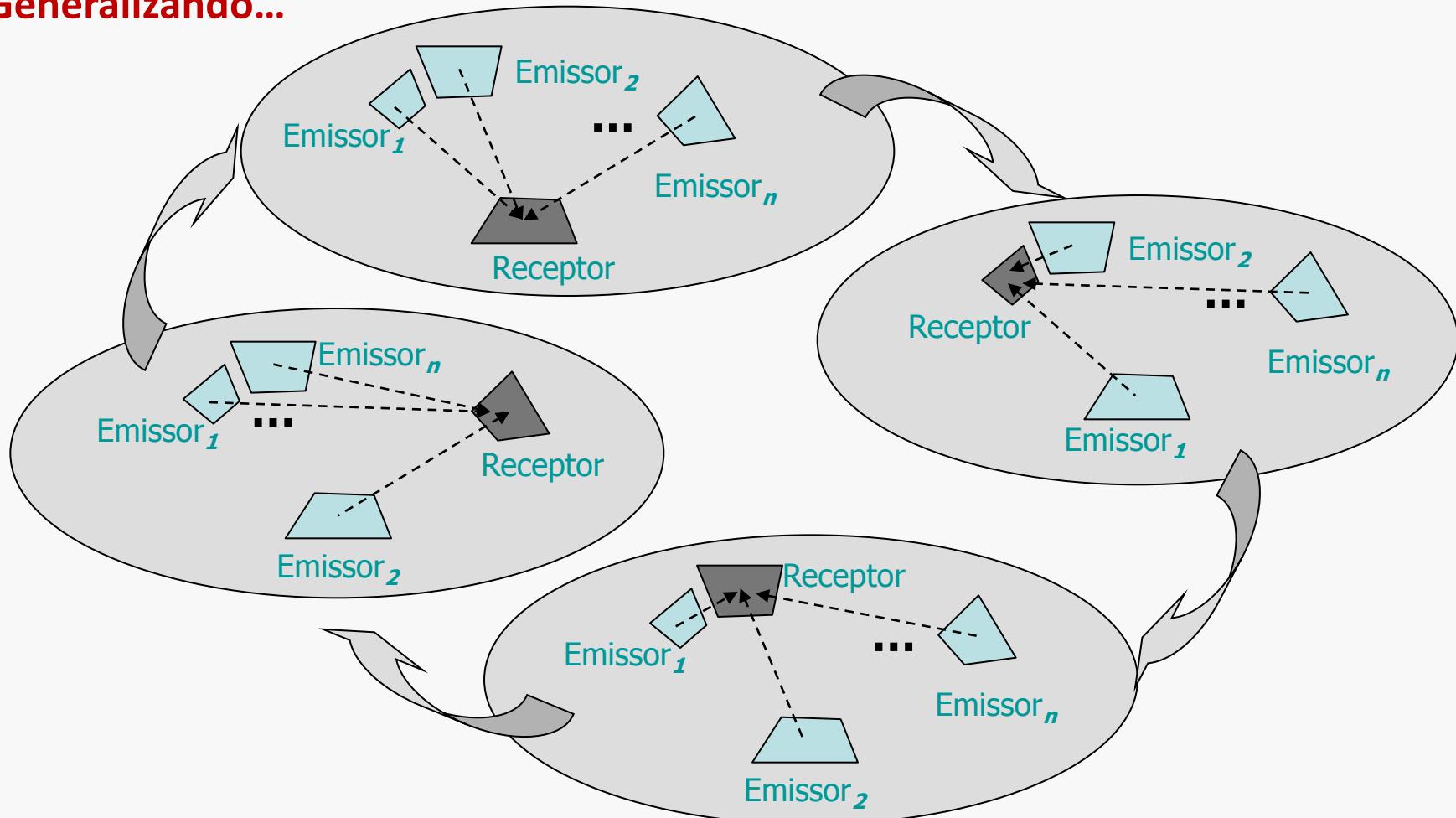
Radiosidade - método



- Vamos imaginar que temos duas superfícies apenas: o **tecto** e o **chão**
 - Imaginando que o **tecto** é constituído por uma grelha de lâmpadas fluorescentes, é também emissor de luz
 - O **chão**, por seu lado, reflecte parte da luz que recebe
 - O **tecto** recebe e reflecte parte da luz reflectida pelo chão...
- O processo tenta simular estas reflexões sucessivas por aproximações sucessivas até se chegar a uma situação de equilíbrio
 - Por cada iteração, menos energia é reflectida, pelo que o processo **converge**

Radiosidade - método

Generalizando...

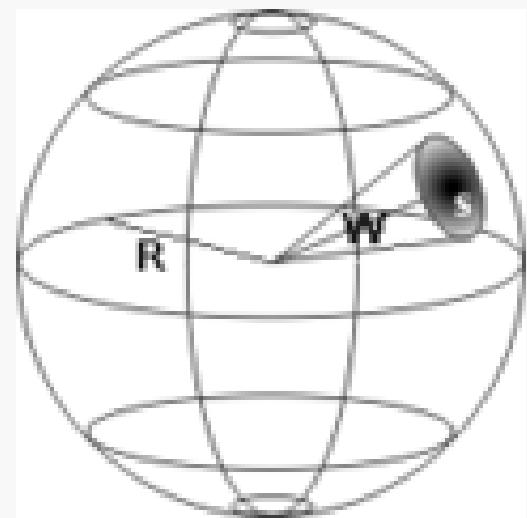
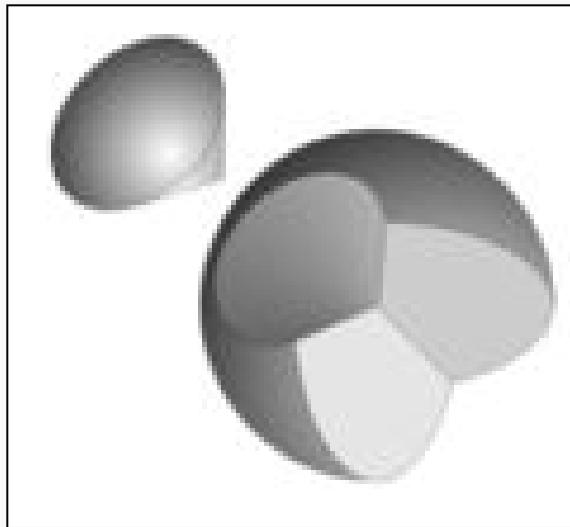
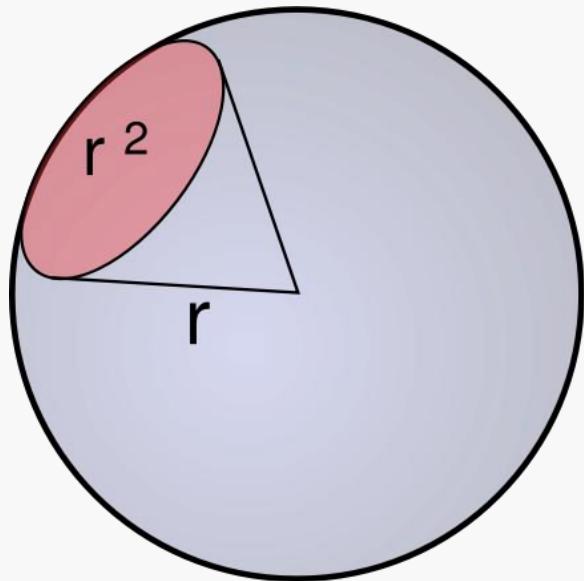


Grandezas radiométricas (SI)

Quantity	Symbol	SI unit	Abbr.	Notes
Radiant energy	Q	joule	J	energy
Radiant flux	Φ	watt	W	radiant energy per unit time, also called <i>radiant power</i>
Radiant intensity	I	watt per steradian	$W \cdot sr^{-1}$	power per unit solid angle
<u>Radiance</u>	L	watt per steradian per square metre	$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$	power per unit solid angle per unit projected source area. <i>Sometimes confusingly called "intensity".</i>
<u>Irradiance</u>	E	watt per square metre	$W \cdot m^{-2}$	power incident on a surface. <i>Sometimes confusingly called "intensity".</i>
Radiant exitance / Radiant emittance	M	watt per square metre	$W \cdot m^{-2}$	power emitted from a surface. <i>Sometimes confusingly called "intensity".</i>
Spectral radiance	L_λ or L_v	watt per steradian per metre ³ <i>or</i> watt per steradian per square metre per hertz	$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-3}$ <i>or</i> $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$	commonly measured in $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$
Spectral irradiance	E_λ or E_v	watt per metre ³ <i>or</i> watt per square metre per hertz	$W \cdot m^{-3}$ <i>or</i> $W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$	commonly measured in $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$

Grandezas radiométricas (SI)

- Steradiano: unidade de ângulo sólido

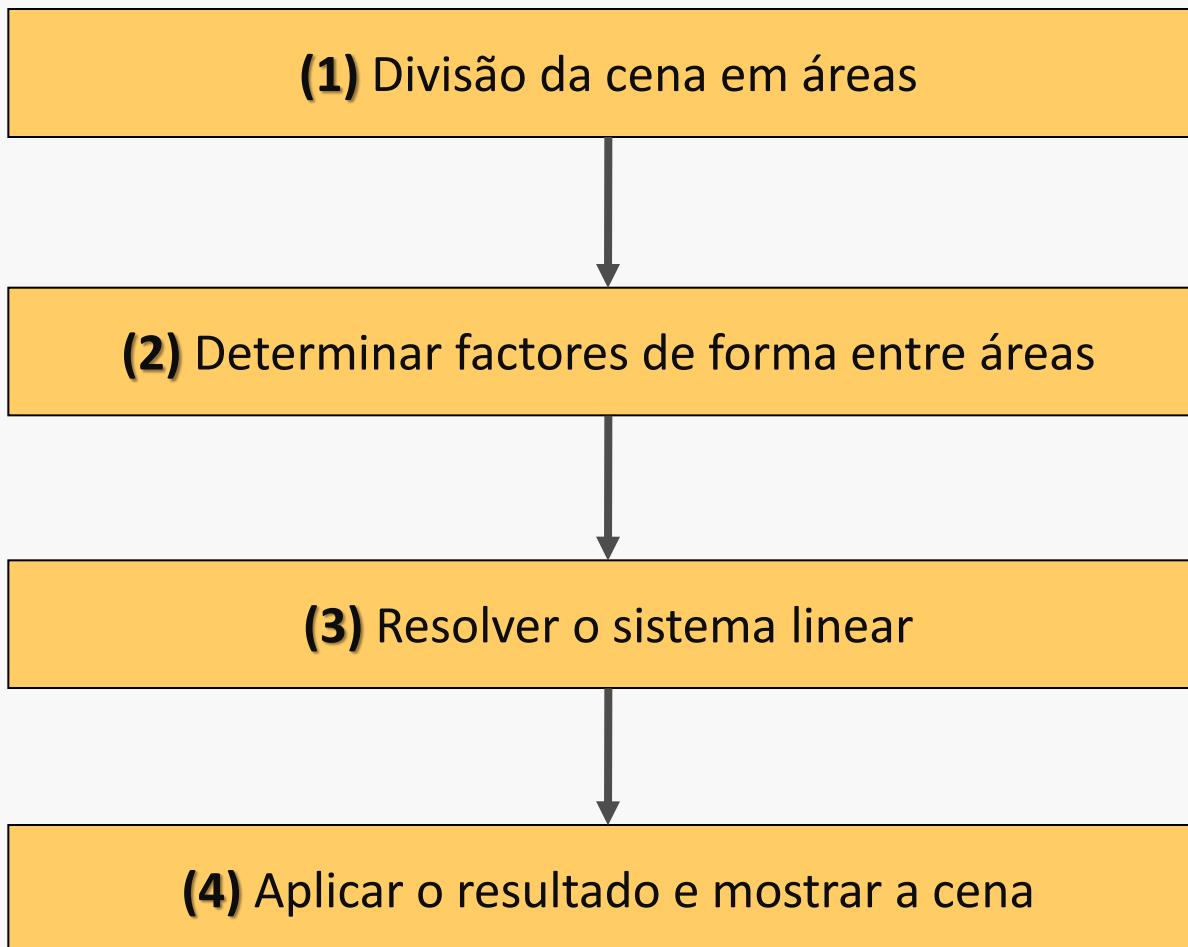


Grandezas fotométricas (SI)

