



UNIFOR

**UNIVERSIDADE DE FORTALEZA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO**

ANDERSON ARAUJO MACEDO

**ESTUDO COMPARATIVO DE FERRAMENTAS DE SHADERS EM DIFERENTES
GAME ENGINES**

**FORTALEZA – CEARÁ
2021**

ANDERSON ARAUJO MACEDO

**ESTUDO COMPARATIVO DE FERRAMENTAS DE SHADERS EM DIFERENTES GAME
ENGINES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Com-
putação do Centro de Ciências Tecnológicas
da Universidade de Fortaleza, como requisito
parcial à obtenção do grau de bacharel em
Engenharia de Computação.

Orientador: André Lunardi De Souza

FORTALEZA – CEARÁ

2021

*Deve ser gerada através do preenchimento do Formulário Eletrônico de Elaboração da Ficha Catalográfica, disponível no link:
[http://www.uece.br/biblioteca/index.php/entrega-de-trabalho.](http://www.uece.br/biblioteca/index.php/entrega-de-trabalho)*

X000x Sobrenome, Nome do 1º autor. (citado na folha de rosto)
Título principal: subtítulo./Nome completo do 1º autor,
Nome completo do 2º autor, Nome completo do 3º autor;
orientação [de]. – Local: ano.
Nº de folhas.: il.(se houver ilustração); 30 cm.

Inclui bibliografias: f.(nº da folha em que se encontra)
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em) –
Universidade Estadual do Ceará – (UECE).

1. Assunto. 2. Assunto. 3. Assunto. I. Sobrenome, Nome do
2º autor. II. Sobrenome, Nome do 3º autor. III. Sobrenome,
Nome do orientador (orient.). IV. Universidade Estadual do
Ceará – UECE. V. Título.

CDU

ANDERSON ARAUJO MACEDO

**ESTUDO COMPARATIVO DE FERRAMENTAS DE SHADERS EM DIFERENTES GAME
ENGINES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Com-
putação do Centro de Ciências Tecnológicas
da Universidade de Fortaleza, como requisito
parcial à obtenção do grau de bacharel em
Engenharia de Computação.

Aprovada em: 01 de Janeiro de 2017

BANCA EXAMINADORA

André Lunardi De Souza (Orientador)
Centro de Ciências Tecnológicas - CCT
Universidade de Fortaleza - UNIFOR

Membro da Banca Dois
Faculdade de Filosofia Dom Aureliano Matos – FAFIDAM
Universidade do Membro da Banca Dois - SIGLA

Membro da Banca Três
Centro de Ciências e Tecnologia - CCT
Universidade do Membro da Banca Três - SIGLA

Membro da Banca Quatro
Centro de Ciências e Tecnologia - CCT
Universidade do Membro da Banca Quatro - SIGLA

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus que me mostrou o caminho a seguir nos momentos difíceis e me deu força para que eu nunca desistisse, não somente no período como universitário, mas também ao longo da vida.

Agradeço a minha mãe por ter me apoiado irrestritamente, abrindo mão de tudo por mim. E por sempre ter me incentivado a estudar e a buscar um futuro melhor. Agradeço ao meu pai pela paciência e por investir para o meu desenvolvimento pessoal e aprendizado, para que eu pudesse realizar meu sonho.

Ao professor Paulo Ricardo por ter me motivado a continuar estudando no momento em que eu mais duvidei se estava no caminho certo. E também aos professores Daniel e Imbiriba por instigarem a minha sede de aprendizado com suas aulas incríveis alinhando perfeitamente teoria e prática.

Aos amigos por ter tido a chance de conhecer todos vocês durante essa jornada; espero poder tê-los por muitos outros anos. Obrigado pelos incontáveis momentos de diversão e pelas risadas que compartilhamos juntos ao longo dos anos.

Ao professor e coordenador André Lunardi por ter insistido em me orientar quando todas as minhas alternativas já estavam esgotadas e por ter me gratificado com essa oportunidade de continuar com um ótimo aproveitamento dos meus estudos.

À Vanessa, minha esposa e amor da minha vida, por estar ao meu lado e ser minha companheira de tudo apesar de todas as dificuldades, pelo carinho e amor de todos os dias. Percebo que a vida é mais bonita contigo, leoinha.

“Nunca deixe que lhe digam que não vale a pena
acreditar no sonho que se tem, ou que os seus
planos nunca vão dar certo, ou que você nunca
vai ser alguém”

(Renato Russo)

RESUMO

Em Pelas Ondas do Rádio: Cultura Popular, Camponeses e o MEB analisa a participação de camponeses do nordeste brasileiro no Movimento de Educação de Base. A perspectiva da tese é a de demonstrar como os trabalhadores envolvidos com as escolas radiofônicas elaboraram ações para manutenção e reprodução da escola em sua comunidade, visando obter os benefícios necessários à reprodução e melhoria de seu modo de vida. A partir de representações políticas e culturais singulares, dentre as quais vigoraram: um sentido para escola, um papel para o sindicato e para participação política, preceitos do direito de uso da terra e dos direitos do trabalho, assim como, sentidos múltiplos para o uso do rádio como meio de comunicação, informação e lazer, os camponeses do MEB, foram coadjuvantes da proposição católica modernizadora de inícios de 1960. Isto posto, demarca que a ação do camponês nordestino e seu engajamento político, seja no MEB, nos sindicatos rurais, nas Juventudes Agrárias Católicas (JAC's), no MCP, e nas mais diversas instâncias dos movimentos sociais do período, não se apartaram do processo modernizador. Neste sentido, considera-se que a modernização brasileira foi pauta das instituições, organismos políticos e partidos, assim como, do movimento social, instância em que ela foi ressignificada a partir de elementos da vida material, que envolviam diretamente, no momento em questão, a problemática do direito a terra, do direito a educação e cultura e dos direitos do trabalho.

Palavras-chave: Shaders. Unity. Unreal Engine. Godot. Otimização

ABSTRACT

In this on the radio waves: popular culture, peasants and the Basic Education Movement we analyze the participation of peasants of the Brazilian northeastern region in the Basic Education Movement. The focus of this thesis is to demonstrate how the labors involved with broadcast schools have elaborated actions for maintaining and spreading the schools in their communities, in order to achieve the necessary means to improve their way of life. Peasants of the Basic Education Movement have been coadjvant of the modernizing catholic proposition of the early 1960s, by means of quite peculiar political and cultural representations. Some of these representations were: a meaning for the school, a role for the union and for the political participation, precepts of the land use rights and labor rights, and the multiple meanings of the radio as a mass communication, information and leisure medium. This study intends to stress that the actions – and the political enrollment – of the northeastern peasant could not ever be separated from the modernizing process. The connection can be observed in different social movements of the period, such as the Basic Education Movement, rural unions, the Catholic Agrarian Youth and the MCP. In this sense, we consider that, if the Brazilian modernization was a guideline for the institutions, political organisms and parties for the social movement, such a modernization was a guideline of demands based on elements of material life. Those elements included, by that time, the agrarian reform, the educational issue and labor urgencies.

Keywords: Adult education. Community schools. Peasants. Popular culture

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Demonstração do programa de computador Sketchpad	21
Figura 2 – Placa gráfica denominada Color Graphics Adapter produzida nos anos 80 pela IBM.	21
Figura 3 – No lado esquerdo percebe-se que Doom fazia uso de 3D real enquanto no lado direito Wolfenstein posicionava imagens 2D em diferentes camadas para simular a profundidade tridimensional.	22
Figura 4 – Hardware da placa gráfica da NVIDIA.	23
Figura 5 – O buffer de profundidade é mostrado em tons de cinza sendo que objetos próximos ficam com tonalidade mais escura enquanto objetos distantes assumem uma tonalidade mais clara.	25
Figura 6 – O stencil buffer permite a customização da forma como objetos 3D são renderizados.	26
Figura 7 – Pipeline gráfico do OpenGL.	27
Figura 8 – Processo de transformação entre os sistemas de coordenadas e seus espaços.	30
Figura 9 – Conteúdo das quatro colunas da matriz <i>modelView</i>.	31
Figura 10 – Modos de projeção de câmera. As letras correspondem a <i>left</i>, <i>right</i>, <i>bottom</i>, <i>top</i>, <i>near</i> e <i>far</i>.	32
Figura 11 – Demonstração de um shader simples de linha contorno.	33
Figura 12 – O mesmo resultado de contorno obtido com HLSL.	35
Figura 13 – Diferentes níveis de tesselação aplicados em uma malha produzem aumento no número de vértices.	36
Figura 14 – Demonstração de como é possível criar visuais únicos utilizando shaders.	37
Figura 15 – Como os estágios de shaders se relacionam.	38
Figura 16 – A luz que penetra na superfície de um objeto translúcido é espalhada pela interação com o material e sai da superfície em um ponto diferente.	42
Figura 17 – A programação da lógica do jogo pode ser feita utilizando o sistema visual de <i>BluePrint</i>.	44
Figura 18 – Uso de uma textura como base para definir a cor de um material.	45
Figura 19 – A ferrovia fica mais estreita e se cruza no horizonte.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 2 – Um Exemplo de tabela alinhada que pode ser longa ou curta, conforme padrão IBGE	52
Tabela 3 – Internal exon scores	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais componentes das game engines	40
Quadro 2 – Funcionalidades gráficas presentes nas game engines	41
Quadro 3 – Exemplo do número de instruções necessárias para operações específicas no OpenGL	47
Quadro 4 – Praesent ex velit, pulvinar at massa vel, fermentum dictum mauris. Ut feugiat accumsan augue	51
Quadro 5 – Duis faucibus, enim quis tincidunt pellentesque	51

LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 1 – Como escrever algoritmos no L^AT_EX2e	53
Algoritmo 2 – Algoritmo de Otimização por Colônia de Formiga	58

LISTA DE CÓDIGOS-FONTE

Código-fonte 1 – Hello World em C++	58
Código-fonte 2 – Hello World em Java	59
Código-fonte 3 – Transcrição do shader de contorno de GLSL para HLSL	74
Código-fonte 4 – Shader GLSL 3D simples para efeito de contorno	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	Application Programming Interface
CPU	Central Process Unit
CRT	Cathode Ray Tube
FPS	Frames Por Segundo
GLSL	OpenGL Shading Language
GPGPU	GPU de propósito geral
GPU	Graphics Processing Unit
GUI	Graphic User Interface
HDR	High Dynamic Range
HLSL	High-Level Shader Language
IBM	International Business Machines
IRIS GL	Integrated Raster Imaging System Graphical Library
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MS-DOS	Microsoft Disk Operating System
NES	Nintendo Entertainment System
OpenGL	Open Graphics Library
SDK	Software Development Kit
SGI	Silicon Graphics International
SO	Sistema Operacional
T&L	Transform & Lighting

LISTA DE SÍMBOLOS

A_e	Área efetiva da antena
B	Largura de faixa em que o ruído é medido em Hertz
d	Distância em metros
E	Campo elétrico
FA	Fator da antena
Gr	Ganho de recepção
h	Altura efetiva ou comprimento efetivo de uma antena
I	Corrente elétrica
k	Constante de Boltzmann's
K	Eficiência de irradiação
M	Variação do patamar de ruído em função da RBW
N	Condutor de neutro
NF	Figura de ruído
Ni	Potência do ruído na entrada
No	Potência do ruído na saída
P	Potência
R	Resistência
Si	Potência do sinal na entrada
So	Potência do sinal na saída
t	Tempo
V	Tensão
ZL	Impedância da antena
Zo	Impedância de referência (50Ω)
λ	Comprimento de onda
Γ	Coeficiente de reflexão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	JUSTIFICATIVA	18
1.2	OBJETIVOS	18
1.2.1	Objetivo Geral	18
1.2.2	Objetivos Específicos	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	HISTÓRIA DA EVOLUÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DE SHADERS	20
2.1.1	Como o OpenGL funciona	24
2.1.1.1	Pipeline gráfica do OpenGL	27
2.1.1.2	Matrizes de transformação de coordenadas	29
2.1.2	OpenGL Shading Language	32
2.1.3	Direct3D (HLSL) <i>versus</i> OpenGL (GLSL)	34
2.1.4	High-Level Shader Language	34
2.2	APROFUNDANDO CONCEITOS TÉCNICOS DE SHADERS	36
2.2.1	Vertex Shader	38
2.2.2	Fragment Shader	39
2.3	MOTORES DE JOGO E SUAS FERRAMENTAS	40
2.3.1	Godot	42
2.3.2	Unity	42
2.3.2.1	ShaderLab	43
2.3.3	Unreal	43
2.3.3.1	Nós de material	44
2.4	OTIMIZAÇÃO E PERFORMANCE	45
3	TRABALHOS RELACIONADOS	50
3.1	TRABALHO RELACIONADO A	50
3.2	TRABALHO RELACIONADO B	50
4	METODOLOGIA	52
4.1	EXEMPLO DE ALGORITMOS E FIGURAS	53
4.2	USANDO FÓRMULAS MATEMÁTICAS	55
4.3	USANDO ALGORITMOS	57
4.4	USANDO CÓDIGO-FONTE	58

4.5	USANDO TEOREMAS, PROPOSIÇÕES, ETC	59
4.6	USANDO QUESTÕES	60
4.7	CITAÇÕES	61
4.7.1	Documentos com três autores	61
4.7.2	Documentos com mais de três autores	61
4.7.3	Documentos de vários autores	61
4.8	NOTAS DE RODAPÉ	61
5	RESULTADOS	62
5.1	RESULTADOS DO EXPERIMENTO A	62
5.2	RESULTADOS DO EXPERIMENTO B	62
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	63
6.1	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	63
6.2	LIMITAÇÕES	63
6.3	TRABALHOS FUTUROS	64
	REFERÊNCIAS	65
	GLOSSÁRIO	69
	APÊNDICES	70
	APÊNDICE A – Coordenadas Homogêneas	71
	APÊNDICE B – Código-fonte do shader de contorno em HLSL	74
	ANEXOS	76
	ANEXO A – Código-fonte do shader de contorno em GLSL	77

1 INTRODUÇÃO

Shader é um tipo de programa de computador utilizado para simular como a luz interage com os objetos ou as superfícies (ZUCCONI; LAMMERS, 2016). Por meio de seu uso é possível criar aspectos visuais nas superfícies de objetos 3D, para que com o uso de texturas, seja possível obter uma aparência de metal ou de madeira, por exemplo.

Por demandar recursos computacionais da GPU em tempo real, a performance de execução desses programas é um assunto que requer atenção, ainda mais levando em consideração o avanço da tecnologia de computação gráfica, que exige a renderização em um curto intervalo de tempo de gráficos cada vez mais realistas. Quanto maior a frequência de realização de cálculos e processamentos durante esse processo, maior será o impacto na performance de um jogo. Ao fazer uso de shaders custosos e não otimizados, podem ocorrer alguns problemas como surgimento de artefatos, incompatibilidade com hardwares de gerações passadas e o superaquecimento da GPU devido a cargas muito altas de trabalho.

Para realizar o desenvolvimento, a execução e o estudo de performance dos shaders, três dos mais populares motores de jogo foram escolhidos. O primeiro foi o Godot, um software para produção de jogos 2D e 3D criado no ano de 2007, quando seus desenvolvedores perceberam duas importantes mudanças no cenário de desenvolvimento de games: uma foi a melhoria de hardware disponível que permitiu que dispositivos portáteis ganhassem mais poder de processamento, a outra mudança foi na forma que as CPUs passaram a ser divididas em múltiplos núcleos, o que permitiu o advento do processamento paralelo (MANZUR; MARQUES, 2018).

O segundo motor de jogo, Unity, é a escolha mais comum entre desenvolvedores de jogos profissionais e amadores por sua capacidade de prototipação rápida e pela ampla gama de plataformas-alvo de compilação. Ela foi criada com os objetivos de fornecer uma engine de custo acessível com ferramentas profissionais e democratizar o acesso à indústria de desenvolvimento de games (HAAS, 2014).

O terceiro motor de jogo escolhido foi a Unreal Engine, produzida pela Epic Games para desenvolvimento de jogos e aplicações, seja de grandes orçamentos e níveis de promoção, seja de editoras ou produtoras independentes e com baixo orçamento. É o mais robusto e também é muito utilizado tanto por desenvolvedores profissionais quanto iniciantes (COOKSON; DOWLING SOKA; CRUMPLER, 2016).

1.1 JUSTIFICATIVA

O processo de criação de shaders pode vir a apresentar-se, dependendo do nível de complexidade exigido pela tarefa, como uma atividade custosa e que exige elevados recursos computacionais. Sendo assim, o estudo das ferramentas de criação de shaders é importante para definir processos de otimização de performance para que empresas, indivíduos ou entusiastas possam economizar tempo e recursos ao utilizar essas ferramentas.

Cabe ressaltar que a execução de programas de shaders muito custosos pode acarretar em problemas como queda da taxa de quadros por segundo, travamentos durante a execução do programa e na pior hipótese danos permanentes ao hardware que acabam por prejudicar o utilizador final e que de maneira geral acarretam em uma má experiência de usuário.

