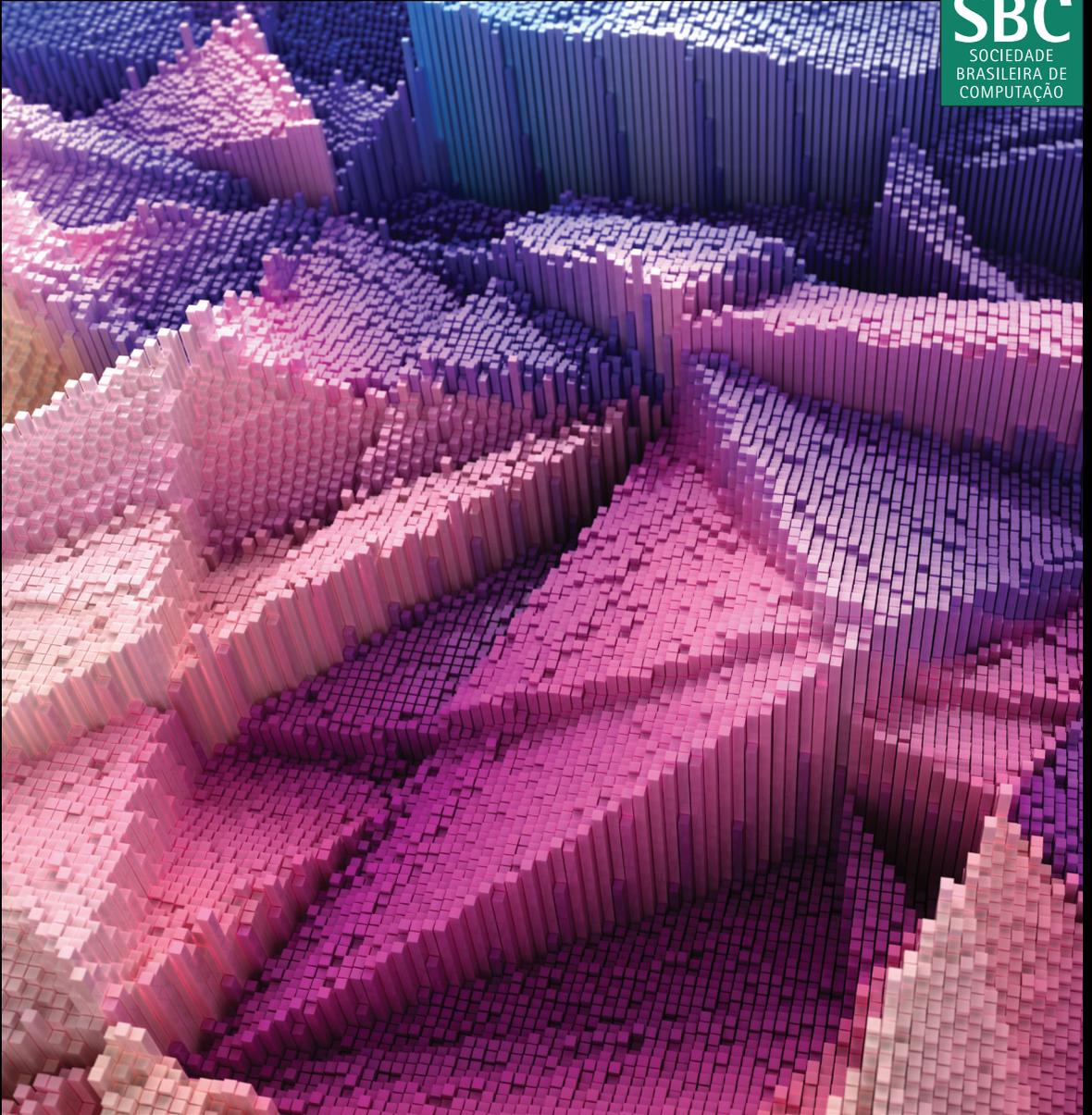


EDUARDO AZEVEDO | AURA CONCI | CRISTINA VASCONCELOS

S É R I E

**SBC**  
SOCIEDADE  
BRASILEIRA DE  
COMPUTAÇÃO



# Computação Gráfica

## Teoria e Prática:

---

### Geração de Imagens

**vol. 1**  
2ª edição

ELSEVIER

**COMPUTAÇÃO**  
**GRÁFICA: TEORIA**  
**E PRÁTICA**

GERAÇÃO DE IMAGENS



---

# COMPUTAÇÃO GRÁFICA: TEORIA E PRÁTICA

GERAÇÃO DE IMAGENS

2ª edição

ELSEVIER

© 2018, Elsevier Editora Ltda.

