

# Visual Computing: Adding Shadows to Scenes Through Shadow Mapping

**Abstract** – Shadow Mapping stands out as one of the foremost algorithms extensively employed in real-time shadow rendering within the realms of Visual and Computer Graphics. Its widespread adoption can be attributed to its straightforward yet efficient approach to real-time shadow calculation, coupled with its ability to yield remarkable results in three-dimensional shadow mapping while maintaining a relatively low computational footprint. Furthermore, its popularity is bolstered by its compatibility with most of the hardware currently prevalent in the market.

This article comprehensively explores the workings of the traditional Shadow Mapping algorithm, delving into its strengths and weaknesses. Additionally, various algorithmic variations are examined, each designed with the goal of enhancing outcomes while minimizing computational demands. The discussion extends to a practical use case, highlighting the significance of shadow mapping in cutting-edge approaches like Ray Tracing, providing insights into the enduring relevance and adaptability of Shadow Mapping in the ever-evolving landscape of computer graphics.

**Index Terms** – Shadow Mapping, Computer Graphics, Scene Lighting, Shadow Simulation

## I. INTRODUÇÃO

AS sombras desempenham um papel de extrema importância no domínio da Computação Visual e Gráfica uma vez que é também graças à sua adição a cenários que podemos criar a ilusão de profundidade e tridimensionalidade, simulando assim a ideia de uma cena realista. Para além de auxiliarem na definição de formas e corpos, criam contrastes de cor que também ajudam a alcançar o objetivo referido. Tendo começado com técnicas mais simples como a *Polygon Shadow* e *Projection Matrix* a criação de sombras em ambientes gráficos evoluiu naturalmente para técnicas mais avançadas como o *Shadow Mapping*. O mapeamento de sombras caracteriza-se por ser um algoritmo extremamente simples, eficiente e que consome relativamente poucos recursos computacionais. Neste artigo será abordado o papel e importância do Shadow Mapping na computação gráfica, assim como as vantagens e desvantagens da sua utilização. Veremos também de que maneira esta técnica continua a ser uma mais-valia no avanço das tecnologias responsáveis pela criação de sombras em ambientes gráficos.

## II. CONTEXTO

Introduzido por Lance Williams em 1978 o *Shadow Mapping*, ou Mapeamento de Sombras, é, como já referido, um processo de através do qual são adicionadas sombras a um

cenário gráfico 3D, sendo determinadas as áreas que estão por detrás dos objetos mais próximos da fonte de luz.

Este processo consiste em duas etapas principais:

- Renderizar a cena a partir do ponto de vista da fonte de luz, iluminando toda a imagem vista a partir desse ponto. Ao mesmo tempo é criado um mapa de sombras onde é guardada a profundidade de cada superfície visível.
- Renderizar novamente a cena, mas desta vez a partir do ponto de vista da câmara que corresponde à visão do sujeito. Cada ponto visível pela câmara será transformado em coordenadas relativas aos focos de luz, determinando assim se estes, na visão do utilizador, devem estar iluminados ou se deve ser projetada uma sombra neles.

Não é demais relembrar que o mapa de sombras será diferente mediante a direção da emissão de luz feita pela fonte. Se for uma luz direcional o mapa será diferente de focos luminosos do tipo *Spotlight* e *Point Light*, sendo que nos casos destas duas últimas, na teoria, irão produzir sombras de área maior para o mesmo plano de projeção em todos os casos, uma vez que a luz é diagonal e é impossível uma única fonte destes tipos gerar uma consistência direcional tão elevada como a da luz direcional.

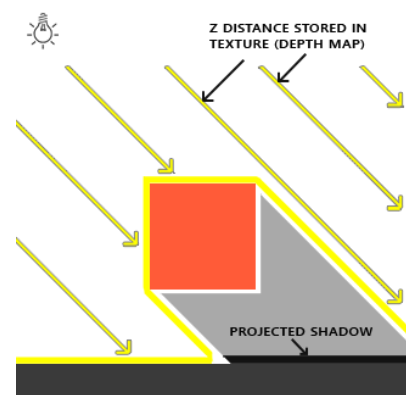


Figura 1 - Representação visual do cálculo das zonas sombreadas com Shadow Mapping

Na Figura 1 temos um esquema de como funciona o mapeamento. A luz incide no objeto laranja com aquele ângulo, no caso é sempre o mesmo pois é uma luz direcional, e é determinado que por de trás do objeto deve existir uma sombra, já que é uma área não visível a partir foco luminoso. Na câmara principal, que corresponde precisamente ao ponto de vista que a imagem fornece, a sombra é reproduzida tendo em conta as

informações geradas pelo mapeamento daquela luz, ficando toda a região entre o objeto e o plano sombreada.