No contexto específico dos jogos eletrônicos, o uso de shaders não otimizados pode fazer com que o jogo torne-se lento e apresente travamentos. Essas são características que tornam um jogo não atrativo e que geram sensações negativas no usuário. Elas fazem com que ele perca o interesse e se sinta frustrado, sendo levado à compartilhar feedback negativo, cujo acaba por prejudicar a imagem e as vendas do produto. Isso tem como consequência motivar outros possíveis usuários a não comprarem o jogo, principalmente aqueles que não possuem hardware compatível.

Nesse caso, a utilidade desse estudo consiste em descobrir qual game engine, utilizando critérios quantizados de performance, apresenta a melhor ferramenta para criação de Shaders. Além disso, shaders otimizados tornam-se favoráveis para serem aplicados para um público maior por ampliar a possibilidade de hardware compatível, ou seja, os jogos ou aplicações que fazem uso desse recurso conseguem ter um alcance maior e mais vendas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisa e comparar as principais ferramentas de desenvolvimento de shaders dentre as game engines especificadas no escopo deste trabalho com foco na otimização de performance em cada uma, identificando os processos-chave característicos de construção e execução de shaders.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Discriminar as ferramentas de criação de shader de cada game engine bem como suas características individuais.
- b) Determinar os indicadores que serão utilizados para mensurar os parâmetros que serão avaliados nos testes dos shaders.
- c) Desenvolver um “cenário” padrão que possa ser aplicado aos shaders a serem testados.
- d) Realizar testes de performance dos shaders para cada game engine.
- e) Avaliar os resultados obtidos após a conclusão dos testes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentados os assuntos considerados fundamentais para o entendimento dos processos que estão envolvidos no uso das tecnologias abordadas no decorrer do trabalho. No início será discutida a criação dos shaders e seu uso ao longo do tempo, em seguida serão expostos itens de ordem técnica sobre os shaders e os motores de jogo. Ao final será tratada a integração dessas tecnologias com os processos de otimização.

2.1 HISTÓRIA DA EVOLUÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DE SHADERS

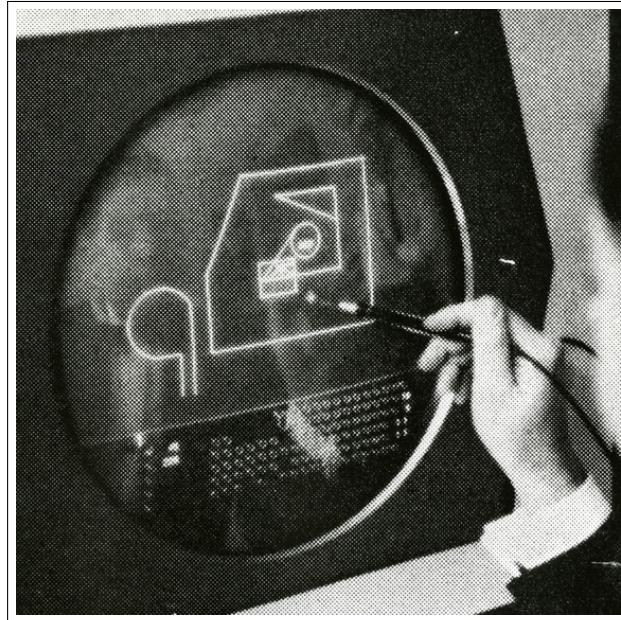
As representações visuais feitas através de imagens foram e são até hoje uma característica importante da formação da humanidade. Através do sentido da visão conseguimos absorver informações rapidamente, fazer associações durante o aprendizado e o estudo, ou ainda distinguir se algo é visualmente agradável o suficiente ou não para prender nossa atenção. O caso mais extremo seria a discussão da existência de algo que não se pode ver, como no século dezessete, quando a existência das bactérias era muito questionada, até que Antonie van Leeuwenhoek inventou o microscópio (LUTEN, 2014).

No início do desenvolvimento dos primeiros computadores, quando seu acesso era destinado a um público restrito devido aos custos elevados e a logística complexa, a forma de representação visual para os humanos dos pulsos elétricos gerados pelo processamento de dados nos computadores era feita através de várias lâmpadas conectadas em placas ou de cartões de papel perfurados (um processo que podia demorar várias horas para terminar). Esse cenário só começou a mudar depois da aplicação da tecnologia do tubo de raios catódicos (CRT), em 1951, pelo MIT (Massachusetts Institute of Technology) para visualizar a saída de um programa de computador instantaneamente. A partir de então ele continuou sendo usado até o advento das novas tecnologias de monitores e televisores de tela plana (LUTEN, 2014).

Apesar do avanço citado acima, o estabelecimento da computação gráfica como conhecemos hoje teve início apenas 10 anos depois. A partir da criação de um programa de computador por Ivan Sutherland chamado Sketchpad, que permitia que o usuário desenhasse formas geométricas utilizando uma caneta óptica em um CRT que permitia a visualização em tempo real (LUTEN, 2014). Isso causou uma mudança de padrão na forma como as pessoas entendiam e utilizavam os computadores e foi o ponto de partida para o estudo e desenvolvimento da computação gráfica em tempo real e também das interfaces gráficas de usuário (GUI).

Com o avanço resultado da criação dos circuitos integrados, cujo uso nos micropro-

Figura 1 – Demonstração do programa de computador Sketchpad



Fonte – <http://i0.wp.com/www.designleap.org/wp-content/uploads/2014/06/Sketchpad-Ivan-Sutherland-1963.jpg?resize=572%2C572>

cessadores proporcionou um espantoso crescimento da indústria, os computadores deixaram de ser um monopólio das grandes companhias e tornaram-se muito mais acessíveis a pessoas simples. Isso abriu várias possibilidades para o mercado de computadores pessoais, entre elas destaca-se o surgimento das primeiras placas gráficas produzidas pela IBM (International Business Machines).

Figura 2 – Placa gráfica denominada Color Graphics Adapter produzida nos anos 80 pela IBM.



Fonte – https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/55/IBM_Color_Graphics_Adapter.jpg

Como a indústria de jogos eletrônicos tinha mais recursos para explorar devido às melhorias de hardware disponíveis, vários jogos começaram a se destacar no mercado. Entre eles os mais marcantes para a popularização do uso de tecnologia de computação gráfica tridimensional foram lançados pela empresa id Software na década de 90. O primeiro sendo Wolfenstein 3D — que na realidade utilizava o modo 7 do Super NES (Nintendo Entertainment System) para emular a ambientação tridimensional — que definiu o padrão para jogos no gênero de tiro em primeira pessoa em 3D e o segundo sendo Doom que fazia uso de renderização com perspectiva 3D em tempo real por meio de software desenvolvido pela própria id Software voltado a produção para computadores que utilizavam o sistema operacional da Microsoft (MS-DOS).

Figura 3 – No lado esquerdo percebe-se que Doom fazia uso de 3D real enquanto no lado direito Wolfenstein posicionava imagens 2D em diferentes camadas para simular a profundidade tridimensional.



Fonte – <https://www.retrorefurbs.com/wolfenstein-vs-doom-the-battle-of-the-first-person-shooters/>

É de referir que a indústria de jogos eletrônicos apresenta incríveis taxas de crescimento e que desde 2017 conquista cada vez mais espaço no mercado. O valor do mercado de jogos atingiu a importante marca de US\$ 135 bilhões em 2018. Mas esse sucesso não é exclusivo de hoje, pois as empresas do ramo, desde a década de 70, apresentam crescimento constante e acelerado de suas receitas. Por isso cada vez mais empresas surgem dentro desse mercado a cada ano (ŻUKOWSKI, 2019).

Paralelo ao cenário desses jogos (LUTEN, 2014), a Silicon Graphics (SGI), uma companhia especializada em computação gráfica 3D e líder de mercado na época, trabalhava no

lançamento da Open Graphics Library (OpenGL), uma API (Application Programming Interface) open source padronizada multiplataforma de processamento de gráficos de computador em tempo real que rapidamente dominou o mercado, e que era uma derivação de outra biblioteca proprietária da mesma empresa, a IRIS GL (Integrated Raster Imaging System Graphical Library).

Vendo uma oportunidade de mercado, a Microsoft logo agiu e comprou a empresa RenderMorphics, criadora da API Reality Lab, que teve o nome alterado para Direct3D e foi distribuído como um SDK (Software Development Kit) conhecido como DirectX (LUTEN, 2014), acabando por se tornar o concorrente direto da OpenGL. Essa rivalidade no final das contas acabou sendo benéfica tanto para o mercado de jogos eletrônicos quanto para os seus consumidores, já que acelerou o desenvolvimento de novas tecnologias que exploravam ao máximo o potencial do hardware disponível.