Todos os direitos reservados e protegidos pela Lei 9.610 de 19/02/1998.

Nenhuma parte deste livro, sem autorização prévia por escrito da editora, poderá ser reproduzida ou transmitida sejam quais forem os meios empregados: eletrônicos, mecânicos, fotográficos, gravação ou quaisquer outros.

ISBN: 978-85-352-8779-0

ISBN (versão digital): 978-85-352-8780-6

**Copidesque:** Gabriel Pereira

**Revisão tipográfica:** Augusto Coutinho

**Editoração Eletrônica:** Thomson Digital

**Elsevier Editora Ltda.**

**Conhecimento sem Fronteiras**

Rua da Assembleia, nº 100 – 6º andar – Sala 601  
20011-904 – Centro – Rio de Janeiro – RJ

Rua Quintana, 753 – 8º andar  
04569-011 – Brooklin – São Paulo – SP

Serviço de Atendimento ao Cliente

0800 026 53 40

atendimento1@elsevier.com

Consulte nosso catálogo completo, os últimos lançamentos e os serviços exclusivos no site [www.elsevier.com.br](http://www.elsevier.com.br)

**Nota**

Muito zelo e técnica foram empregados na edição desta obra. No entanto, podem ocorrer erros de digitação, impressão ou dúvida conceitual. Em qualquer das hipóteses, solicitamos a comunicação ao nosso serviço de Atendimento ao Cliente para que possamos esclarecer ou encaminhar a questão. Para todos os efeitos legais, a Editora, os autores, os editores ou colaboradores relacionados a esta obra não assumem responsabilidade por qualquer dano/ou prejuízo causado a pessoas ou propriedades envolvendo responsabilidade pelo produto, negligência ou outros, ou advindos de qualquer uso ou aplicação de quaisquer métodos, produtos, instruções ou ideias contidos no conteúdo aqui publicado.

A Editora

**CIP-BRASIL. CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO  
SINDICATO NACIONAL DOS EDITORES DE LIVROS, RJ**

C747c

2. ed.

Conci, Aura

Computação gráfica : teoria e prática : geração de imagens / Aura Conci, Cristina Nader Vasconcelos, Eduardo Azevedo. - 2. ed. - Rio de Janeiro : Elsevier, 2018.  
: il. ; 24 cm.

ISBN 978-85-352-8779-0

1. Informática. I. Vasconcelos, Cristina Nader. II. Azevedo, Eduardo.

III. Título.

18-47526

CDD: 004

CDU: 004



*À memória de minha mãe.*

Aura Conci

*Dedico este livro a minha família.*

Cristina Nader Vasconcelos

*Dedico este livro a minha família que, ao meu lado, tem me apoiado incondicionalmente em minha jornada profissional.*

Eduardo Azevedo

# Os Autores

## Aura Conci

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Espírito Santo, possui mestrado e doutorado em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Professora do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-RJ de 1988 a 1994. Professora visitante na City University, em Londres, em 2007/2008, e na Universidade de York, no Canadá, em 2013. Pós-doutorado da CAPES em 2011 na Universidad Rey Juan Carlo-URJC de Madri e pesquisadora visitante do Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique da Aix-Marseille Université em 2017. É bolsista de produtividade do CNPq, Cientista do Nosso Estado da FAPERJ e professora titular da Universidade Federal Fluminense desde 1994, onde orientou a primeira e a centésima tese de doutorado do Instituto de Computação. Sua linha de pesquisa tem ênfase em Aplicações de Métodos Numéricos e Computação Visual, atuando principalmente nos seguintes temas de computação gráfica, análise e processamento de imagens e aplicações biomédicas. Membro da International Society for Geometry and Graphics-ISGG desde 1998, e vice-presidente desde 2013. Faz parte do corpo editorial do *International Journal of Signal and Imaging Systems Engineering* (IJSISE) e do *Journal of Medical Imaging and Health Informatics* (JMIHI). Tem colaborações internacionais permanentes em pesquisas com Canadá, China, Cuba, Espanha, Emirados Árabes Unidos, Equador, Eslováquia, França e Romênia.