Caso particular de grandezas radiométricas

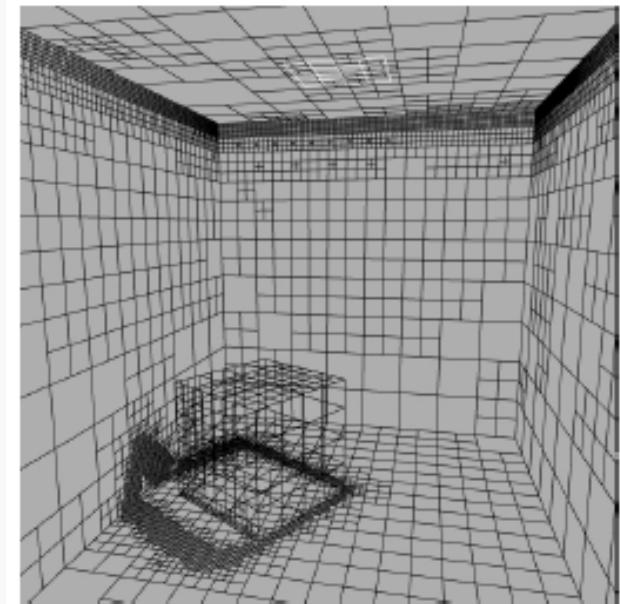
Quantity	Symbol	SI unit	Abbr.	Notes
Luminous energy	Q_v	lumen second	$\text{lm}\cdot\text{s}$	units are sometimes called Talbots
Luminous flux	F	lumen (= cd·sr)	lm	also called <i>luminous power</i>
Luminous intensity	I_v	candela (= lm/sr)	cd	an SI base unit
<u>Luminance</u>	L_v	candela per square metre	cd/m^2	units are sometimes called nits
<u>Illuminance</u>	E_v	lux (= lm/m ²)	lx	Used for <u>light incident</u> on a surface
Luminous emittance	M_v	lux (= lm/m ²)	lx	Used for light emitted from a surface
Luminous efficacy		lumen per watt	lm/W	ratio of luminous flux to radiant flux; maximum possible is 683.002

Algoritmo clássico da radiosidade



(1) Divisão da cena em áreas

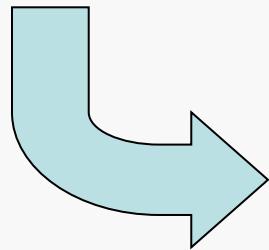
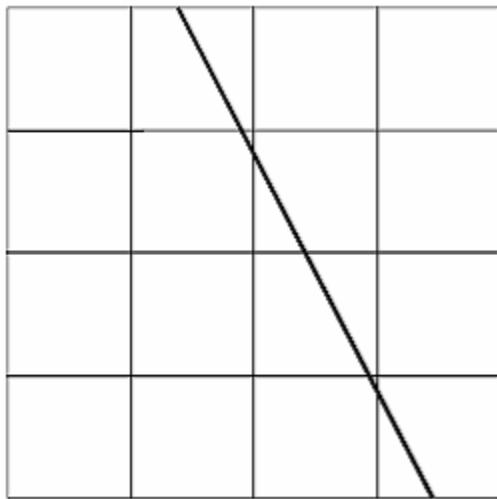
- A divisão da cena em áreas vai, no limite, condicionar o desempenho do algoritmo da radiosidade
- A carga computacional do algoritmo é proporcional ao quadrado do número de áreas de uma cena ($O(n^2)$)
 - No entanto, quanto maior a divisão, melhores os resultados obtidos
 - o valor da radiosidade é constante por área
 - É necessário, por isso, optimizar o processo de divisão
 - Uma forma é aplicar um processo adaptativo



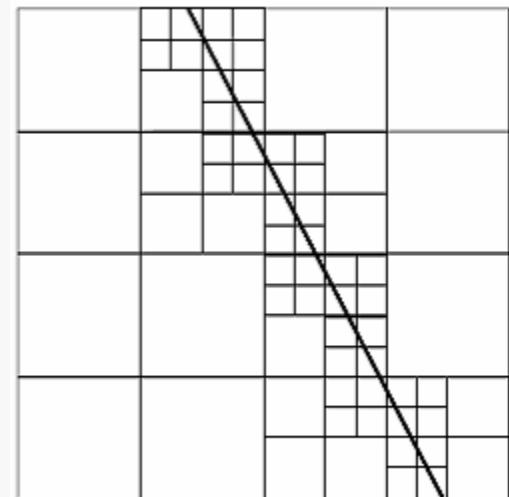
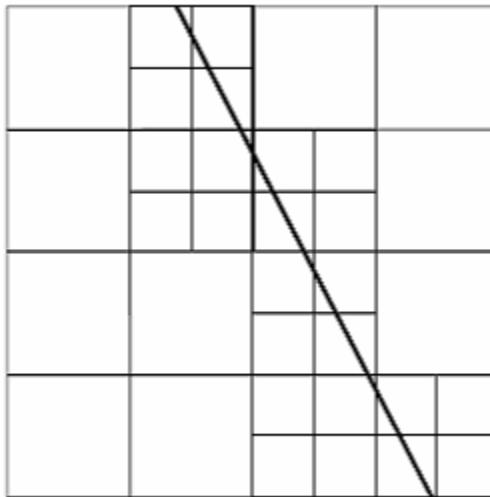
(1) Divisão da cena – processo adaptativo

- Partindo do princípio que existem zonas onde o **gradiente de radiosidade é elevado** (i.e. zonas de transição de luz para sombra), é possível balançar o número de áreas consoante esse gradiente
- Nestas zonas, a subdivisão é grande de forma a optimizar o resultado final do algoritmo
- Mas esta divisão tem de ser efectuada à medida que os valores da radiosidade são calculados
- À partida, não existe um conhecimento das zonas com altos gradientes e das zonas com valores constantes

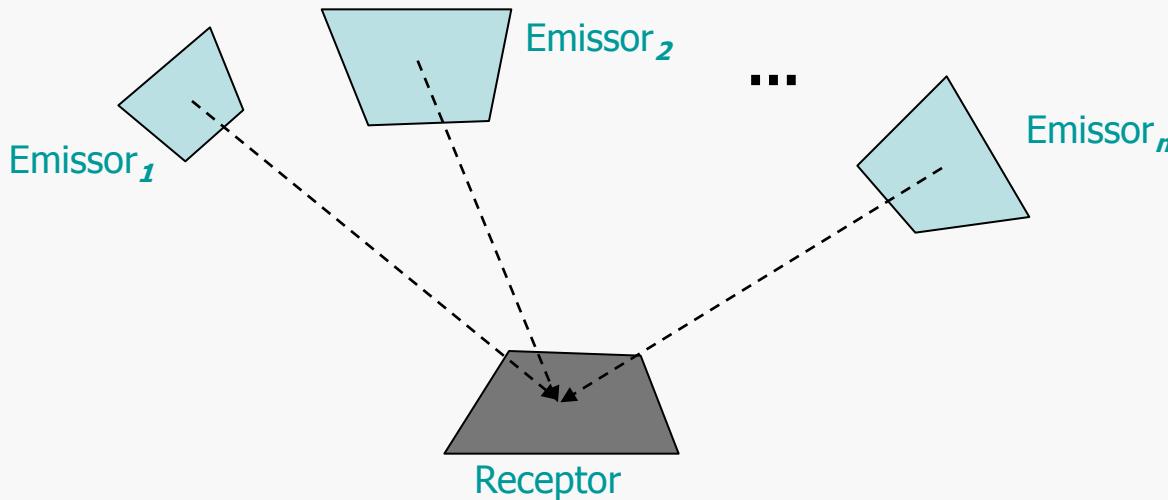
(1) Divisão da cena – processo adaptativo



- Inicia-se com um conjunto de áreas de igual dimensão
 - ... e em número reduzido
- Quando, calculados os valores da radiosidade (intermédios, não os valores finais!), é detectada uma zona de gradiente, procede-se à subdivisão de cada uma das áreas (por exemplo em quatro)
- Deve ser imposto um limite de subdivisão



Equação da radiosidade



- A equação da radiosidade para superfícies Lambertianas de área normalizada:

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{1 \leq j \leq n} \frac{(B_j A_j) \cdot F_{j-i}}{A_i}$$

- Para cada área, considera-se a influência das restantes
-

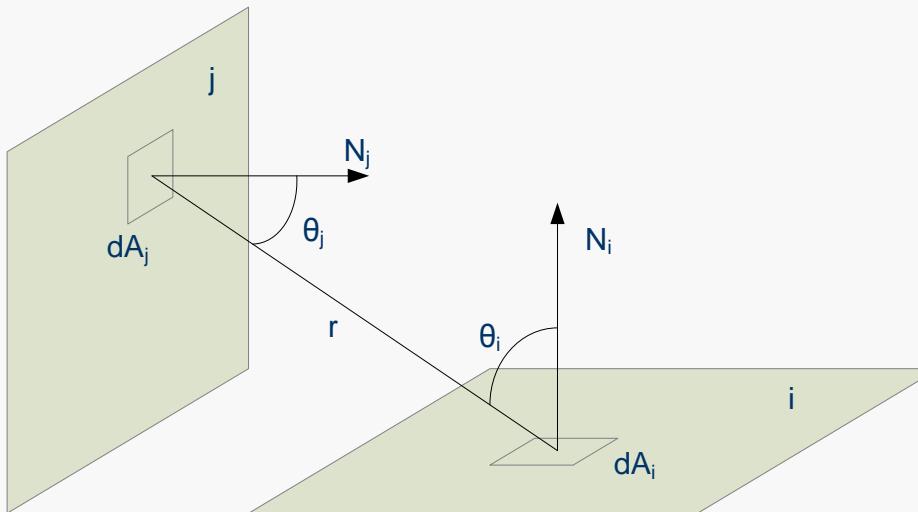
Equação da radiosidade

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{1 \leq j \leq n} \frac{(B_j A_j) \cdot F_{j-i}}{A_i}$$