Figura 4 – Hardware da placa gráfica da NVIDIA.



(a) GeForce 256



(b) GPU da GeForce 256

Fonte – <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>

Mais adiante, em 1999, a empresa NVIDIA foi responsável por trazer mais uma inovação ao mercado, a "primeira GPU"(Graphics Processing Unit) foi como ficou conhecida a

placa gráfica GeForce 256 (Figura 4), que fazia uso de uma tecnologia chamada T&L (Transform & Lighting) que basicamente movia os cálculos de transformação e iluminação de vértices da CPU (Central Process Unit) para a GPU. Isso permitia uma maior velocidade em operações matemáticas de ponto flutuante. Então nos próximos anos o que se viu foi um crescimento exponencial de performance de GPU para renderização em tempo real.

Uma GPU é um circuito eletrônico projetado para realizar manipulações rápidas em memória para acelerar a criação de imagens em um buffer de quadros que envia a saída para uma tela. Em aplicações que exigem muitas operações vetoriais, o poder de computação paralelo da GPU consegue entregar maior performance que uma CPU convencional. Daí seu vasto uso em jogos eletrônicos, mas também em outras áreas, principalmente na ciência (SHEA; LIU, 2013).

Até então shaders eram bastante utilizados por melhorar a performance eliminando carga de trabalho excessiva da CPU, porém sua programação era difícil devido a sintaxe utilizada ser semelhante à programação em Assembly. A Microsoft então lançou a versão 9.0 do Direct3D que trazia consigo a implementação da HLSL (High-Level Shader Language) que como o nome sugere permitia a programação de shaders em alto nível e possuia uma sintaxe bastante parecida com C. Enquanto isso, OpenGL também trouxe a sua própria linguagem de alto nível chamada GLSL (OpenGL Shading Language) para competir no mercado (LUTEN, 2014).

2.1.1 Como o OpenGL funciona

Grosso modo, a API do OpenGL desenha gráficos em uma memória especializada em quadros de imagem (frame buffer) e os lê novamente quando precisa. O seu design único oferece suporte tanto a geometrias 3D quanto a imagens simples. O modelo de funcionamento dessa API pode ser descrito como cliente-servidor, pois a aplicação (cliente) faz solicitações por meio de comandos que são interpretados e processados pela implementação OpenGL (servidor) (ROST, 2006). É importante destacar que a sincronia entre cliente e servidor e suas informações/dados não ocorre quando um comando é executado mas sim quando ele é emitido.

Os comandos são sempre processados na ordem em que são recebidos pelo servidor (execução fora de ordem não é permitida). Os dados passados para um comando OpenGL são então interpretados e copiados em memória caso seja necessário e as modificações subsequentes feitas pela aplicação não surtem efeito nos dados que estão armazenados internamente pelo OpenGL. Esses procedimentos são uma forma de garantir que um primitivo — segundo Abdala (2019), uma representação discreta em grade de um elemento geométrico fundamental, e.g. ponto,

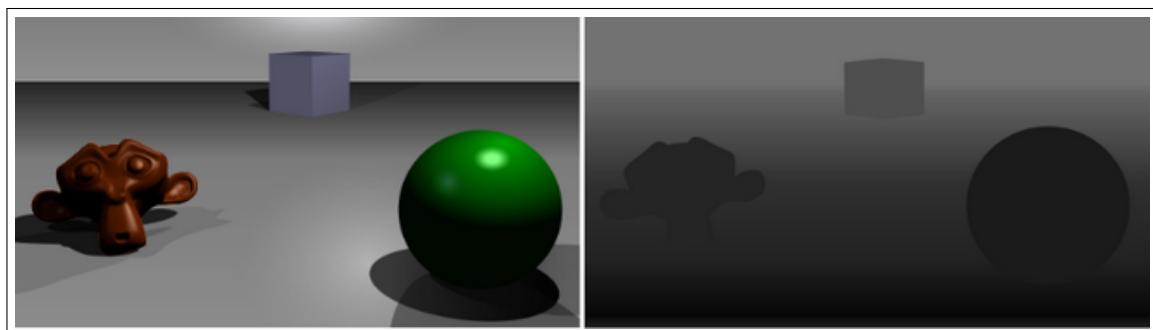
linha, círculo, etc — seja desenhado apenas se o primitivo anterior houver sido completamente desenhado (ROST, 2006).

OpenGL foi projetada para atuar como uma máquina de estados composta de parâmetros que definem o comportamento da pipeline de renderização e da forma que as primitivas são transformadas em pixels na tela. O estado é composto por uma estrutura de dados chamada contexto gráfico que é gerenciada pelo sistema de janelas do SO (Sistema Operacional) (ROST, 2006).

O princípio básico de funcionamento dessa API é transformar dados vindos de uma aplicação em algo visível na tela, esse processo é chamado de renderização e normalmente é acelerado por um hardware com design específico chamado de acelerador gráfico, entretanto suas operações podem ser parcial ou totalmente implementadas por software executado pela CPU. Aceleradores gráficos tipicamente possuem região de memória delimitada para manutenção do conteúdo exibido na tela, sendo que cada pixel é representado por uma quantidade de bytes na memória; uma tela em escala de cinza, por exemplo, pode fazer uso de um byte para representar a tonalidade de cinza de cada pixel (ROST, 2006).

Essa região conhecida como memória de exibição é escaneada "x"vezes por segundo para eliminar a cintilação. Há ainda uma região específica para manipular dados que não são visíveis na tela chamada de memória de não exibição. O responsável pela alocação de memória é o próprio sistema operacional que suporta o OpenGL. Em um sistema de janelas, a janela que corresponde a região da memória gráfica que é modificada durante a renderização é chamada de frame buffer. Já em um cenário sem janelas (i.e. tela cheia) o frame buffer corresponde a toda a tela (ROST, 2006).

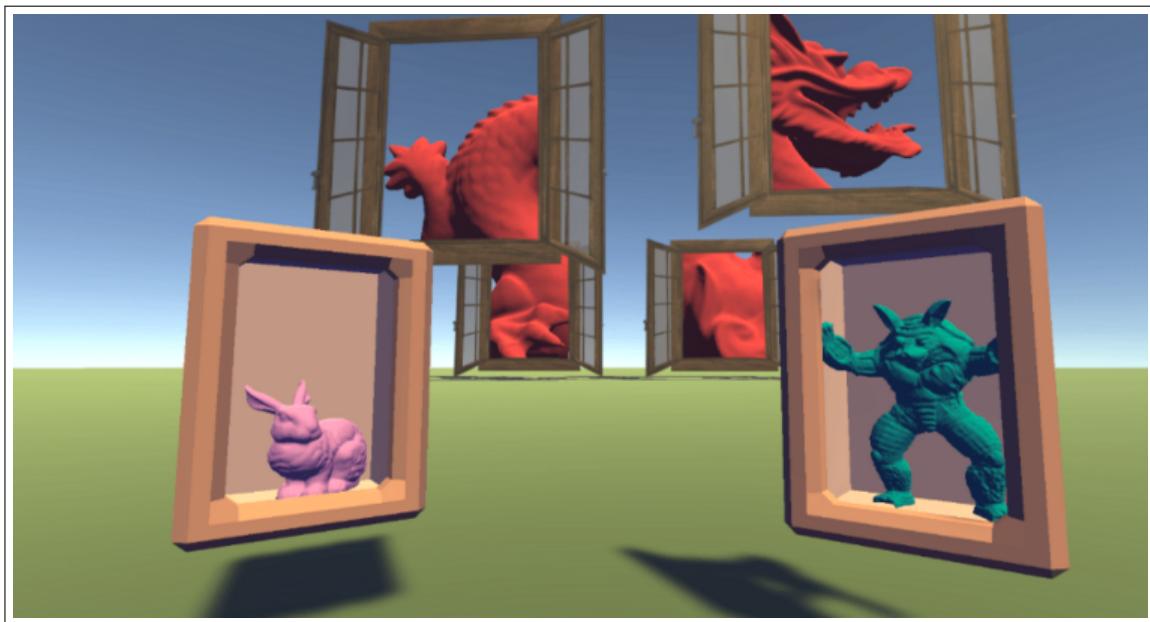
Figura 5 – O buffer de profundidade é mostrado em tons de cinza sendo que objetos próximos ficam com tonalidade mais escura enquanto objetos distantes assumem uma tonalidade mais clara.