## Cristina Nader Vasconcelos

Graduada em Ciência da Computação pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2003), e mestra (2005) e doutora (2009) em Informática pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em computação visual, atuando principalmente nos seguintes temas: visão computacional e processamento de imagens, reconhecimento de padrões e computação gráfica. Suas principais contribuições incluem temas de processamento genérico paralelo

em hardware gráfico aplicados a tarefas de visão computacional, métodos de otimização discreta em grafos para computação visual, processamento, gerenciamento e formatos de imagens e vídeo, estruturas de dados espaciais e métodos de aprendizado de máquina para análise de sinais. Desde 2014, atua na divulgação e formação de profissionais pesquisadores na área de aprendizado profundo. Atualmente é professora associada no Instituto de Computação da Universidade Federal Fluminense.

### **Eduardo Azevedo**

Autor dos livros *Desenvolvimento de Jogos 3D*, *Computação Gráfica: Imagens Gerativas* e *Computação Gráfica: Processamento de Imagens* e de dezenas de artigos publicados em revistas comerciais e congressos. Criou e coordenou diversas turmas de cursos de jogos e animação 3D nos níveis: técnico, graduação e pós-graduação. Mestre em Educação e Pós-Graduado em Interface pela Universidade Federal Fluminense, atua como Diretor de TI em empresas mídia e tecnologia, realizando a gestão da TI corporativa, do desenvolvimento de portal de vídeo e áudio, de ensino a distância e no desenvolvimento de jogos educacionais.

# Agradecimentos

Agradeço aos meus alunos, aos colegas do IC/UFF, aos professores e orientadores que tive ao longo de minha vida e especialmente a minha família.

Aura Conci

Agradeço ao Dr. Paulo Andrade e Raphael Argento pelo apoio prestado na elaboração do capítulo de animação, trazendo para este livro as mais recentes tecnologias no assunto.

Eduardo Azevedo

# Sumário

## CAPÍTULO 1

<b>VISÃO GERAL</b>	<b>1</b>
1.1. Um breve histórico	3
1.2. Áreas	4
1.3. Características da percepção visual	5
1.3.1. Informações monoculares	5
1.3.1.1. Perspectiva ou posicionamento face ao horizonte	5
1.3.1.2. Familiaridade com a cena ou tamanho relativo	6
1.3.1.3. Oclusão	7
1.3.1.4. Densidade das texturas	7
1.3.1.5. Variação da reflexão da luz e sombras	8
1.3.2. Informações visuais óculo motoras	9
1.3.2.1. Acomodação	10
1.3.2.2. Convergência	11
1.3.3. Informações visuais estereoscópicas	12
1.4. Representação de dados em CG	13
1.4.1. <i>Aliasing</i>	15
1.5. Modelagem e estrutura de dados	16
1.5.1. Sólidos	17
1.5.2. Sólidos realizáveis	18
1.5.3. Formas de representação de sólidos	19
1.5.3.1. Representação aramada ( <i>wire frame</i> )	19
1.5.3.2. Representação por faces (ou superfícies limitantes)	20
1.5.3.3. Representação por faces poligonais	22
1.5.3.4. Fórmula de Euler	23
1.5.3.5. Estrutura de dados baseada em vértices	25
1.5.3.6. Estrutura de dados baseada em arestas	25
1.5.3.7. Considerações finais sobre as listas de dados	26

## CAPÍTULO 2

<b>TRANSFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS NO PLANO E NO ESPAÇO</b>	<b>29</b>
2.1. Sistemas de coordenadas	31
2.1.1. Sistemas de coordenadas cartesianas	31
2.2. Sistemas de coordenadas e a Computação Gráfica	35
2.2.1. Sistema de coordenadas do objeto	36
2.2.2. Sistema de coordenadas do mundo	37