- B_i é a **radiosidade total** em watts/m^2 (i.e. energia/unidade de tempo/unidade de área) que radia da superfície i
- E_i é a **luz emitida** em watts/m^2
- ρ_i é a **fracção de energia incidente reflectida**, pela superfície i
 - este coeficiente está relacionada com o coeficiente k_d no modelo de iluminação de Phong
- A_j é a **área** da superfície j'
- $(B_j A_j)$ é a **energia total radiada** pela superfície j com área A_j
- F_{j-i} é o **factor de forma** entre as superfícies i e j ($\sum_{i=1}^n F_{j-i} = 1$)

(2) Factores de forma

- Um factor de forma F_{j-i} é um factor adimensional que representa a fracção de energia que deixa a superfície j e chega à superfície i



$$F_{j-i} = \frac{1}{A_j} \int \int \frac{\cos \theta_j \cos \theta_i}{\pi r^2} dA_i dA_j$$

Um ângulo sólido
A forma como uma
superfície “vê” a outra

(3) Sistema de equações

- Partindo de

$$B_1 - \rho_1(F_{1-1}B_1 + F_{2-1}B_2 + F_{3-1}B_3 + \dots) = E_1$$

- Rescrevendo como um produto de vectores

$$\begin{bmatrix} (1 - \rho_1 F_{1-1}) & -\rho_1 F_{2-1} & -\rho_1 F_{3-1} & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ \vdots \end{bmatrix} = E_1$$

- Temos

$$\begin{bmatrix} (1 - \rho_1 F_{1-1}) & -\rho_1 F_{2-1} & -\rho_1 F_{3-1} & \dots \\ -\rho_2 F_{1-2} & (1 - \rho_2 F_{2-2}) & -\rho_2 F_{3-2} & \dots \\ -\rho_3 F_{1-3} & -\rho_3 F_{2-3} & (1 - \rho_3 F_{3-3}) & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

Ray-tracing

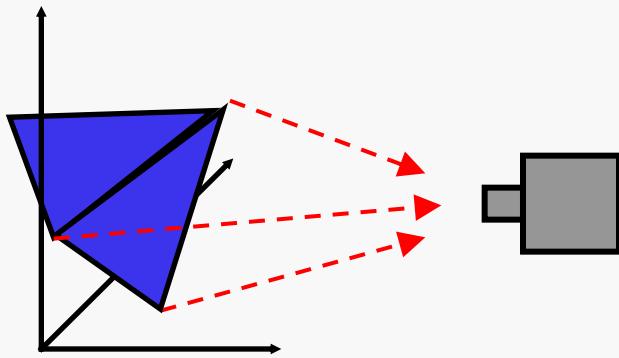
Computação Gráfica



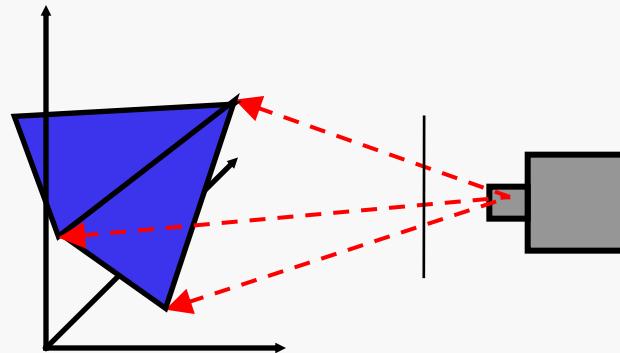


Ray tracing

Infinitos raios partindo das fontes de luz



ou

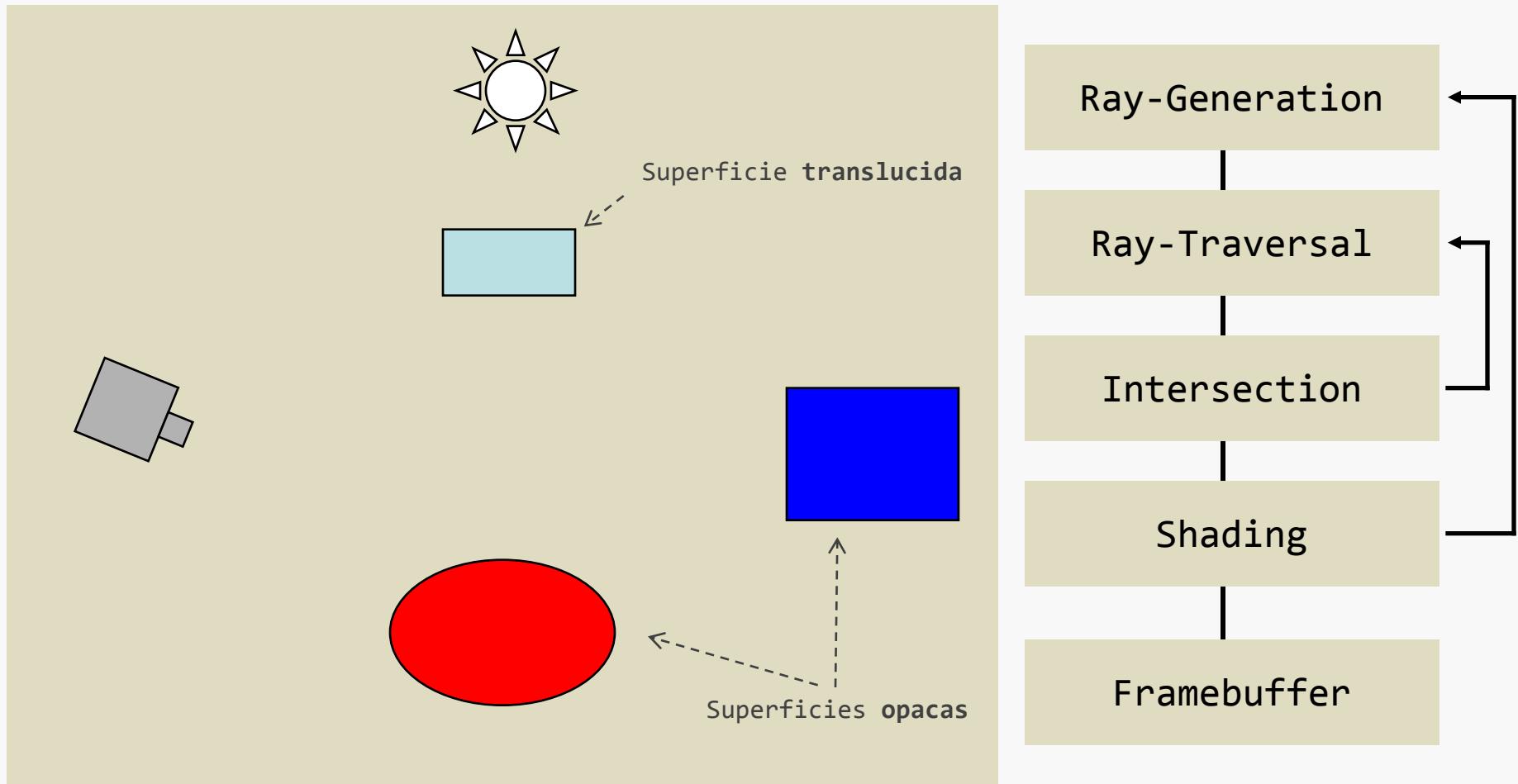


Número finito de raios partindo da câmera (1 raio por pixel)

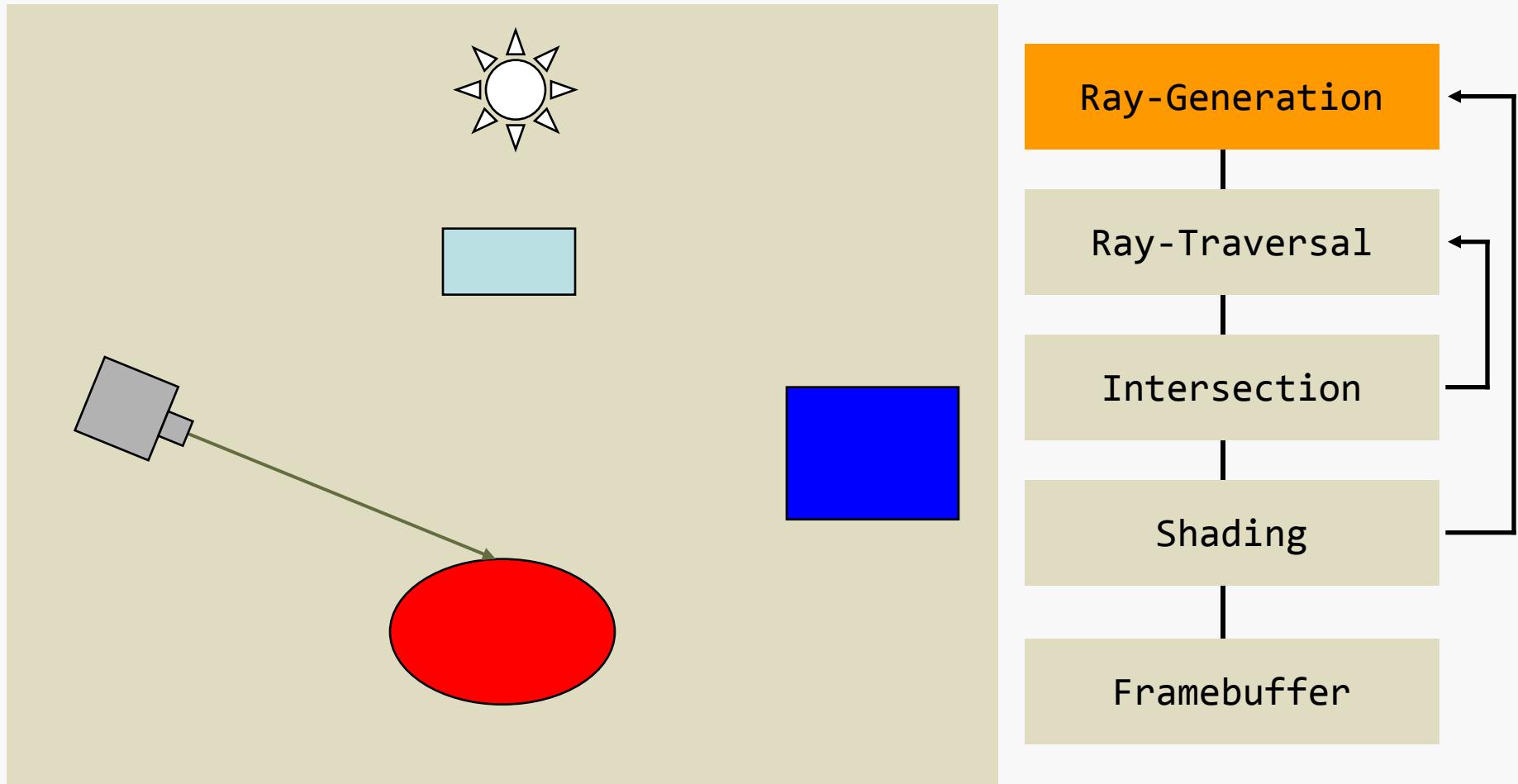
Vantagens:

- Facilmente paralelizável
- Pode funcionar em tempo real (com limitações, por enquanto...)
- Bom para cenas com superfícies especulares

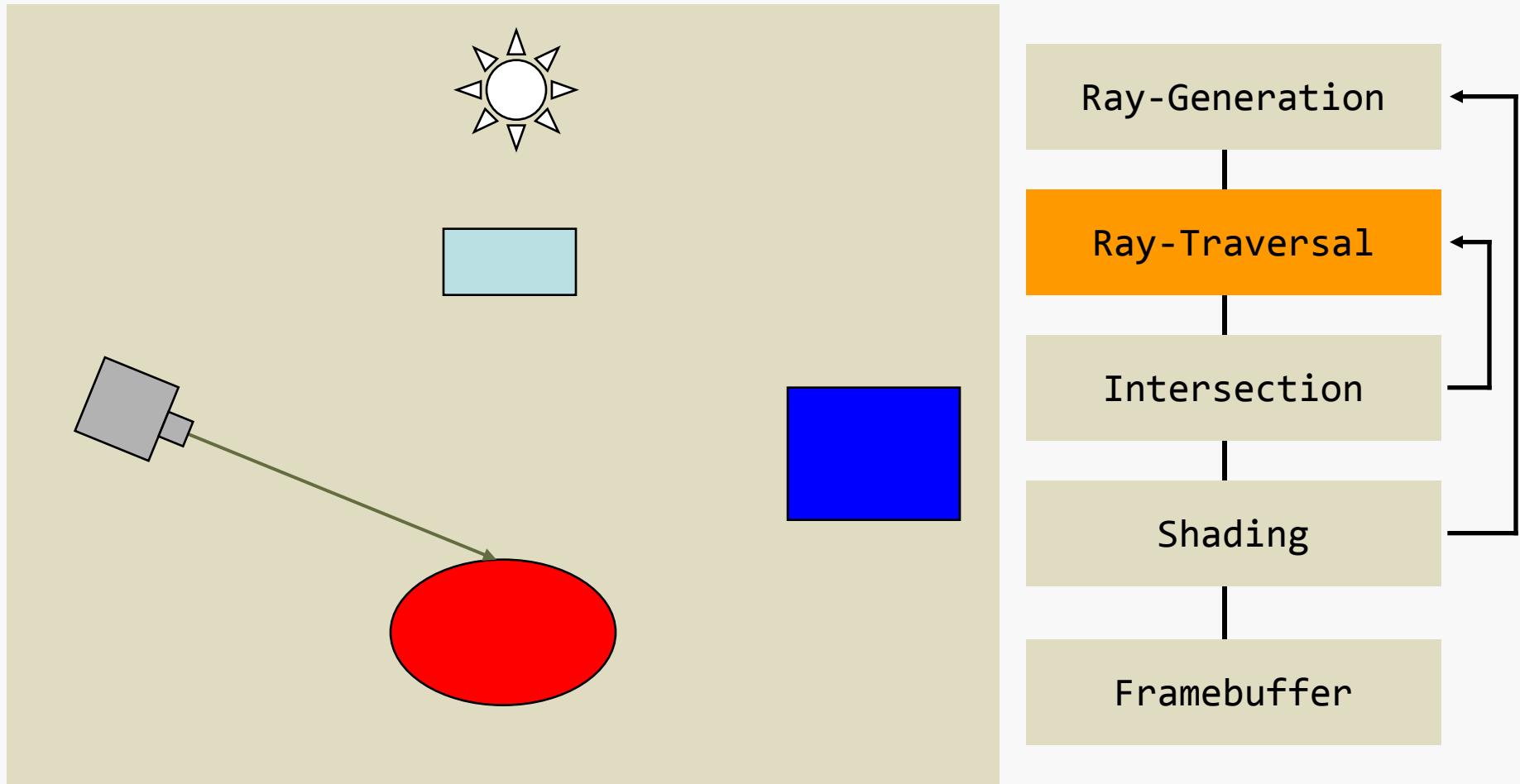
Ray tracing