Fonte – <https://larranaga.github.io/Blog/imagenes/z-buffer.png>

Para que uma janela consiga suportar a renderização ela precisa de uma combinação de alguns elementos: até quatro buffers para as cores, um buffer de profundidade (Figura 5), um *stencil buffer* (Figura 6), um buffer de acumulação, um *multisample buffer* e um ou mais buffers auxiliares. A maioria dos hardwares suporta o carregamento duplo, técnica que faz uso de um buffer frontal e um buffer posterior para que o processo de renderização seja realizado em plano de fundo e então quando terminar seu conteúdo é trocado com o do buffer frontal para exibir o resultado final e iniciar a nova renderização. Isso ajuda a conseguir animações suaves à taxas interativas (ROST, 2006).

Figura 6 – O stencil buffer permite a customização da forma como objetos 3D são renderizados.



Fonte – <https://www.ronja-tutorials.com/assets/images/posts/022/Result.gif>

No caso do suporte a visualização 3D estéreo, mais dois buffers serão utilizados em conjunto com os dois citados anteriormente para criar uma combinação com quatro buffers de cor que são divididos para cada olho. Se um objeto 3D precisa ser desenhado com remoção de superfície encoberta, o buffer de profundidade entra em ação comparando o valor da profundidade de cada pixel dos objetos em cena para determinar qual será visível ou obscurecido. E há ainda a opção do uso de um *stencil buffer* para aplicar operações complexas utilizando máscaras com o objetivo de determinar onde cada pixel deve ser atualizado ou não (ROST, 2006).

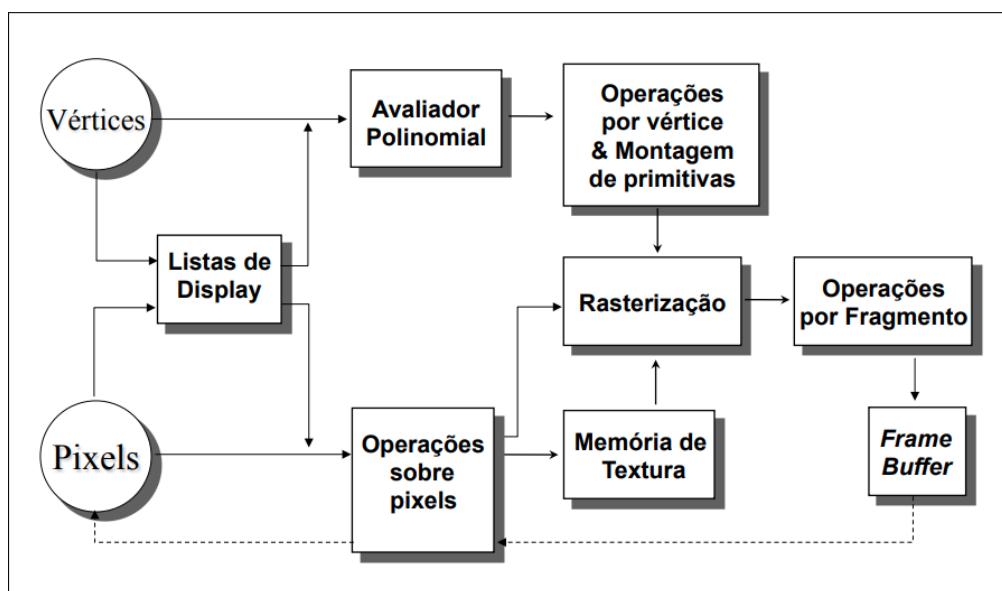
O buffer de acumulação é capaz de reproduzir efeitos complexos como suavização em tela cheia de alta qualidade, profundidade de campo e desfoque de movimento. Ele funciona como um buffer de cor, porém com maior precisão, capaz de acumular imagens para produzir

uma única imagem composta. Seguindo essa linha, o *multisample buffer* é capaz de produzir várias amostras da renderização para realizar suavização sem precisar renderizar a cena mais de uma vez (ROST, 2006). Por último, os buffers auxiliares servem para guardar dados genéricos.

2.1.1.1 Pipeline gráfica do OpenGL

Para que a máquina de estados do OpenGL possa operar corretamente, foi definida uma ordem específica em que as operações envolvidas no processo de renderização precisam ser realizadas, essa padronização é chamada de *pipeline* gráfica (ROST, 2006) e pode ser vista na Figura 7. Todos os dados necessários para desenhar a geometria estão contidos em espaço em memória e podem ser lidos pelo OpenGL de três maneiras diferentes.

Figura 7 – Pipeline gráfico do OpenGL.



Fonte – <[http://www.ic.uff.br/~anselmo/cursos/CGI/slidesGrad/CG_aula4\(introducaoOpenGL\).pdf](http://www.ic.uff.br/~anselmo/cursos/CGI/slidesGrad/CG_aula4(introducaoOpenGL).pdf)>

A primeira seria enviar um vértice de cada vez utilizando alguns comandos intermitentes para manipular atributos dos vértices. A segunda seria utilizar matrizes de vértices, o que oferece melhor performance devido a forma de organização dos dados, pois são utilizados ponteiros e mais dados podem ser processados de uma vez. Esses dois casos citados acima fazem uso do modo imediato pois as primitivas são renderizadas assim que são especificadas (ROST, 2006).

O terceiro modo seria utilizar algum dos dois procedimentos citados acima implementando uma lista de exibição, que é uma estrutura de dados que guarda comandos para

execução futura. Algumas vantagens desse método no que diz respeito a performance seria a possibilidade de otimizar os comandos contidos na lista, ou ainda guardar os comandos na memória do acelerador gráfico para uma melhor performance de desenho (ROST, 2006).

Como todas as primitivas geométricas podem ser descritas por vértices, as curvas e as superfícies podem ser descritas pelas funções polinomiais chamadas funções base. A função do avaliador polinomial nesse caso é derivar os vértices para conseguir representar superfícies e curvas. Isso é feito através do método de mapeamento polinomial, que produz as normais da superfície, as coordenadas da textura, as cores, e valores de coordenadas espaciais dos pontos de controle (VIEIRA, 2017).

A próxima etapa é o estágio das operações por vértice que converte os vértices em primitivas. Alguns dados do vértice são transformados em matrizes de pontos flutuantes. Nesta etapa ocorre a projeção de coordenadas do espaço do mundo para o espaço da tela. Inclui algumas etapas como geração e transformação de coordenadas de textura, e também cálculos de luz para produção dos valores de cor (VIEIRA, 2017). Por isso é normal que essa etapa exija mais recursos computacionais.

Logo em seguida ocorre a montagem das primitivas por meio do *clipping* (eliminação de parte da geometria desnecessária para a renderização), que é um processo onde se a primitiva está totalmente dentro do plano de visualização ela é repassada para o devido processamento. Caso ela esteja totalmente fora do plano de visualização ela é rejeitada e não é processada. Se a primitiva estiver parcialmente visível no plano, ela é dividida para que somente a porção visível siga para processamento.

Outra operação que ocorre nesse estágio é a projeção das coordenadas da perspectiva para coordenadas da janela. Além disso, há ainda uma etapa opcional de *culling* onde os polígonos são testados para saber se será preciso descartar faces posteriores, anteriores ou ambas (ROST, 2006). Paralelamente a esse processo, os dados de pixels contidos em uma matriz na memória do sistema são empacotados e escalados, inclinados e processados por um mapa de pixels. Os resultados, que serão então empacotados em um formato apropriado e retornados a uma matriz de memória do sistema, podem ser escritos na memória da textura ou emitidos à uma etapa de rasterização.

Rasterização é a etapa de conversão de dados tanto geométricos como de pixel em fragmentos. Cada fragmento passa por mais algumas operações como: *texturing*, onde um elemento da textura é gerado e aplicado da memória da textura para cada fragmento; aplicação do valor de cor e profundidade; cálculos de névoa; testes de profundidade, transparência e

remoção de faces ocultas (VIEIRA, 2017). Ao final são armazenados os valores no *frame buffer*. Apesar de possuir muitos processos, é uma etapa relativamente simples e pode ser executada eficientemente para milhões de pixels por segundo com o hardware disponível atualmente.

Sobre a etapa de texturização é interessante destacar que a API tem capacidade de trabalhar com quatro tipos de texturas. Texturas de uma dimensão (vetor de pixels), texturas 2D (matriz mxn de pixels), texturas 3D (matriz com uma dimensão a mais para guardar informações adicionais e.g. profundidade), e mapas cúbicos (normalmente usado para simular reflexões de ambiente). A API também pode trabalhar com formatos de imagem compactados, esses usam significativamente menos memória e melhoram a performance (ROST, 2006).