2.2.3. Sistema de coordenadas da câmera	38
2.2.4. Sistema de coordenadas normalizado	40
2.2.5. Sistema de coordenadas do dispositivo	41
2.3. Escalares, pontos e vetores	42
2.4. Aritmética de vetores	44
2.5. Produto interno e produto vetorial	45
2.6. Matrizes	48
2.7. Transformações lineares	52
2.7.1. Transformação de escala	54
2.7.2. Transformação de rotação	56
2.7.3. Outras transformações lineares	61
2.7.3.1. Transformação de reflexão	61
2.7.3.2. Transformação de cisalhamento	63
2.7.3.3. Descoberta de uma transformação linear qualquer	66
2.8. Transformações afins	67
2.8.1. Transformação de translação	67
2.8.2. Coordenadas homogêneas	68
2.8.3. Combinações de transformações	70
2.8.3.1. Escala ao longo de uma direção qualquer	71
2.8.3.2. Reescrevendo as rotações com cisalhamentos	71
2.8.3.3. Rotação ao redor de um ponto qualquer	72
2.9. Quatérnios – representação alternativa para rotações	72
2.9.1. Números complexos	74
2.9.2. Quatérnios	77
2.9.2.1. Adição de dois quatérnios	78
2.9.2.2. Multiplicação de quatérnios por valores reais	79
2.9.2.3. Produto de elementos da base de $\mathbb{H}$	80
2.9.2.4. Produto de dois quatérnios	80
2.9.2.5. Conjugado de um quatérnio	82
2.9.3. Utilizando quatérnios	83
2.10. Câmera virtual	86
2.10.1. Câmera como objeto virtual 3D	87
2.10.1.1. Posicionando a câmera em relação à cena	88
2.10.1.2. Sistema de coordenadas da câmera	89
2.10.2. Projeção	91
2.10.2.1. Projeção paralela	91
2.10.2.2. Projeção em perspectiva	95
2.10.2.3. Especificação dos pontos de fuga	100
2.10.3. Câmera virtual (parâmetros intrínsecos)	102

## CAPÍTULO 3

### **CURVAS E SUPERFÍCIES** **105**

3.1. Representação de curvas	107
3.1.1. Conjunto de pontos	107
3.1.2. Representação analítica	109
3.1.3. Forma não paramétrica de representar curvas	109
3.1.4. Forma paramétrica de representar curvas	111

3.1.5. Curvas paramétricas de terceira ordem	114
3.1.6. Curvas de Hermite	114
3.1.7. Curvas de Bézier	120
3.1.8. Curvas Splines	126
3.1.8.1. B-Splines uniformes e periódicas	128
3.1.8.2. B-Splines não periódicas	129
3.1.8.3. B-Splines não uniformes	130
3.1.8.4. Desenvolvimento da formulação genérica de B-Splines	130
3.1.8.5. Interpolação com Splines	133
3.1.9. Curvas racionais	135
3.2. Superfícies	138
3.2.1. Superfícies de revolução	139
3.2.2. Superfícies geradas por deslocamento	140
3.2.3. Superfícies geradas por interpolação bilinear	141
3.2.4. Interpolações trilineares	143
3.2.5. Superfícies de formas livres	145
3.2.6. Superfícies paramétricas bicúbicas	145
3.2.7. Superfícies de Hermite	146
3.2.8. Superfícies de Bézier	147
3.2.9. Superfícies de B-Spline	149
3.2.10. Tangentes e normais às superfícies	149
3.2.11. Superfícies racionais	150
3.2.12. NURBS	151

## CAPÍTULO 4

### **CORES** **153**

4.1. Fundamentos básicos	155
4.1.1. Percepção tricromática	155
4.1.2. A luz	157
4.1.3. Reflexão $\times$ absorção	160
4.2. Formas de descrição das cores	161
4.2.1. Espaço RGB de representação de cores	162
4.2.2. Funções de combinação de cores	164
4.2.3. O espaço de cores XYZ	168
4.2.4. Os espaços de cores CMK e CMYK	172
4.2.5. Tipos de espaço de cores	173
4.2.6. Outros espaços de cor	175

## CAPÍTULO 5

### **RENDERIZAÇÃO** **181**

5.1. Etapas da renderização	184
5.1.1. O pipeline gráfico e o hardware gráfico	190
5.2. Rasterização	192
5.2.1. Rasterização de retas	192
5.2.1.1. Algoritmo de Bresenham para traçado de retas	195
5.2.2. Rasterização de polígonos	197