### III. PRODUÇÃO DE SOMBRAS

A utilização de sombras num cenário gráfico é extremamente importante pois: adiciona uma sensação de realismo visual, uma vez que estas simulam profundidade, presença e localização física; emancipam a sobreposição de planos, uma vez que projetando sombras sobre diferentes planos conseguem simular a profundidade relativa entre eles; aumentam a sensação de imersão, principalmente em aplicações de realidade virtual e aumentada; a utilização estratégica de sombras permite destacar elementos específicos em cada cena; a atmosfera e o ambiente também podem ser simulados com a ajuda das sombras através da simulação de partículas no campo de visão.

Antes da introdução do Shadow Mapping eram utilizadas técnicas mais arcaicas que consistiam na ideia base de pintar uma sombra na superfície de projeção delas.

O Polygon Shadow é precisamente um desses métodos que consiste em projetar todos os vértices de um objeto tridimensional no plano, de forma a calcular o polígono que o seu corpo produz nesse plano, pintando-o com uma sombra. Este método de sombreamento é utilizado por exemplo em Geometria Descritiva.

A Projection Matrix é, de uma forma simplificada, uma matriz de projeção de um ponto num plano, sendo utilizada para projetar todos os vértices e pontos relevantes de um objeto nesse plano, produzindo graficamente o próprio ponto original e a sua projeção. Não entrando muito em detalhe, este método de produção de sombras permite uma criação facilitada de sombras provenientes de fontes de iluminação únicas, isto é, a partir de Spotlights e Point Lights.

Estes métodos, apesar de simples, tratam as sombras como representações 2D e, apesar do ponto destes algoritmos ser criar representações utilizando recursos computacionais mínimos, todos sabemos que as sombras são algo com mais dimensões, com volume. Quando uma sombra atinge um objeto que está por trás daquele que produziu a sombra principal a sombra não termina aí, apenas no plano “solo”. Na abordagem 2D das sombras acabamos por ver que os objetos que não têm luz incidente também podem produzir sombra, se estiverem atrás de algum outro que se interpõe à frente da fonte de luz. É neste sentido que surge o Shadow Mapping.

O Mapeamento de Sombras utiliza o algoritmo de Z-Buffer do motor gráfico para calcular a profundidade de cada ponto e assim determinar que pontos espaciais do mapa terão ou não sombra. Isto permite definir que qualquer ponto que esteja numa profundidade posterior à do corpo que se interpôs irá ter sombra, evitando assim ter de calcular projeções para todos os pontos e evitando a necessidade de criar volumes de sombras, como na técnica de *Shadow Volume*. Esta abordagem apesar de produzir sombras mais suaves e mais fiéis à forma dos objetos, acaba por ser muito dispendiosa computacionalmente.

### IV. VANTAGENS E DESVANTAGENS

Como é possível verificar o Mapeamento de Sombras trouxe

grandes avanços e vantagens derivadas da sua utilização. Algumas das mais notórias são:

- A **eficiência na GPU**, uma vez que o Shadow Mapping é geralmente bastante eficiente em termos de GPUs, especialmente comparado a técnicas mais poderosas como o Ray Tracing.
- A **implementação relativamente simples** já que se baseia na simples comparação de profundidades, tornando-a um método bastante apetecível quando se trata de produzir sombras em tempo real
- O Shadow Mapping tem um **suporte generalizado** uma vez que é suportado por uma ampla gama de hardware gráfico, tornando-a, novamente, uma opção bastante forte para programadores que pretendam garantir a compatibilidade entre os mais diversos dispositivos de processamento gráfico
- É **flexível** uma vez que pode ser facilmente adaptada para várias cenas complexas e dinâmicas.

Apesar de conceptualmente e ideologicamente parecer uma abordagem perfeita, quando reproduzida na prática deparamo-nos com a dura realidade de que criar realismo não é uma tarefa assim tão simples como a teoria já enunciada o fazia querer.