É importante destacar que a API também fornece a possibilidade de utilizar texturas do tipo *mipmap* — várias representações da mesma imagem, porém cada uma tem metade da resolução da anterior — em conjunto com o parâmetro de nível de detalhe que será detalhado mais adiante, mas que de forma simplificada permite a otimização do processo de renderização de objetos que estão distantes da câmera.

$$f((x,y), \mathbf{v}) = p \circ r(g \circ h(\mathbf{v}), (x,y)) \quad (2.1)$$

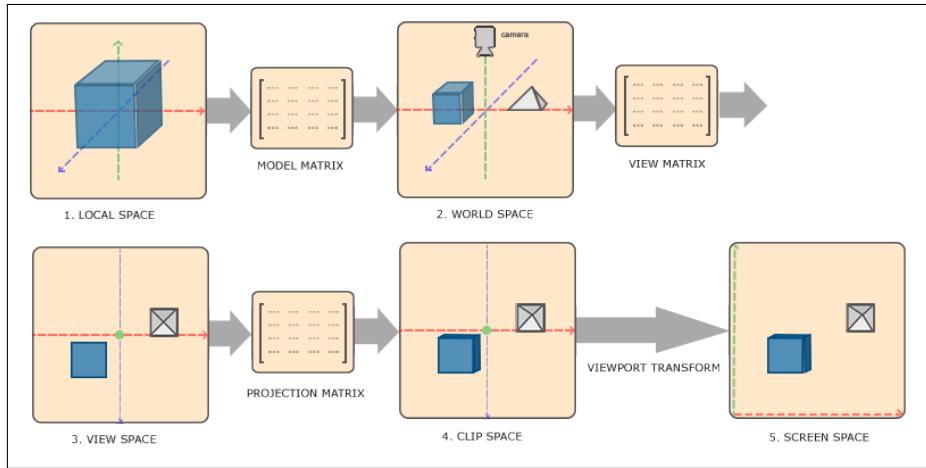
Uma descrição matemática da pipeline de renderização está na Equação 2.1 onde (x, y) é a posição na tela de cada pixel, \mathbf{v} é um conjunto de primitivas, p é o shader de fragmentos, g é o shader de geometria, h é o shader de vértice e r é o estágio de rasterização onde as primitivas são convertidas em pixels com atributos de geometria interpolados (WANG *et al.*, 2014).

Por fim, é importante mencionar que existem dois modos principais de renderização: o modo direto calcula as luzes e materiais para cada geometria visível e depois resolve qual está mais próxima da câmera para então decidir quais exibir. Já o modo diferido realiza várias passadas (profundidade, cor, normais) para as geometrias e só então realiza os cálculos, dessa forma apenas os fragmentos visíveis são considerados. O segundo modo é mais eficiente para lidar com muitas luzes, porém não oferece suporte a transparência e suavização (ŠMÍD, 2017).

2.1.1.2 Matrizes de transformação de coordenadas

Esse é um tópico mais complexo, mas que também é importante para entender como a pipeline gráfica do OpenGL transforma descrições de objetos tridimensionais em imagens 2D que são exibidas na tela (Figura 8). Algo semelhante a como uma câmera pode ser usada para criar uma representação em imagem de algo no mundo real. Entretanto nesse caso o primeiro

Figura 8 – Processo de transformação entre os sistemas de coordenadas e seus espaços.



Fonte – <https://learnopengl.com/img/getting-started/coordinate_systems.png>

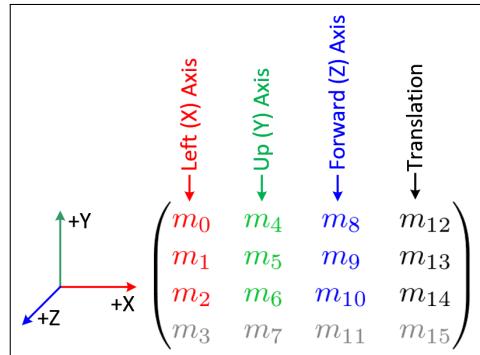
passo consiste em pegar as informações do modelo do objeto 3D, como posição dos vértices e normais da superfície, para interpretá-las como coordenadas do espaço do objeto (ROST, 2006).

Como cada objeto tem suas próprias características é necessário definir um sistema de coordenadas uniforme para que seja possível usar vários objetos em uma única cena. Para isso é utilizado o sistema de coordenadas global, e aqui a API vai um passo além e realiza mais uma conversão para o sistema de coordenadas de olho levando em consideração a posição da câmera na cena, seu ponto focal (para onde a câmera está olhando) e o vetor de direção para cima (e.g. a orientação da câmera) (ROST, 2006).

$$\begin{bmatrix} x_{olho} \\ y_{olho} \\ z_{olho} \\ w_{olho} \end{bmatrix} = M_{modelView} \cdot \begin{bmatrix} x_{obj} \\ y_{obj} \\ z_{obj} \\ w_{obj} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Na equação 2.1, a matriz *modelView* é uma multiplicação das matrizes de conversão de coordenadas de espaço de objeto para espaço global e de espaço global para espaço de olho. O cálculo das normais é semelhante, a diferença é que é utilizada a matriz transposta da inversa da matriz *modelView* para multiplicar um vetor de normais. Como é possível ver na Figura 9 os três elementos mais à direita (m_{12}, m_{13}, m_{14}) são para transformação de translação. O m_{15} é uma coordenada homogênea (Apêndice — A) usada para transformação para o espaço de projeção. Os três conjuntos de elementos (m_0, m_1, m_2), (m_4, m_5, m_6) e (m_8, m_9, m_{10}) são usados para rotação e escala e representam os três eixos ortogonais x, y e z (AHN, 2013).

Figura 9 – Conteúdo das quatro colunas da matriz *modelView*.



Fonte – <http://www.songho.ca/opengl/gl_transform.html>

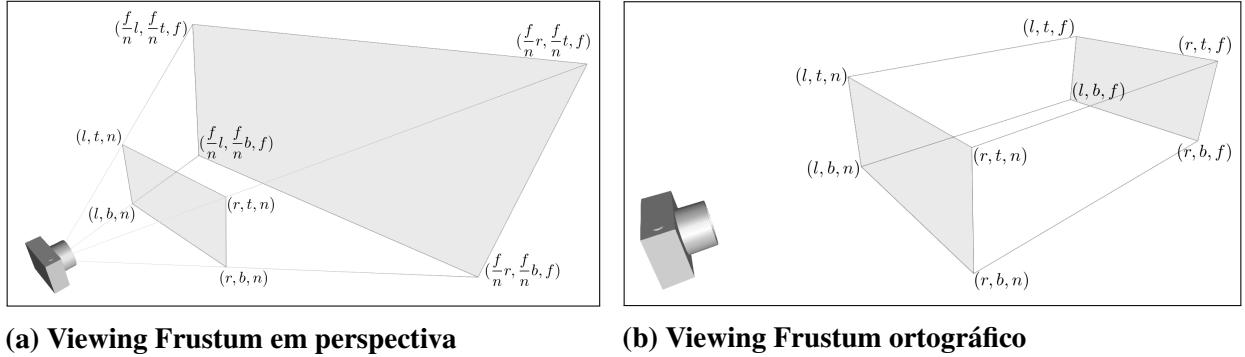
Após essa conversão, as coordenadas obtidas são multiplicadas pela matriz de projeção para definir como os vértices serão projetados na tela, os valores dessa matriz dependem se modo de projeção utilizado é em perspectiva ou ortográfico (Figura 10) e são mostrados nas equações 2.3 e 2.4 respectivamente.

$$M_{persp} = \begin{bmatrix} \frac{2n}{r-l} & 0 & \frac{r+l}{r-l} & 0 \\ 0 & \frac{2n}{t-b} & \frac{t+b}{t-b} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-(f+n)}{f-n} & \frac{-2fn}{f-n} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$M_{ortho} = \begin{bmatrix} \frac{2}{r-l} & 0 & 0 & -\frac{r+l}{r-l} \\ 0 & \frac{2}{t-b} & 0 & -\frac{t+b}{t-b} \\ 0 & 0 & \frac{-2}{f-n} & -\frac{f+n}{f-n} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Os valores obtidos nessa operação são normalizados em uma região cúbica definida pelos pontos (-1, -1, -1) e (1, 1, 1) para espaço de coordenadas de dispositivo normalizado, isso significa que os valores passam a ser algum valor entre -1 e 1. Essa etapa é necessária para que a área de visualização seja apropriadamente mapeada em uma janela de exibição de tamanho arbitrário. Por último, as coordenadas são convertidas para o sistema de coordenadas de tela. A partir desse ponto elas continuam para o processo de rasterização da pipeline do OpenGL (AHN, 2013).

Figura 10 – Modos de projeção de câmera. As letras correspondem a *left, right, bottom, top, near e far*.