5.3. Tratamento de visibilidade	200
5.3.1. Recorte e remoção de primitivas	200
5.3.2. Algoritmo de eliminação de faces ocultas pela orientação em relação ao observador ( <i>culling</i> )	204
5.3.3. Tratamento de oclusão	209
5.3.3.1. Algoritmo de visibilidade por prioridade	209
5.3.3.2. Algoritmo <i>z-buffer</i>	211
5.4. Iluminação	214
5.4.1. Fontes emissoras de luz	215
5.4.1.1. Luz ambiente	216
5.4.1.2. Luz direcional	217
5.4.1.3. Luz pontual	219
5.4.1.4. Holofote	220
5.4.1.5. Outros tipos de fonte de luz	222
5.4.2. Interação da luz com diferentes meios	222
5.4.3. Modelo de iluminação local	227
5.4.4. Sombreamento ( <i>Shading</i> )	233
5.4.4.1. Sombreamento constante	234
5.4.4.2. Sombreamento de Gouraud	236
5.4.4.3. Sombreamento de Phong	238
5.4.5. Modelos de iluminação global	239
5.4.5.1. <i>Ray tracing</i>	240
5.4.5.2. Trabalhando com <i>ray tracing</i>	250
5.4.5.3. Refrações	250
5.4.5.4. Metais com <i>ray tracing</i>	250
5.4.5.5. <i>Ray tracing</i> em real-time rendering	251
5.4.5.6. <i>Caustic</i>	251
5.4.5.7. Radiosidade	253
5.5. Texturas	256
5.5.1. Mapeamento de texturas	260
5.5.1.1. Mapeamento de texturas 2D	262
5.5.2. Mapeamento do ambiente	267
5.5.3. Mapeamento de rugosidade e mapeamento de deslocamento	270
5.5.4. Amostragem de textura	274
Conclusões	284

## CAPÍTULO 6

### **ANIMAÇÃO** **285**

6.1. Histórico	287
6.2. Aplicações da animação	291
6.2.1. Diversão	291
6.2.2. Comunicação, instrução e treinamento	291
6.2.3. Visualização	292
6.3. Animação por computador	292

6.4. Formas de animação	293
6.4.1. Animação quadro a quadro	293
6.4.1.1. <i>Straight ahead</i>	294
6.4.1.2. Pose-to-pose	294
6.4.2. Animação por rotoscopia	294
6.4.3. Animação por interpolação	295
6.4.4. Animação automática, por intermédio de Programas de computador	296
6.4.4.1. Animação por programas do tipo script	296
6.4.4.2. Animação por intermédio de simuladores	296
6.4.4.3. Animação por captura de movimento	297
6.4.5. Animação representacional	297
6.4.6. Animação <i>track based</i>	298
6.4.6.1. <i>Tracking</i> de um ponto	298
6.4.6.2. <i>Tracking</i> de dois pontos	298
6.4.6.3. <i>Tracking</i> de quatro pontos	298
6.4.6.4. <i>Tracking</i> planar	299
6.4.6.5. <i>Tracking</i> 3D	299
6.5. Captura de movimento	299
6.5.1. Aplicações	299
6.5.2. Sistemas de captura de movimento	300
6.5.2.1. Ótico	302
6.5.2.2. Mecânico	302
6.5.2.3. Magnético	303
6.6. Animação de personagens 3D	304
6.6.1. Cinemática	307
6.6.1.1. Cinemática direta	308
6.6.1.2. Cinemática inversa	309
6.6.2. Ossos ( <i>Bones/Joints</i> )	309
6.6.3. Articulações	310
6.6.3.1. Grau de liberdade	310
6.6.3.2. Junta de revolução	311
6.6.3.3. Junta esférica	312
6.6.4. Esqueleto	312
6.6.4.1. Controladores IK	314
6.6.4.2. Ciclo de animação	317
6.6.5. Músculo flexor	317
6.6.6. Animação facial	319
6.6.6.1. Sincronização labial	320
6.6.6.2. Sequência de texturas	320
6.6.6.3. <i>Morphing</i>	320
6.6.6.4. Esqueleto	320
6.6.6.5. Free form deformation	320
6.6.6.6. Weighted morphing	320

6.7. Animação de superfícies deformáveis _____	321
6.8. Produção de animação _____	324
6.9. Princípios da animação _____	325
<b>REFERÊNCIAS _____</b>	<b>329</b>
<b>ÍNDICE _____</b>	<b>333</b>

Adotado na maioria das universidades brasileiras em cursos de graduação e pós-graduação, este livro é hoje a principal referência em português para desenvolvimento de produtos, sistemas, artigos e monografias. Todo este sucesso deve-se a um cuidadoso trabalho de atualização de seu conteúdo e pesquisa utilizando material bibliográfico internacional e o mesmo conteúdo adotado nas principais universidades americanas e europeias.

Com experiência prática e décadas de ensino nas disciplinas relacionadas com a computação gráfica, os autores apresentam o material de maneira didática e agradável em um texto de fácil entendimento. A cada tópico, as bases teóricas necessárias para o entendimento do assunto são apresentadas, visando uma formação profissional sólida. No entanto, pesquisadores e desenvolvedores não deixarão de encontrar ideias no estado da arte e caminhos ainda alvos de pesquisas futuras.