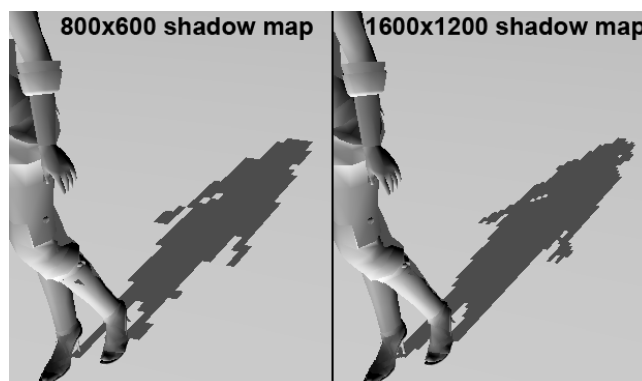


Figura 2 -Efeito prático do aumento da dimensão do mapa de sombras

Considerando sempre que para mapear sombras é necessário um mapa temos de ter sempre em consideração qual é a precisão desse mapa, neste caso quanto maior for a dimensão do mapa maior será a precisão com que conseguimos representar cada sombra. Mas, mais uma vez, mapas maiores envolvem um gasto computacional e gráfico maior. Tudo isto leva-nos a enumerar algumas desvantagens deste algoritmo:

- É possível e até provável que o resultado de Shadow Mapping sofra de **aliasing e artifacts**, anomalias visuais, padrões e bordas irregulares e feias, uma vez que o mapa pode não ter a dimensão necessária para lidar com formas mais detalhadas.
- O facto de as dimensões de um objeto serem diferentes a partir dos pontos de vista do foco de luz e da câmara da ação principal pode ocorrer uma pixelização estranha no interior e nas bordas das sombras criadas precisamente pelas diferenças de resolução que objetos a distâncias diferentes podem

criar. Isto é chamado de *Shadow Acne*.

- **Excesso de detalhe em pontos longínquos.** Por padrão o *Shadow Mapping* não está preparado para lidar com variação da qualidade de renderização mediante a distância a que a câmara se encontra desses pontos. Isto irá levar a um desperdício de capacidade computacional para processar detalhes que não são sequer visíveis àquela distância.
- **Transparência de sombras.** Mais uma vez o mapeamento apenas está preparado para lidar com casos onde existem sombras e onde não, não sendo capaz de definir, sem auxiliares, se uma sombra é mais ou menos densa. Quando tratamos de objetos transparentes, cuja sombra devia ser quase nula, enfrentamos um verdadeiro desafio uma vez que o algoritmo está pronto para criar uma sombra para qualquer objeto atingido por luz
- Apesar de ser eficaz com sombras locais pode não ser a melhor opção para simular uma **iluminação global** que se quer realista.

## V. ABORDAGENS DE SHADOW MAPPING

Para além da já enunciada e descrita abordagem “normal” ao mapeamento de sombras foram desenvolvidos, partindo da mesma premissa do método tradicional, novas abordagens de *Shadow Mapping* que pretendem, a troco de um aumento mínimo do custo computacional, resolver alguns dos problemas enumerados na secção anterior.

A fim de resolver a intensidade constante de uma sombra, seja em que plano for, em 1987 foi proposto por Reeves o **Percentage Closer Filtering** (PCF) que usa um processo de filtragem que calcula que pixéis estão mais próximos da fonte de luz, dando uma percentagem de sombra equivalente à sua proximidade ao foco. Desta maneira é possível criar regiões de penumbra ao invés de mudanças de cor abruptas.

A abordagem de **Perspective Shadow Maps** (PSM) proposta em 2002 por Stamminger e Drettakis, de uma maneira geral, tenta resolver os problemas de aliasing e da renderização de sombras distantes dando mais resolução aos objetos mais próximos da câmara e menos aos objetos mais distantes. Isto é possível aplicando uma perspectiva à imagem que aumenta o tamanho dos objetos mais próximos e diminui o dos mais

distantes, antes de gerar o mapa de sombras.