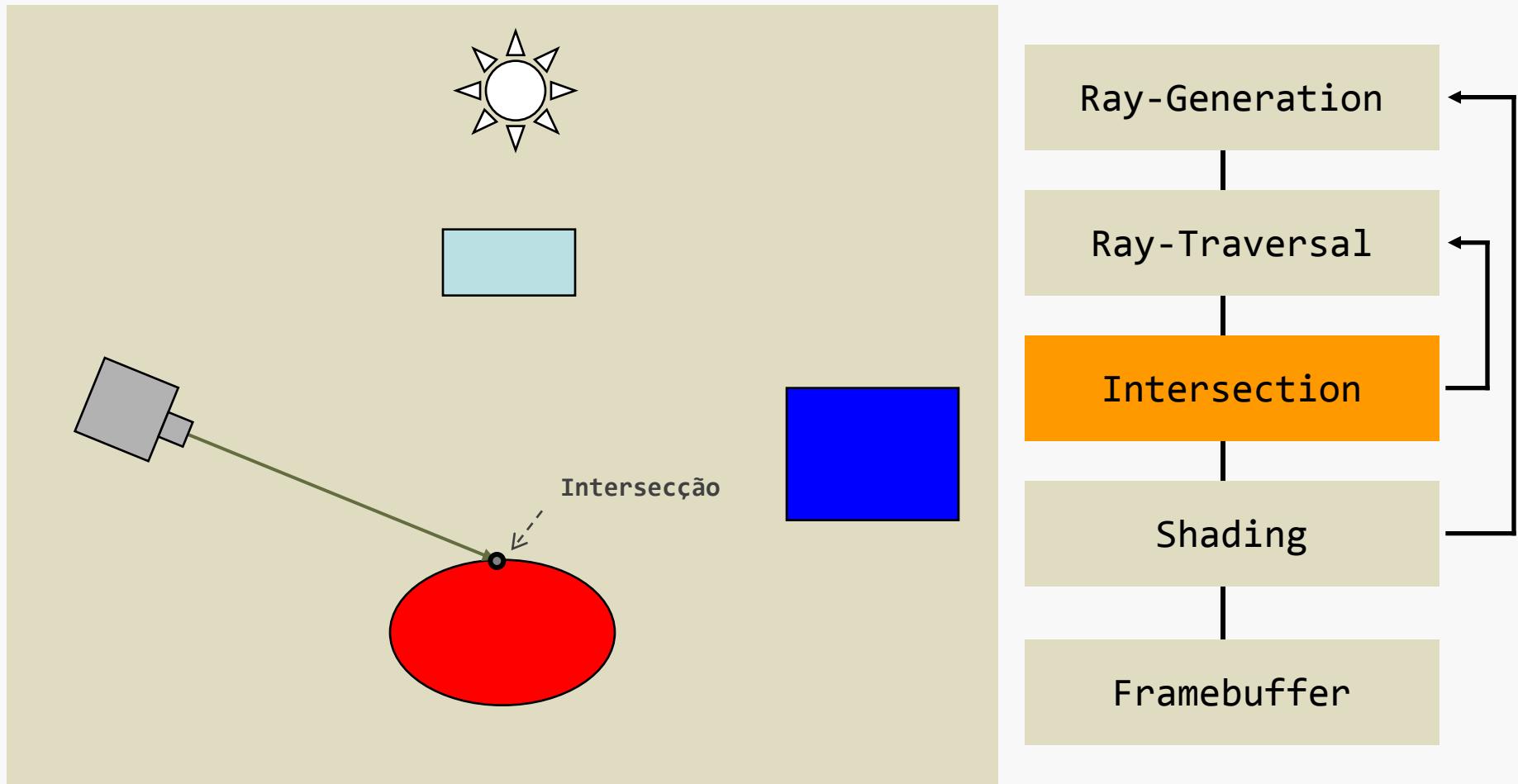
Ray tracing



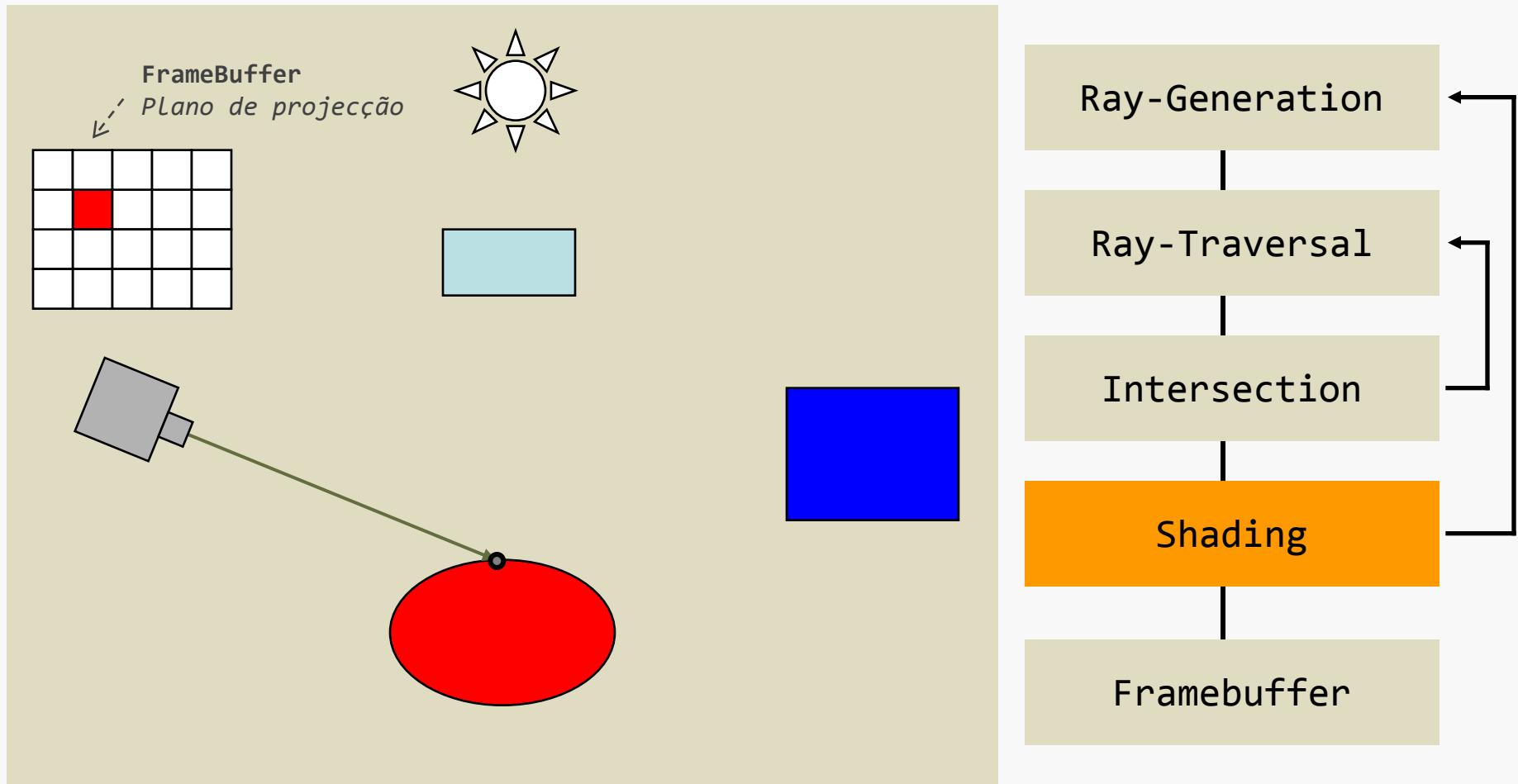
Ray tracing



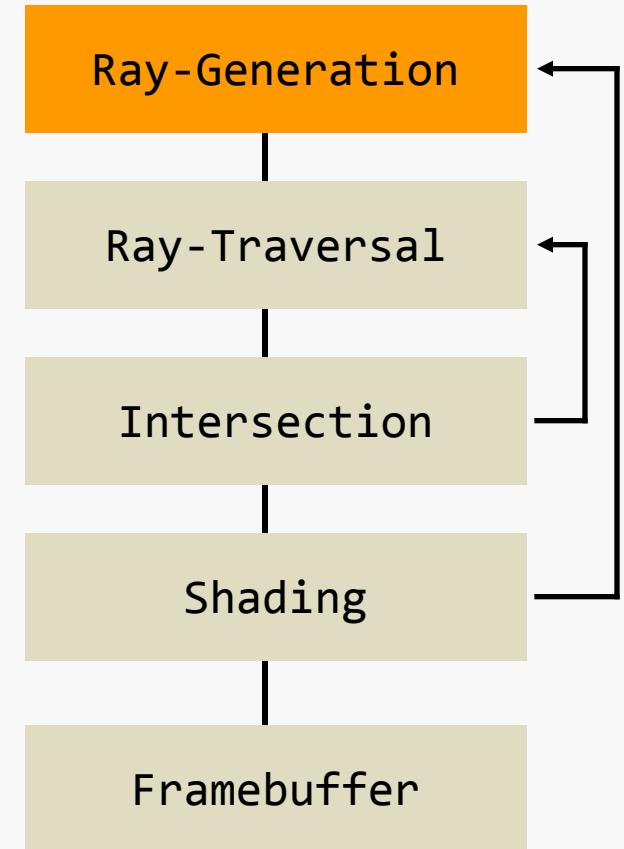
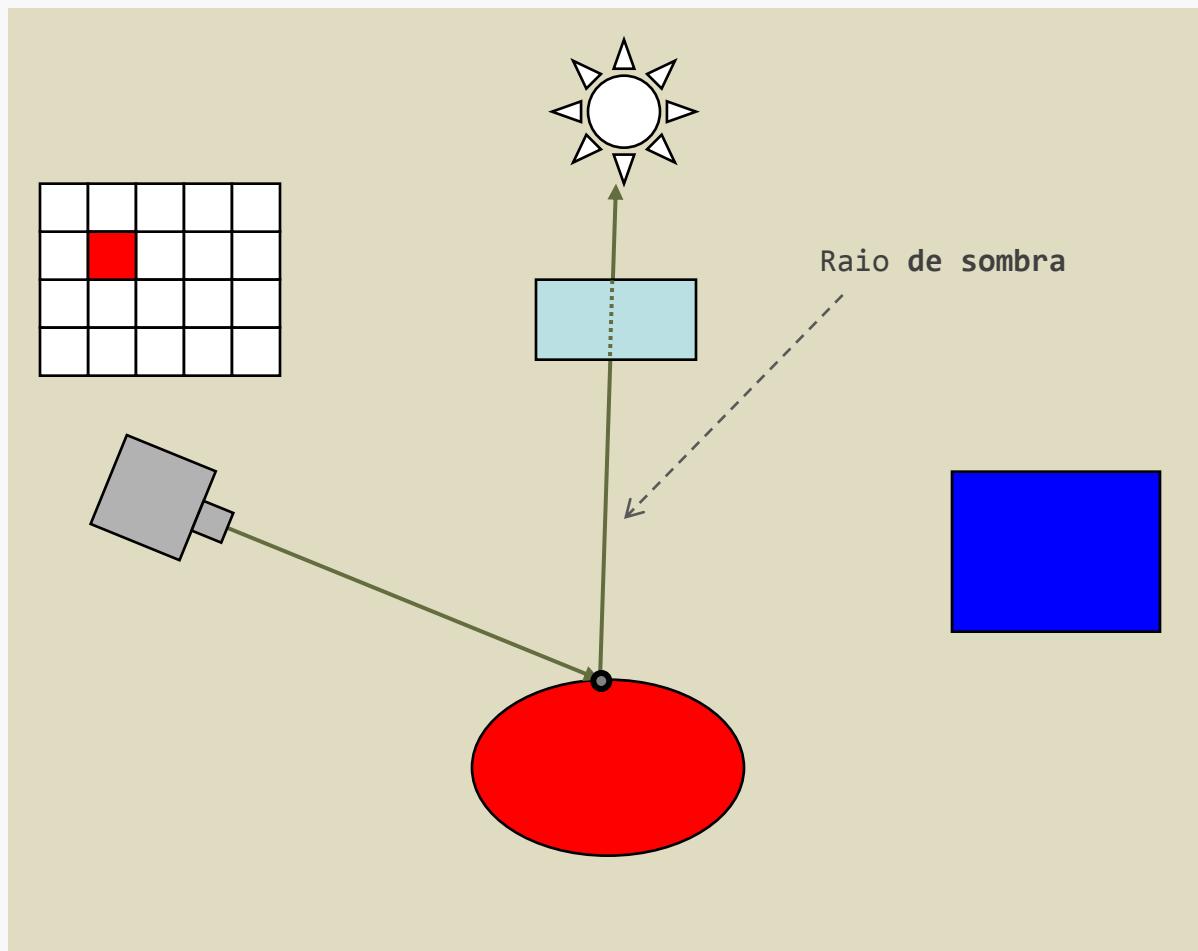
Ray tracing