Fonte – <http://www.songho.ca/opengl/gl_transform.html>

2.1.2 OpenGL Shading Language

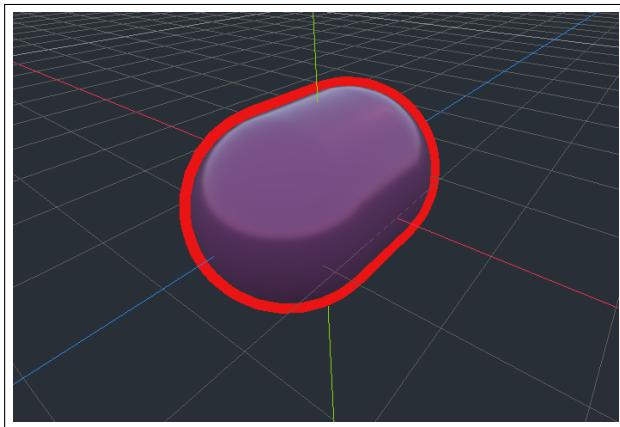
Devido à necessidade crescente de substituir funcionalidades fixas por programabilidade em áreas que ficavam cada vez mais complexas, como processamento de vértices e fragmentos, foi desenvolvida uma solução que adicionou estágios programáveis para resolver esse problema. Essa solução foi a introdução da linguagem de sombreamento GLSL, feita para ser executada nos dois processadores programáveis existentes no OpenGL: o processador de vértices e o processador de fragmentos (portanto os respectivos nomes *vertex shader* e *fragment shader*) (ROST, 2006).

Um shader pode então ser definido como um código escrito em uma linguagem de sombreamento (HLSL, GLSL, RSL e etc) com o propósito de ser executado por um dos processadores programáveis do OpenGL. Um programa de shader é então um conjunto de shaders compilados executáveis (ROST, 2006). A Figura 11 mostra a implementação do código-fonte 4 para criar um efeito de linha de contorno em volta de um objeto 3D utilizando a linguagem GLSL.

A linguagem de sombreamento GLSL faz uso de uma sintaxe bastante similar a linguagem de programação C. Seus tipos incluem vetores e matrizes por serem estruturas fundamentais para cálculos matemáticos com operações para gráficos 3D. O uso de números de ponto flutuante (*float*) também é fundamental para conseguir altos níveis de precisão a troco de performance, por isso é possível especificar o nível de precisão desejado ao utilizá-los. Além disso ela oferece suporte a laços, chamadas a sub-rotinas, expressões condicionais e conta com funções embutidas próprias para o desenvolvimento de shaders (ROST, 2006).

Essa linguagem possibilitou aos desenvolvedores implementar um conjunto de

Figura 11 – Demonstração de um shader simples de linha contorno.



Fonte – Elaborado pelo autor

diferentes técnicas para conseguir obter uma variedade enorme de efeitos visuais; não somente isso mas o fato de que essas técnicas são implementadas com aceleração via hardware pela GPU (com processamento paralelo) proporciona um aumento drástico de performance e libera carga da CPU para realizar outras tarefas (ROST, 2006).

O processador de vértices é uma unidade programável que realiza operações nos valores de vértices recebidos e seus dados associados. Essas operações consistem em transformação de vértices, transformação e normalização das normais, geração e transformação das coordenadas de textura, iluminação e aplicação de cor. Shaders feitos para rodar nesse processador são chamados de shaders de vértice (ROST, 2006).

Variáveis de atributo (variável global somente leitura alterada por vértice) são utilizadas para passar valores da aplicação para o processador de vértices. Já as variáveis uniformes (variável global somente leitura alterada por primitiva) são utilizadas para passar dados tanto para o processador de vértices como de fragmentos. Por último há as variáveis variantes cuja função é transportar informação do processador de vértices para o processador de fragmentos (ROST, 2006).

O processador de vértices atua em um vértice por vez e uma implementação pode ter múltiplos processadores operando em paralelo (o mesmo vale para o processador de fragmentos). Logo, o shader de vértice é executado uma vez para cada vértice, sendo que há uma possibilidade de perda de performance caso um shader de vértice precise calcular mais variáveis variantes do que o que é necessário pelo shader de fragmentos. Por outro lado, o processador de fragmentos é responsável por realizar algumas operações como interpolação de valores, acesso e aplicação de texturas, névoa e soma de cor (ROST, 2006).

Cabe ressaltar que, em termos de performance, normalmente os desenvolvedores

preferem utilizar um shader de vértice mais genérico em conjunto com um shader de fragmento, pois assim é possível utilizar apenas um subconjunto das variáveis contidas no shader de vértice e ainda sim reduzir tempo e custos de desenvolvimento e manutenção para uma grande quantidade de shaders (ROST, 2006).

2.1.3 Direct3D (HLSL) *versus* OpenGL (GLSL)

Direct3D é uma API para desenvolvimento de aplicações gráficas nativas para plataformas proprietárias da Microsoft. Ela evoluiu muito durante os anos 90 e superou a OpenGL. Conceitualmente, a pipeline gráfica de ambas APIs são bem semelhantes, mas uma diferença importante se dá em termos de design de gerenciamento dos estágios de shaders, onde OpenGL faz uso de um objeto (programa de shader) que contém múltiplos shaders enquanto que Direct3D expõe um contexto de renderização diretamente para a criação de shaders. Quanto às linguagens (GLSL e HLSL), são muito parecidas e os desenvolvedores conseguem transcrever instruções facilmente de uma para a outra (MICROSOFT, 2020).

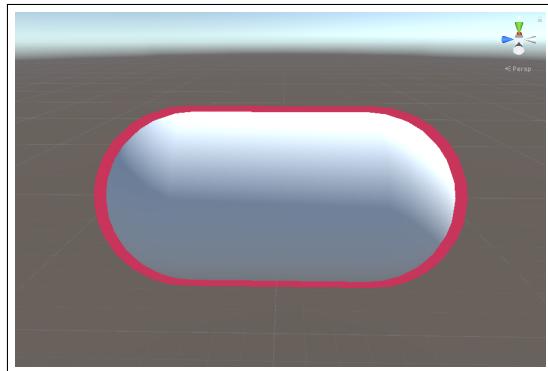
Considerando a pouca diferença em capacidade de renderização existente entre essas duas interfaces, a escolha sobre qual usar depende muito da plataforma alvo de desenvolvimento. Direct3D é específica para plataformas da Microsoft e é amplamente suportada por fornecedores de hardware gráfico, especialmente em computadores desktop. OpenGL é open source e possui bastante aceitação no espaço de desenvolvimento mobile, principalmente devido ao desenvolvimento da OpenGL ES — uma subseção do OpenGL projetada especialmente para sistemas embarcados como smartphones e consoles portáteis (VARCHOLIK, 2014).

Uma das principais diferenças é o ambiente de execução. O compilador HLSL traduz o código para linguagem de máquina que é processada pelo driver do DirectX. Enquanto que no caso do OpenGL os fornecedores de hardware, por serem responsáveis pela implementação do compilador, possuem muito mais liberdade para realizar otimizações em shaders. Para mitigar essa diferença a Microsoft fornece uma solução (DirectX Effects Framework) para desenvolvedores elaborarem programas de shaders iguais para hardwares com menor e maior capacidade de processamento (ROST, 2006).

2.1.4 High-Level Shader Language

Essa é uma linguagem de shader criada em 2002 (acompanhou o DirectX 9) que também assemelha-se à linguagem C. Ao longo dos anos foram adicionadas melhorias como

Figura 12 – O mesmo resultado de contorno obtido com HLSL.



Fonte – Elaborado pelo autor

suporte a *Multithread*, adição de uma API para uso de GPGPU (GPU de propósito geral) e suporte a tesselação. Na Figura 12 é mostrada a implementação de um shader de contorno (ver código-fonte 3) similar ao anterior para realçar as diferenças e semelhanças entre as duas linguagens.