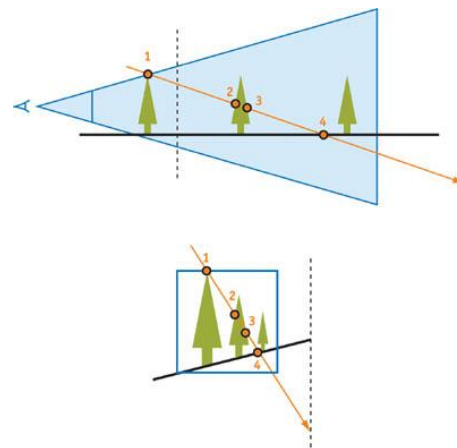


Figura 3 - Aplicação de perspectiva à imagem original com PSM

As técnicas de **Convolution Shadow Mapping** e **Exponential Shadow Mapping** propostas em 2007 por Annen, Mertens, Bekaert, Seidel, e Kautz, e em 2008 por Annen, Mertens, Seidel, Flerackers e Kautz, respetivamente, tentam acabar com o aliasing filtrando as sombras. No caso do convolucional são aplicados vários filtros convolucionais arbitrários ao mapa de sombras, podendo inclusive borrar as bordas das sombras a fim de amenizar a sua transição. No entanto a aplicação de tantos filtros acaba por tornar mais lento o processo de computação das sombras, tornando-o num algoritmo desprezado para renderização em tempo real. Para isso o modelo exponencial utiliza uma aproximação de apenas 1 termo, ao contrário do anterior que utiliza 16, tornando-o muito mais rápido e ainda assim obtendo bons resultados.

Infelizmente nenhuma destas abordagens é perfeita nem nenhuma resolve completamente todos os problemas a que se propõe, podendo nalguns casos gerar outros, por exemplo o PSM. Existem mais soluções para problemas e fraquezas associadas ao *Shadow Mapping* que, assim como estas, não resolvem completamente as questões que faltam, caso contrário teríamos uma solução única para qualquer desafio de produção de sombras num ambiente gráfico.

## VI. AVANÇOS MAIS RECENTES

Nos últimos anos tem emergido cada vez mais a tecnologia de *Ray Tracing*, não por ser um tema recente mas por só mais recentemente se ter iniciado a comercialização ao público de GPUs com suporte e capacidade para suportar esta tecnologia. O objetivo do *Ray Tracing* é simular o comportamento dos fotões desde que estes são emitidos pela fonte de luz até os mesmos alcançarem o olho humano e assim produzirem todo o espectro de cores que o somos capazes de visualizar. Reproduzir todos os raios de luz existentes no ambiente seria um desperdício do poder da GPU e levaria demasiado tempo a gerar sombras em tempo real. Por isso a direção da luz é invertida e comandada pela câmara que corresponde à visão do utilizador na cena sendo enviados raios contra cada pixel visível na câmara da visão do utilizador. Caso um raio não atinja nenhum corpo é retornada a cor do cenário de fundo, caso

efetivamente encontre um corpo o raio é encaminhado para a fonte que ilumina aquela zona do cenário.

Devido à grande eficiência do algoritmo de *Shadow Mapping* vários investigadores têm tentado conjugar ambas as estratégias de modo a gerar cenários ultrarrealistas e que exijam cada vez menos das GPUs. Uma das abordagens mais comuns é calcular o mapa de sombras de uma cena, classificar as mais complexas de não fiáveis e aplicar *Ray Tracing* a essas uma vez que este permite produzir sombras perfeitas. Isto permite reduzir bastante o número de raios utilizados e consequentemente diminuir o número de interseções entre os raios lançados da câmara correspondente ao POV do utilizador e os raios que conduzem às fontes de iluminação.

Utilizando por exemplo a abordagem PCF do *Shadow Mapping* e *Ray Tracing* podemos gerar as sombras mais realistas, com os raios, e podemos suavizar as transições entre fases da sombra, com a abordagem do PCF. Isto permitirá a criação de efeitos luminosos mais complexos, como reflexões e refrações, traduzindo-se numa experiência mais imersiva e numa qualidade visual superior à que se obteria usando apenas um dos algoritmos.

## VII. CONCLUSÃO

A adição de sombras por mapeamento não é uma abordagem perfeita, tem mais valias bastante interessantes e que poucos algoritmos conseguem atingir, como a compatibilidade com uma larga gama de hardware, mas também tem problemas que soluções mais recentes conseguem ultrapassar. É um grande dinamizador do campo da Computação Visual uma vez que permite simular, com menos recursos, características e cenas mais realistas, explorando as limitações do olho humano e do hardware para otimizar a entrega de resultados.

Apesar de desenvolvido e pensado no século passado a realidade é que o *Shadow Mapping* revelou ser até aos dias de hoje um algoritmo bastante consistente e eficiente na produção de sombras em cenários tridimensionais. Embora a abordagem mais simples não produza resultados de qualidade visual aceitável, para os padrões de exigência atuais, a teoria por detrás dela revela-se ainda uma excelente base para a otimização de outras abordagens mais dispendiosas. É também um excelente ponto de partida para formular novas variações dele mesmo tentando abdicar do mínimo de vantagens para criar soluções igualmente eficientes, mas com resultados visuais melhores. Não se espera que cenários do domínio da Computação Visual e Gráfica utilizem o *Shadow Mapping* puro, mas espera-se que os seus conceitos não sejam esquecidos uma vez que continuam a provar ser dos mais sólidos do mercado.