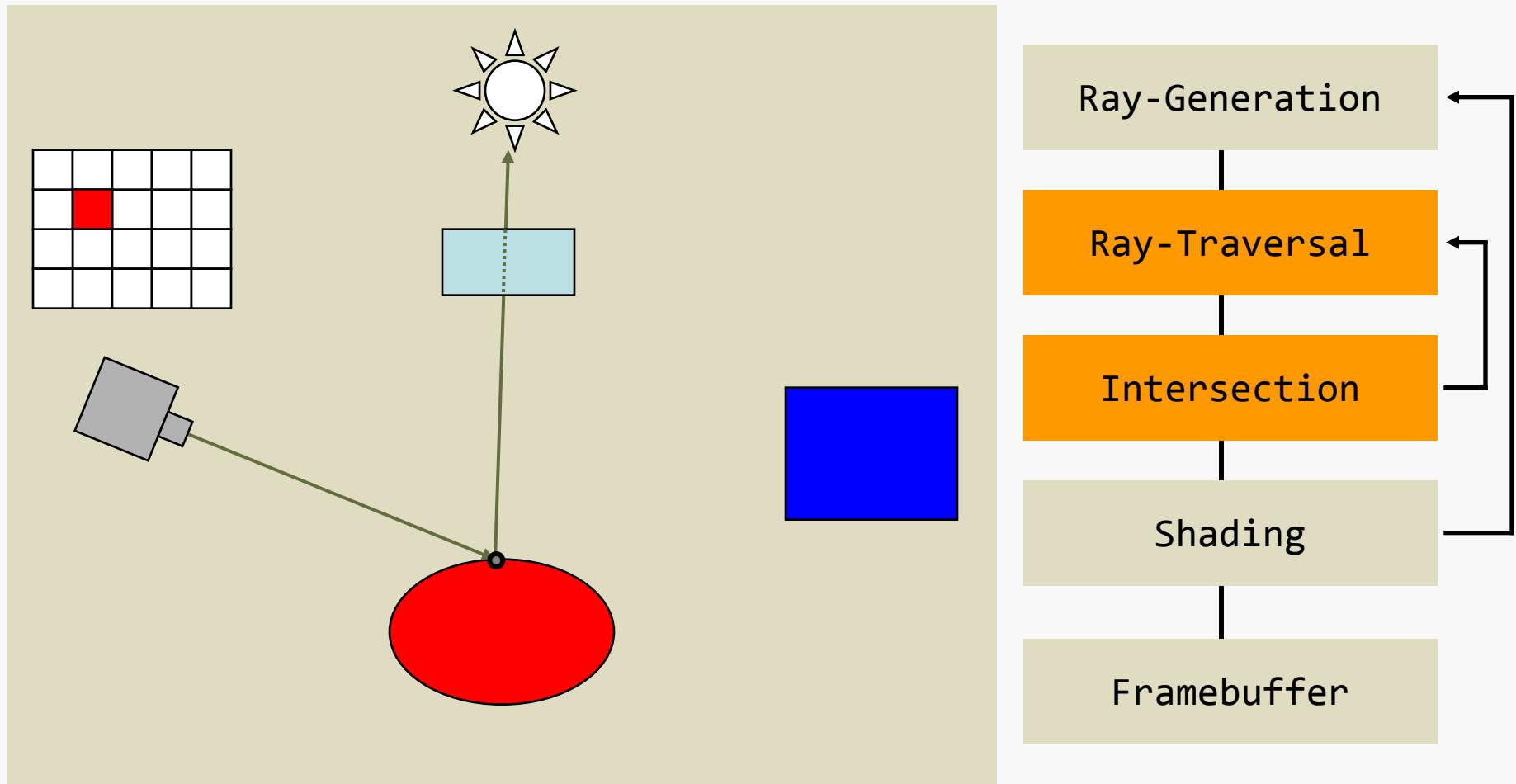
Ray tracing



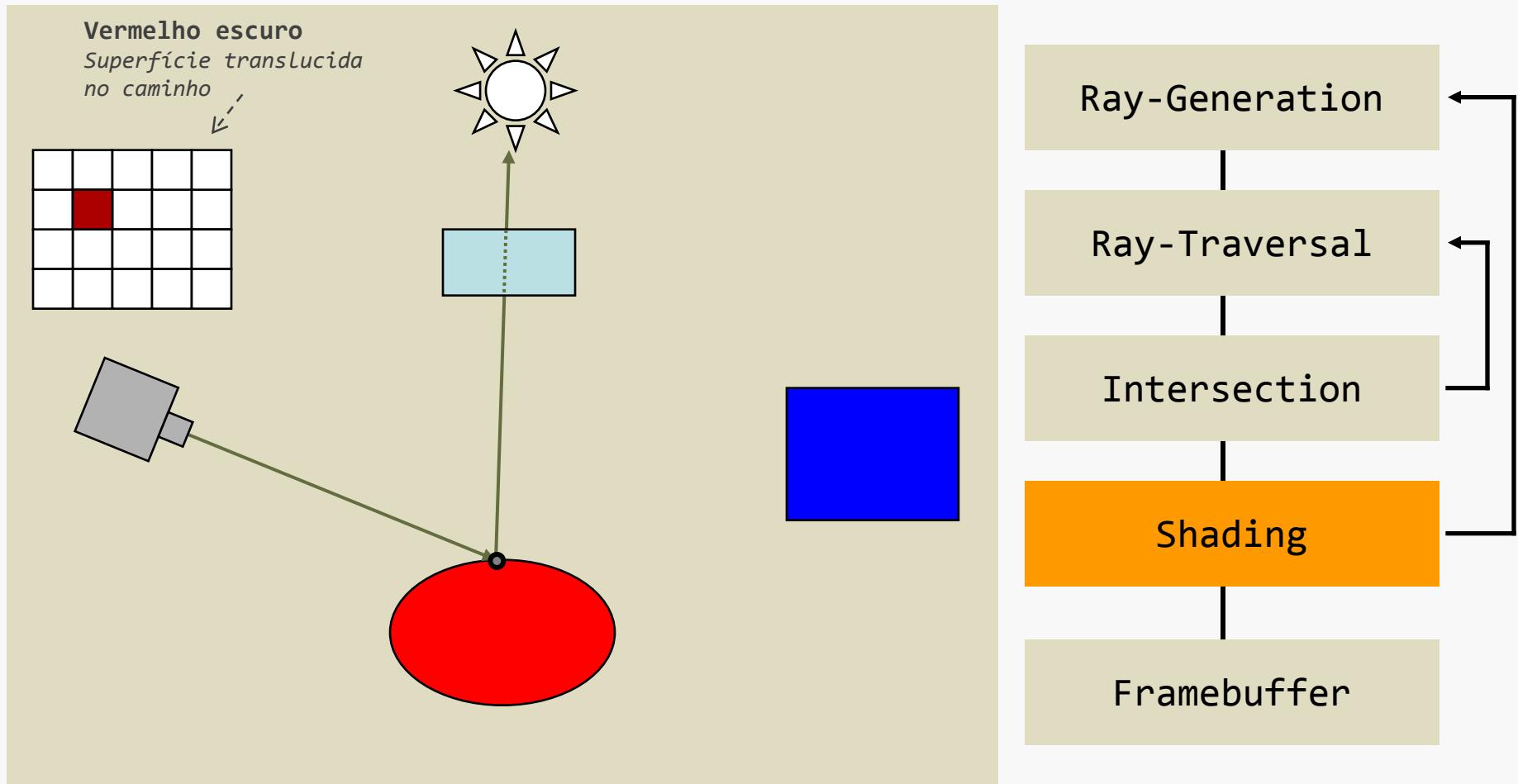
Ray tracing



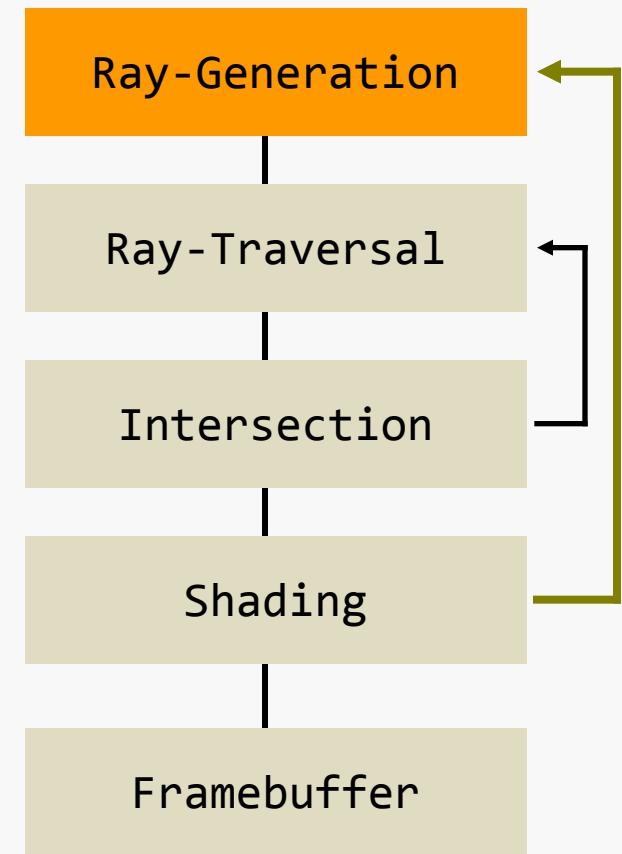
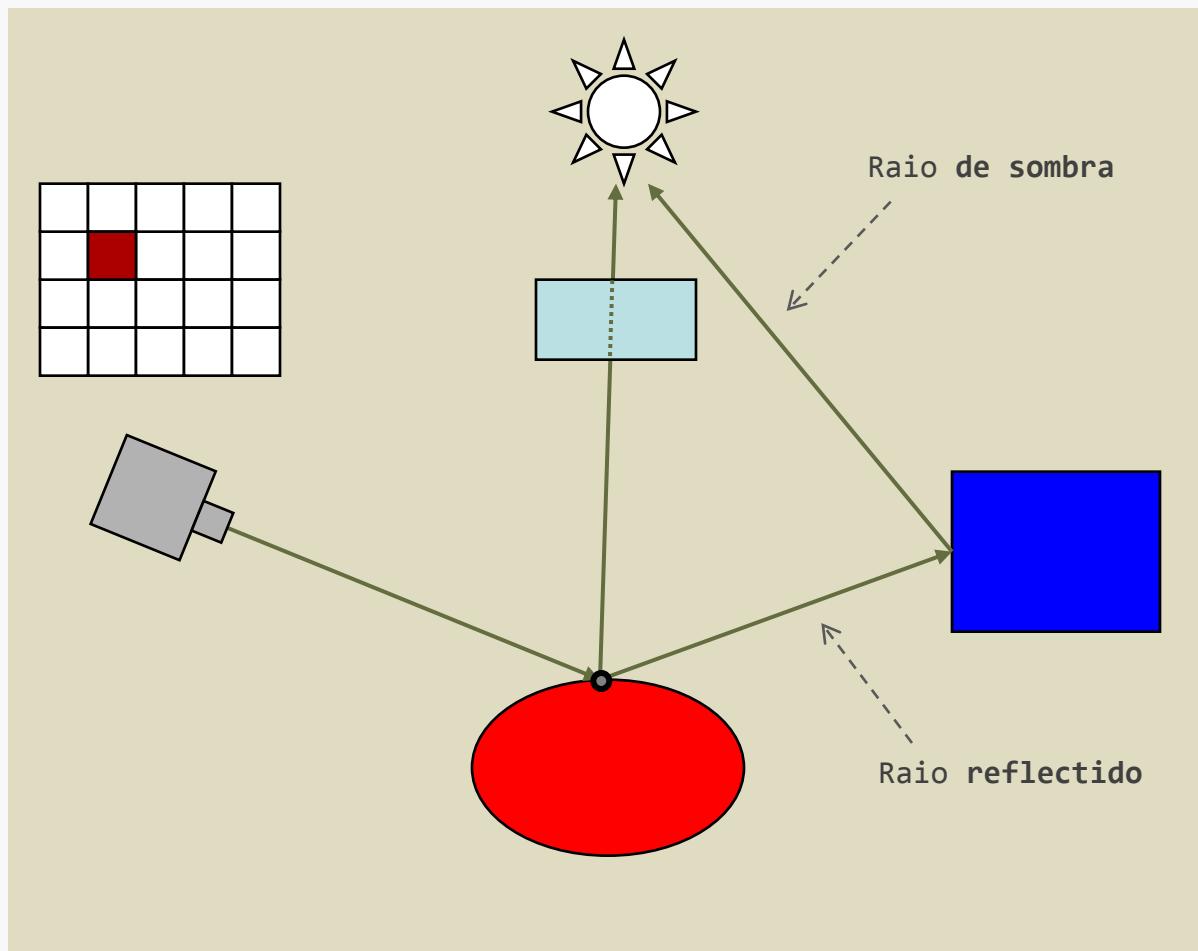
Ray tracing



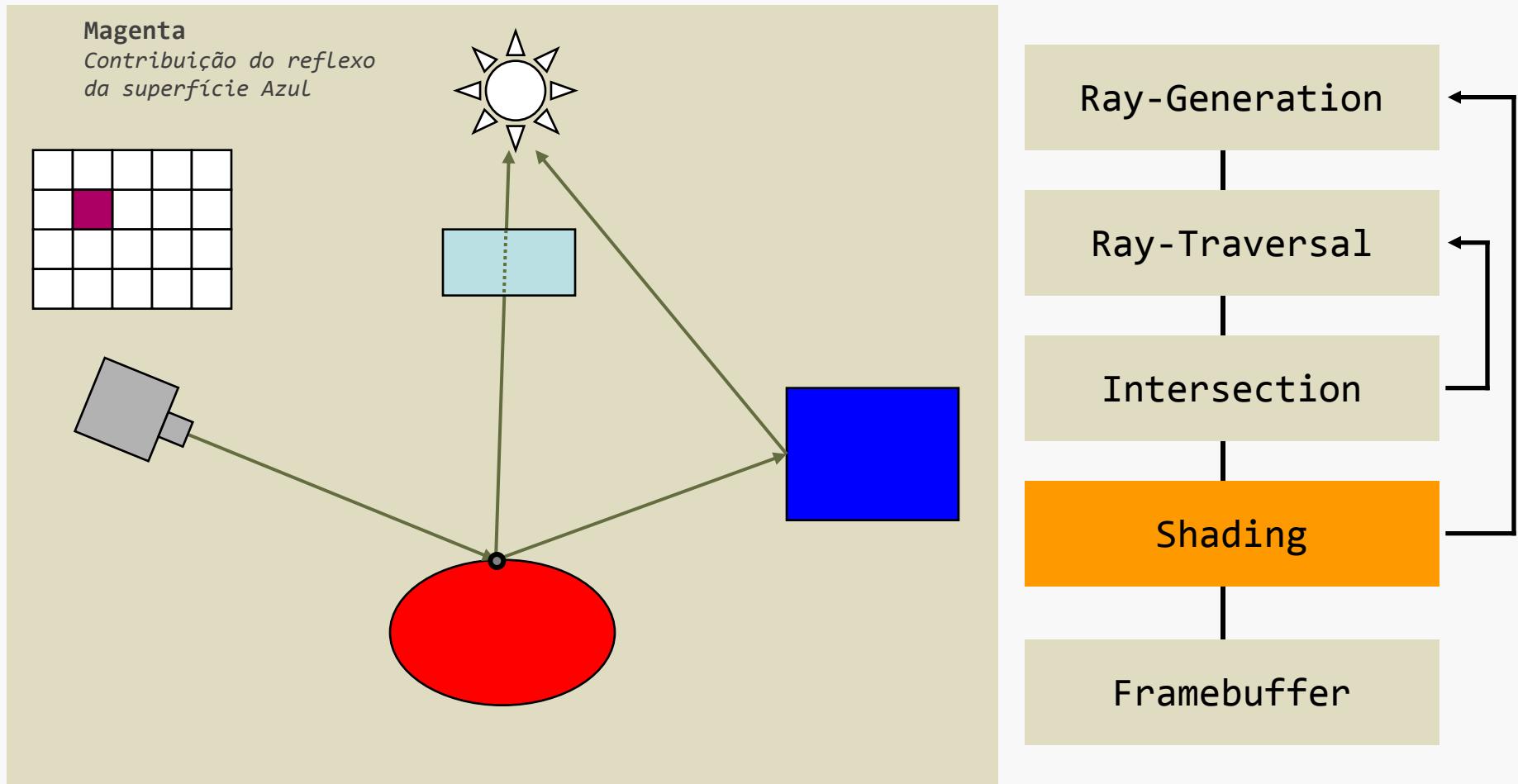
Ray tracing



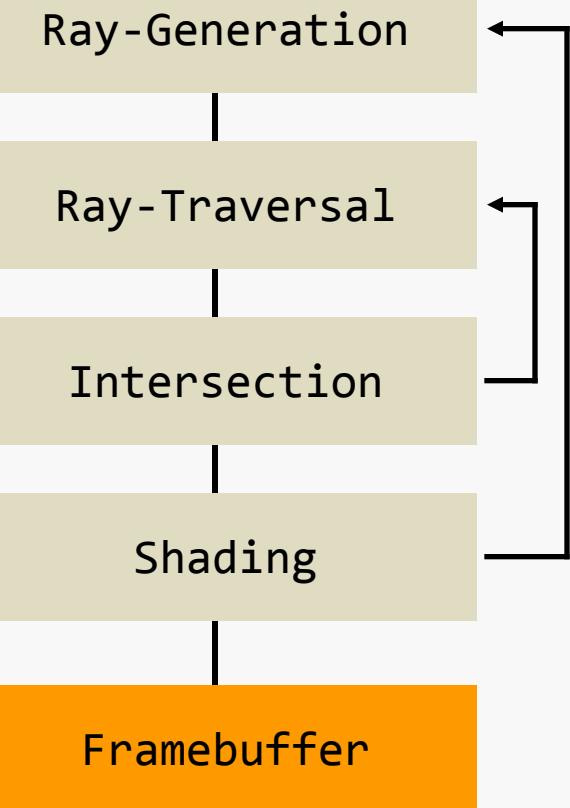
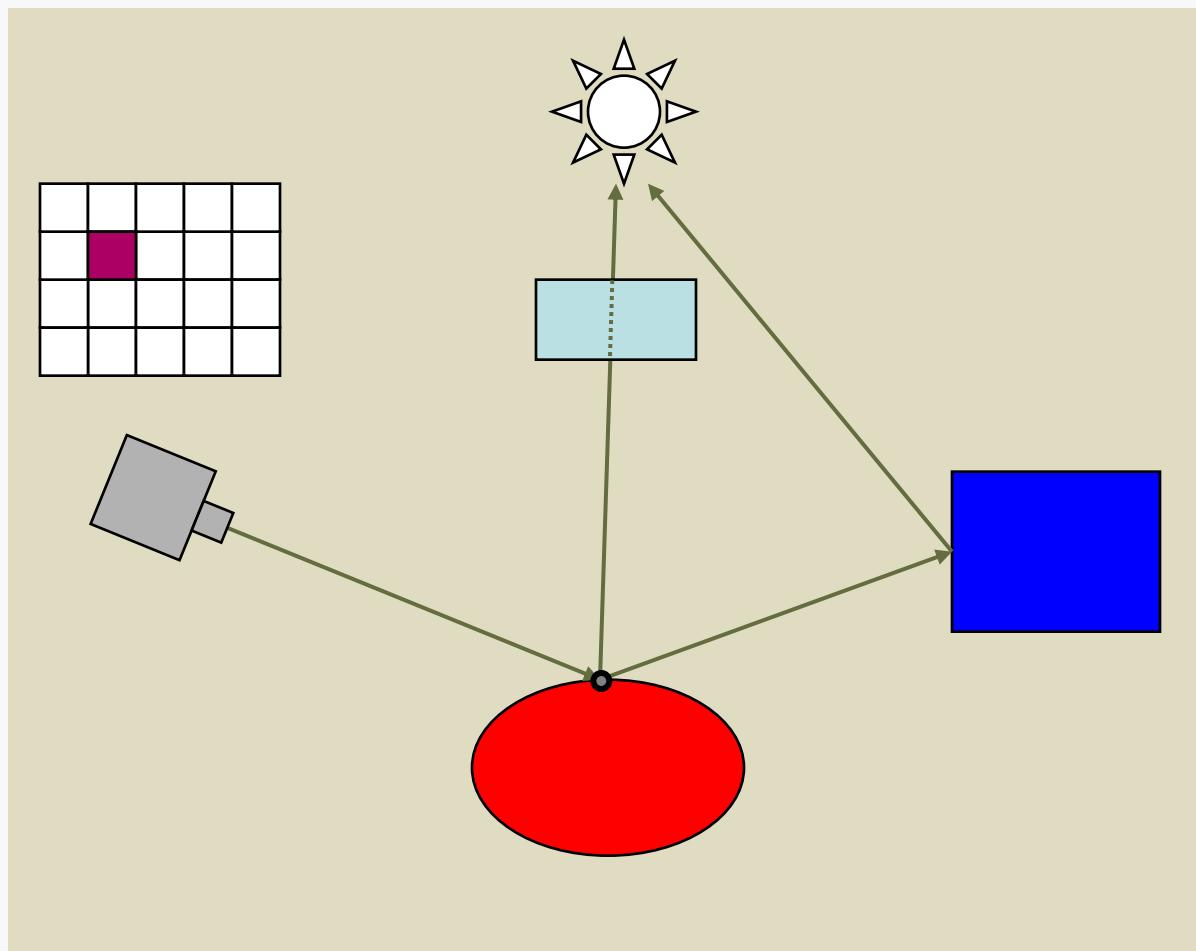
Ray tracing



Ray tracing



Ray tracing



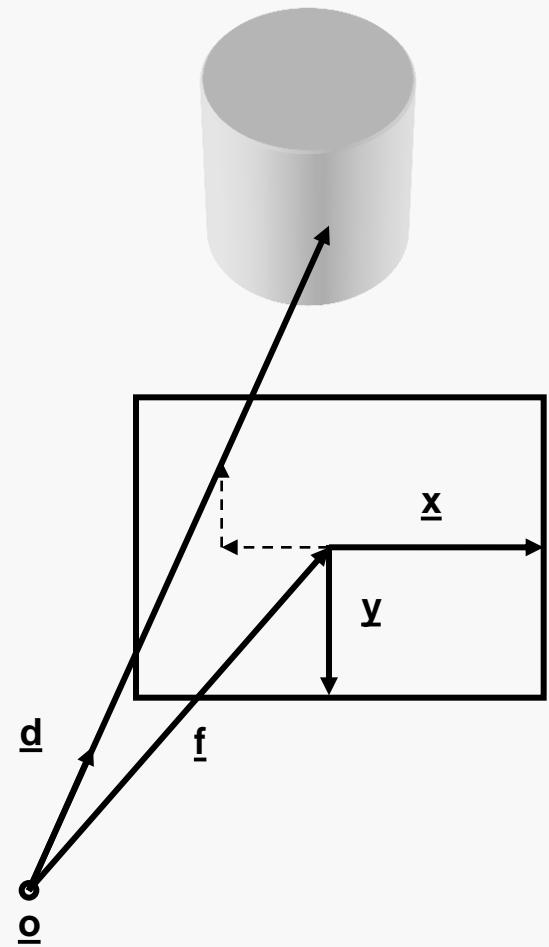
Ray tracing



Ray tracing

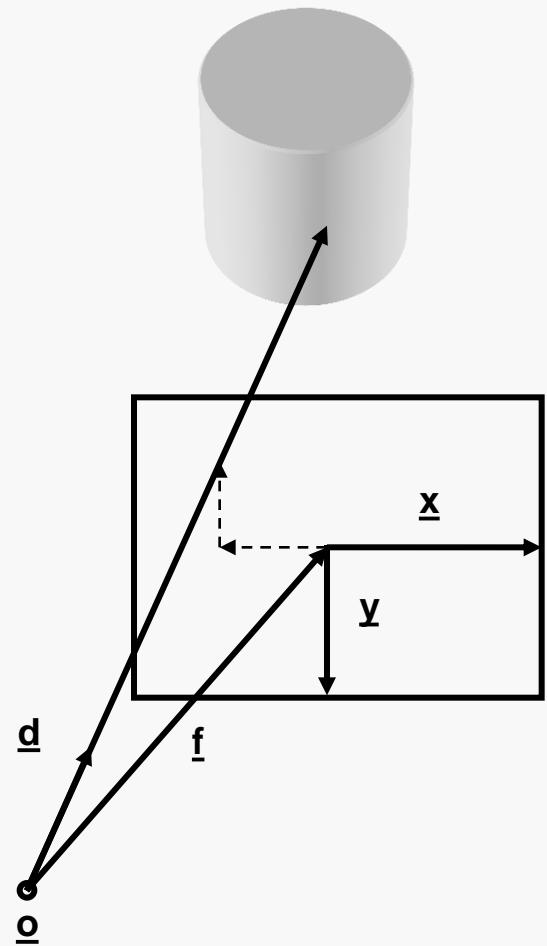
- **Modelo pinhole da câmara**

- **o**: Origem (câmara ou “olho”)
- **f**: Distância focal
- **x, y**: *Viewport*
- **xres, yres**: Resolução da imagem



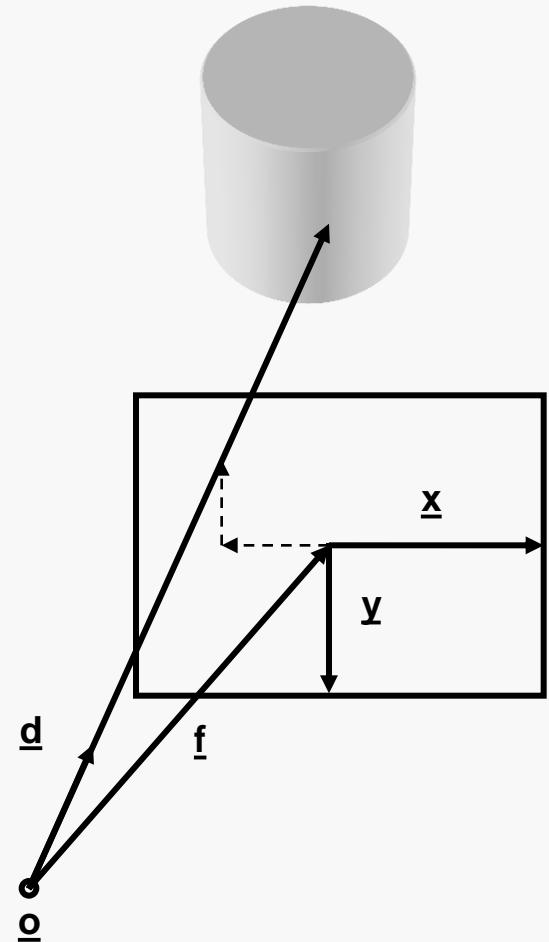
Ray tracing

```
for (x= 0; x < xres; x++)
    for (y= 0; y < yres; y++)
    {
        d = f + 2(x/xres - 0.5)·x
            + 2(y/yres - 0.5)·y;
        d = d/|d|; // Normalize
        col = trace(o, d);
        write_pixel(x,y,col);
    }
```