## REFERENCES

- [1] S. Silva, “Class 6 - Illumination and Shading,” 2023.
- [2] T. Annen, T. Mertens, H.-P. Seide, E. Flerackers e J. Kautz, “Exponential Shadow Maps,” Maio 2008. [Online]. Available: [https://jankautz.com/publications/esm\\_gi08.pdf](https://jankautz.com/publications/esm_gi08.pdf). [Acedido em Novembro 2023].
- [3] B. Anguelov's, “DirectX10 Tutorial 10: Shadow Mapping Part 2,” 25 Maio 2011. [Online]. Available: <https://takinginitiative.wordpress.com/2011/05/25/directx-10-tutorial-10-shadow-mapping-part-2/>. [Acedido em Novembro 2023].
- [4] T. Annen, T. Mertens, P. Bekaert, H.-P. Seide e J. Flerackers, “Convolution Shadow Maps,” 2007. [Online]. Available: <https://diglib.eg.org/bitstream/handle/10.2312/EGWR.EGSR07.051-060/051-060.pdf>. [Acedido em Novembro 2023].
- [5] M. Bunnell e F. Pellacini, “Chapter 11. Shadow Map Antialiasing,” 2004. [Online]. Available: <https://developer.nvidia.com/gpugems/gpugems/part-ii-lighting-and-shadows/chapter-11-shadow-map-antialiasing>. [Acedido em Novembro 2023].
- [6] P. S. Gerasimov, “Chapter 12. Omnidirectional Shadow Mapping,” 2004. [Online]. Available: <https://developer.nvidia.com/gpugems/gpugems/part-ii-lighting-and-shadows/chapter-12-omnidirectional-shadow-mapping>. [Acedido em Novembro 2023].
- [7] S. Kozlov, “Chapter 14. Perspective Shadow Maps: Care and Feeding,” 2004. [Online]. Available: <https://developer.nvidia.com/gpugems/gpugems/part-ii-lighting-and-shadows/chapter-14-perspective-shadow-maps-care-and-feeding>. [Acedido em Novembro 2023].
- [8] “Ray Tracing,” [Online]. Available: <https://developer.nvidia.com/discover/ray-tracing#>. [Acedido em Novembro 2023].
- [9] D. Lage Moderno, “Shadow Mapping and Ray-Tracing,” 2011.
- [10] L. Williams, “CASTING CURVED SHADOWS ON CURVED SURFACES,” 1978. [Online]. Available: <https://cseweb.ucsd.edu/~ravir/274/15/papers/p270-williams.pdf>. [Acedido em Novembro 2023].
- [11] T. Komura, “Computer Graphics Shadows,” 2011. [Online]. Available: [https://www.inf.ed.ac.uk/teaching/courses/cg/lectures/lec\\_t12cg2011.pdf](https://www.inf.ed.ac.uk/teaching/courses/cg/lectures/lec_t12cg2011.pdf). [Acedido em Novembro 2023].
- [12] T. Lee, “Shadow Effects: The Critical Role that Shadows Play in a Scene,” Março 2023. [Online]. Available: <https://academyofanimatedart.com/shadow-effects-the-critical-role-that-shadows-play-in-a-scene/>. [Acedido em 2023 Novembro].
- [13] “Tutorial 16 : Shadow mapping,” 2012. [Online]. Available: <http://www.opengl-tutorial.org/intermediate-tutorials/tutorial-16-shadow-mapping/>. [Acedido em Novembro 2023].
- [14] “Shadow mapping,” [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Shadow\\_mapping](https://en.wikipedia.org/wiki/Shadow_mapping). [Acedido em Novembro 2023].
- [15] “Shadow Volume,” [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Shadow\\_volume](https://en.wikipedia.org/wiki/Shadow_volume). [Acedido em Novembro 2023].
- [16] “Common Techniques to Improve Shadow Depth Maps,” 31 Agosto 2020. [Online]. Available:

<https://learn.microsoft.com/en-us/windows/win32/dxtecharts/common-techniques-to-improve-shadow-depth-maps>. [Acedido em Novembro 2023].

[17 “Shadow Mapping,” [Online]. Available:

] <https://learnopengl.com/Advanced-Lighting/Shadow/Shadow-Mapping>. [Acedido em Novembro 2023].

[18 C. Hitoshi Morimoto, “21. Sombras,” [Online].

] Available:  
<https://panda.ime.usp.br/introcg/static/introcg/21-sombras.html>. [Acedido em Novembro 2023].