Ray tracing – intersecções

- Raio no espaço: $\underline{r}(t) = \underline{o} + t\underline{d}$
 - $\underline{o} = (o_x, o_y, o_z)$, $\underline{d} = (d_x, d_y, d_z)$
- Geometria das cenas
 - Planos: $(\underline{p}-\underline{a}) \cdot \underline{n}=0$
 - Definição implícita
(\underline{n} : normal, \underline{a} : ponto de aplicação)
 - Esferas: $(\underline{p}-\underline{c}) \cdot (\underline{p}-\underline{c}) - r^2=0$
 - \underline{c} : centro, r : raio da esfera
 - Triângulos: Plano + coordenadas 2D



Intersecção raio-esfera

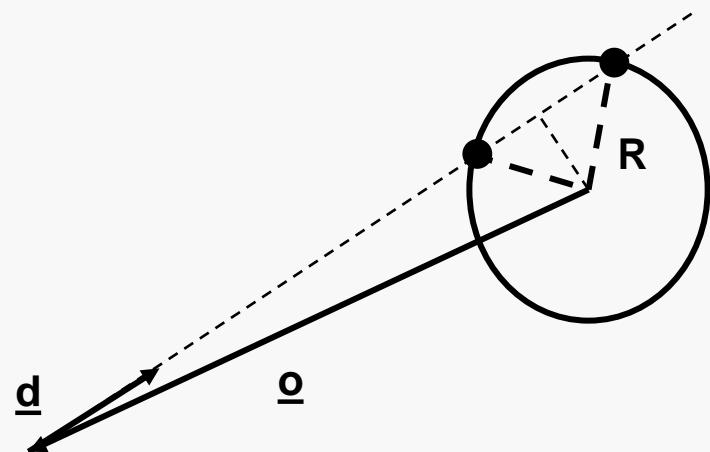
- Esfera
 - Esfera na origem: $(x^2 + y^2 + z^2 - 1 = 0)$
 - Substituindo o raio na equação, fica

$$t^2(d_x^2 + d_y^2 + d_z^2) + 2t(d_xo_x + d_yo_y + d_zo_z) + (o_x^2 + o_y^2 + o_z^2) - 1 = 0$$

Equação quadrática:

$$at^2 + bt + c = 0$$

Ao resolver, calculam-se os zeros
(intersecção do raio com a esfera)



Intersecção raio-plano

- Plano

- Equação: $\underline{p} \cdot \underline{n} - D = 0$, $|\underline{n}| = 1$

- Representação Implícita

- Normal: \underline{n}

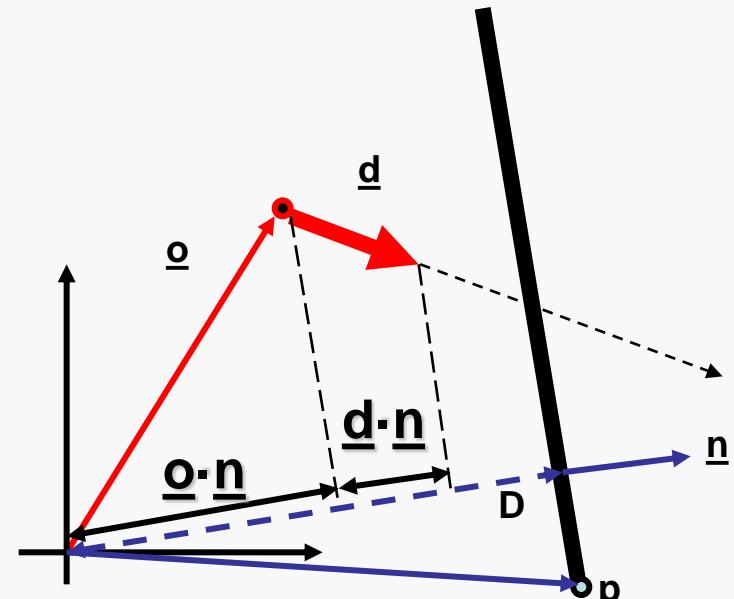
- Distância de $(0, 0, 0)$: D

- Substituir \underline{p} por $\underline{o} + t\underline{d}$

- $(\underline{o} + t\underline{d}) \cdot \underline{n} - D = 0$

- Resolvendo em ordem a t :

$$t = \frac{D - \underline{o} \cdot \underline{n}}{\underline{d} \cdot \underline{n}}$$



Intersecção raio-triângulo

- Coordenadas baricêntricas

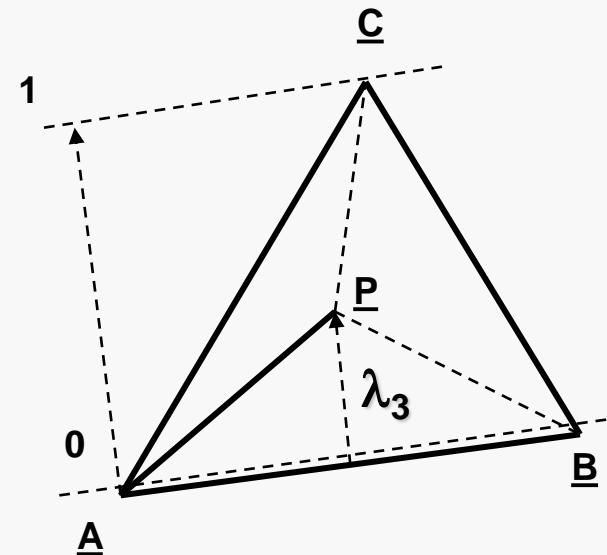
- Triângulo ABC

$$\underline{P} = \lambda_1 \underline{A} + \lambda_2 \underline{B} + \lambda_3 \underline{C}$$

$$- \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$$

$$- \lambda_3 = \angle(APB) / \angle(ACB) \text{ etc...}$$

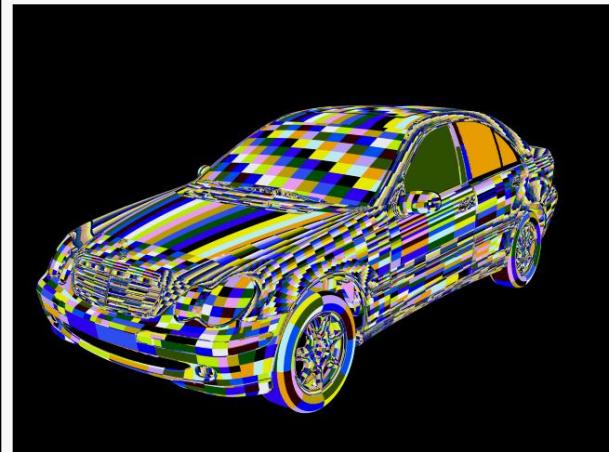
- Verifica-se intersecção se e só se todos os λ_i estiverem entre 0 e 1



Ray tracing



Ray tracing



Ray tracing



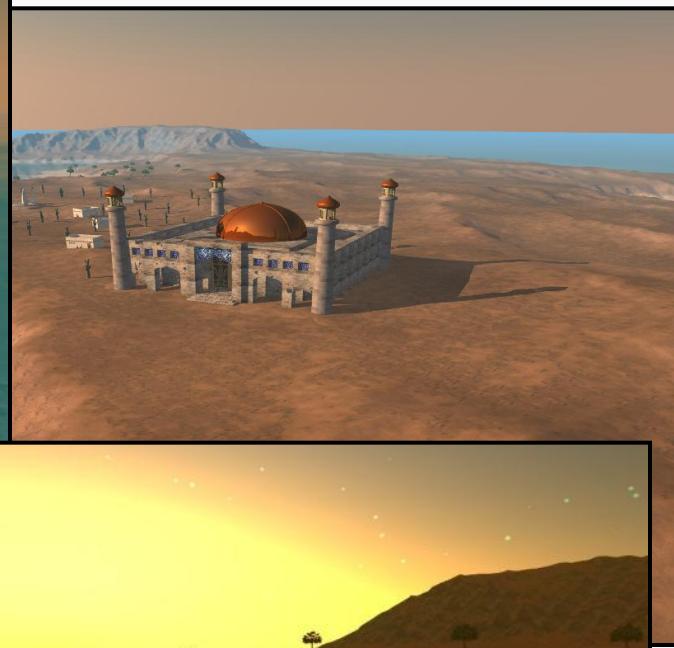
Ray-tracing



Local (Phong)

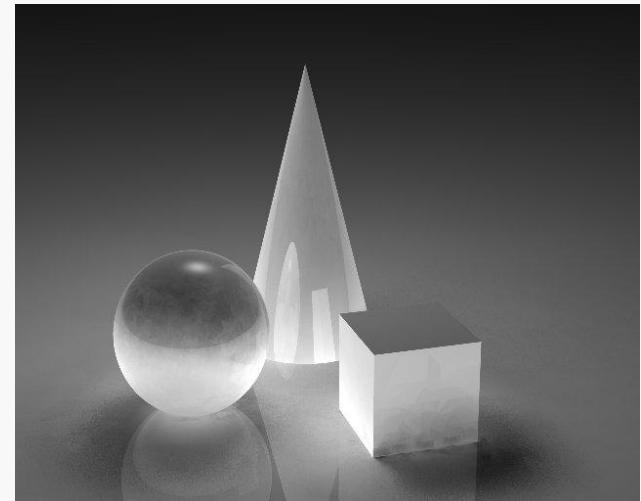
Ray tracing

Tempo real (40E6 polígonos)

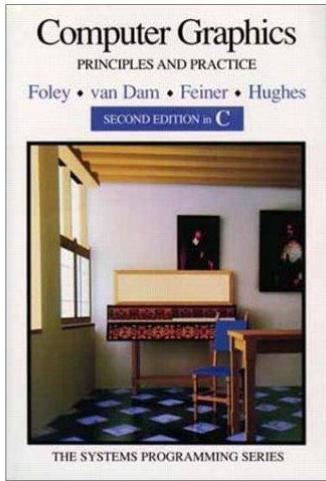


Comparação

- Nem o *ray-tracing* nem a radiosidade produzem resultados sem mácula
- Se a cena tiver muitas superfícies especulares perfeitas, o *ray-tracing* produz muito bons resultados
- No entanto, em cenas onde as superfícies são predominantemente difusas, a radiosidade funciona melhor
- As melhores soluções são encontradas com o recurso a técnicas híbridas:
 - ray-tracing para a componente especular
 - radiosidade para a componente difusa



Referências



Computer Graphics: Principles and Practice in C,

James D. Foley, Andries van Dam, Steven K. Feiner, John F. Hughes, Addison-Wesley Professional; 2nd edition (1995)

- Image Synthesis - Radiosity, C. Gotsman
- J. M. Brisson Lopes, IST, *Radiosidade*
- John F. Hughes, Andries van Dam, “*Radiosity*”, CS123, Brown University, 2006
- **Philipp Slusallek et al, “Introduction to Realtime Ray Tracing”, SIGGRAPH 2005**