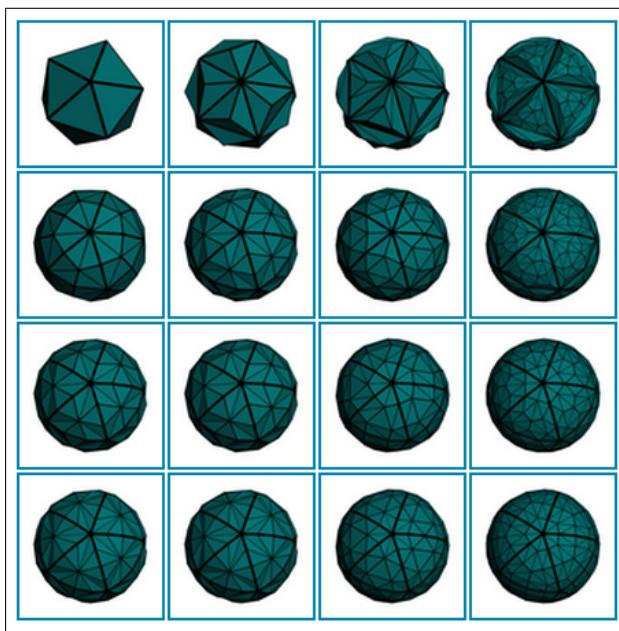
Uma GPU de propósito geral é uma unidade de processamento gráfico que realiza cálculos genéricos que normalmente seriam feitos pela CPU. São utilizadas para realizar tarefas custosas como cálculos de física, criptografia e computações científicas, pois é possível tirar proveito do paralelismo. Da mesma forma que um núcleo pode ser utilizado para renderizar múltiplos pixels simultaneamente, ele também é capaz de processar múltiplos fluxos de dados ao mesmo tempo (TECHTARGET, 2015).

Tesselação é mais um processo na pipeline gráfica responsável por adicionar detalhes a objetos diretamente pela GPU. De maneira geral, mais detalhes geométricos (mais vértices), resultam em uma renderização "mais bonita". Seu modo de funcionamento consiste em subdividir um objeto dinamicamente e sem o custo adicional de reprocessamento de geometria. Isso permite um sistema de nível de detalhe dinâmico e menos utilização do barramento de gráficos, o que melhora a performance (VARCHOLIK, 2014).

Esse processo é relativamente novo e ocorre na etapa do shader de geometria, que adiciona um passo de criação de geometria na pipeline gráfica após o shader de vértices. Isso permite que o programador implemente tesselação automática para geometrias complexas, ou realize operações gráficas dependentes de geometria como silhuetas e sombras (BAILEY; CUNNINGHAM, 2007).

Nível de detalhe é um fator chave de otimização utilizado por game engines para alcançar renderização de alta qualidade com melhor performance. Além disso é desejável evitar

Figura 13 – Diferentes níveis de tesselação aplicados em uma malha produzem aumento no número de vértices.



Fonte – <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fc/Tessellation_Level_Table.png>

mudanças frequentes em shaders e chamadas de desenho utilizando um número reduzido de shaders. Isso minimiza a sobrecarga da CPU e ajuda a GPU a desenhar mais objetos em um frame com shaders com nível de detalhe (HE *et al.*, 2015).

2.2 APROFUNDANDO CONCEITOS TÉCNICOS DE SHADERS

Ao estudar computação gráfica a dúvida mais comum ao se deparar com certos termos utilizados é "o que é um shader". Essa palavra pode causar uma certa estranheza no início mas sua definição não é nenhum bicho de sete cabeças. Shaders são apenas pequenos programas (assim como um reproduutor de mídia ou uma calculadora de um computador) que são executados diretamente pela GPU ao invés da CPU. Isso permite a redução da carga de trabalho gráfico da CPU pelo redirecionamento das tarefas para a GPU que possui hardware especializado para isso (LUTEN, 2014).

Shaders programáveis são uma das ferramentas mais impressionantes desenvolvidas para computação gráfica nos últimos anos. Através de seu uso, programadores ganharam flexibilidade para aplicar efeitos vértice-por-vértice e pixel-por-pixel com o processamento paralelo em gráficos interativos entre as mais diversas áreas como ciência, arte, engenharia, entre outras (BAILEY; CUNNINGHAM, 2007).

Figura 14 – Demonstração de como é possível criar visuais únicos utilizando shaders.



Fonte – Adaptado de <https://www.youtube.com/watch?time_continue=2&v=F0CWzpYY68A&feature=emb_logo>

Tecnicamente falando, um shader contém um conjunto de instruções que são executadas concorrentemente para cada pixel desenhado na tela. Essa forma de operação abre um leque de possibilidades, onde é possível por exemplo atribuir um comportamento para cada pixel baseado na sua posição na tela. Em uma comparação com programação procedural, ele funcionaria como uma função que recebe uma posição e retorna uma cor, sendo que após a compilação seu tempo de execução é extremamente rápido (VIVO; LOWE, 2015).

Uma metáfora para ajudar a compreender a dimensão da complexidade do processamento de um shader seria imaginá-lo como um bloco de várias tarefas que passa por uma linha de produção industrial. As tarefas podem ser pequenas ou grandes e consequentemente podem demandar mais processamento e energia. No caso da CPU cada trabalho seguinte teria que esperar o término do atual para começar (VIVO; LOWE, 2015). É interessante ressaltar que hoje em dia existe a tecnologia de multiprocessamento, onde os computadores normalmente possuem grupos de quatro processadores que atuam em conjunto para realizar as tarefas.

Considerando uma tela com resolução de 800x600, significa que 480.000 pixels precisam ser processados a cada frame sendo que normalmente é utilizada uma taxa de 30 frames por segundo (FPS), então será necessário fazer 14.400.000 cálculos por segundo. Isso explica o fato de video games e outras aplicações gráficas exigirem muito mais poder de processamento que outros programas. Seu conteúdo gráfico implica em inúmeras operações por cada pixel, pois cada pixel na tela precisa ser computado, e também em perspectivas e geometrias de jogos 3D (VIVO; LOWE, 2015).

Esse cenário pode ser suficiente para sobrecarregar um microprocessador comum

e fica pior quando leva-se em consideração as tecnologias que fazem uso seja de taxa de FPS maior, seja de resoluções maiores como 2K, e acima. Para resolver esse problema utiliza-se processamento paralelo. A GPU possui vários pequenos microprocessadores que funcionam concorrentemente, além disso ela possui funções matemáticas específicas aceleradas via hardware para realizar operações matriciais e trigonométricas rapidamente (VIVO; LOWE, 2015).

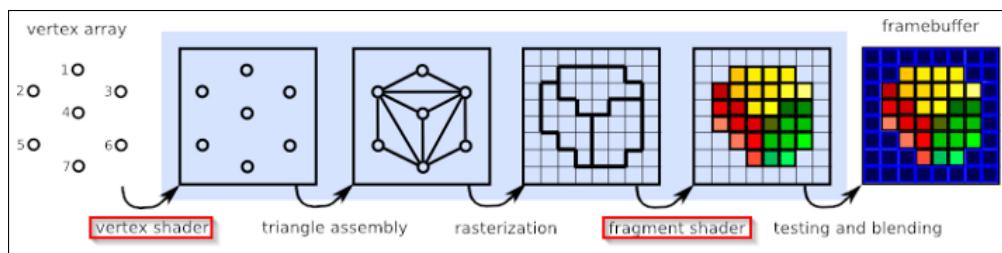
A dificuldade relativa de programar shaders levou ao desenvolvimento de ferramentas visuais que auxiliam a criação desses programas através do uso de nós funcionais conectados entre si que remetem a uma estrutura de árvore. Esse tipo de ferramenta está presente na Unreal Engine desde 2005. Ao mesmo tempo que possuem utilidade, é importante garantir que shaders gerados por tais ferramentas seja otimizados. Otimização é importantíssima para encorajar desenvolvedores a criar shaders maiores e mais complexos (JENSEN *et al.*, 2007).

Conforme descrito em estudo por Wang *et al.* (2014) vários estudos sobre otimização de shaders já foram conduzidos, porém com efetividade apenas para o estágio de fragmentos. De certa forma a qualidade dos shaders depende bastante da experiência dos programadores e pode ser um processo bem demorado para níveis de complexidade maiores. Normalmente a computação mais custosa ocorre no shader de fragmentos.

2.2.1 Vertex Shader

Um shader de vértice é um programa executado uma vez para cada vértice cujo é atribuído. As operações mais importante dessa etapa são as que envolvem cálculo de transformação e luzes. A aplicação desses shader permite uma paleta ilimitada de efeitos visuais renderizadas em tempo real. Dentre as principais aplicações merecem destaque o suporte a criação de animações realistas e a possibilidade de deformar superfícies para criar efeitos realistas de ondas (NVIDIA, 2019).

Figura 15 – Como os estágios de shaders se relacionam.



Fonte – <https://miro.medium.com/max/700/1*_z7Vbb0msvXsUFq3sSMZAg.png>

O processador de vértices realiza as principais transformações de coordenadas

descritas na Seção 2.1.1.2. Como nessa etapa há bastante informação sobre a geometria e o processador é capaz de realizar inúmeras operações, essa é uma ótima etapa para inserir código. Quando essas coordenadas deixam o estágio de processamento, elas são cortadas e mapeadas para o sistema de coordenadas de tela, prontas para serem rasterizadas (BAILEY; CUNNINGHAM, 2007).

2.2.2 Fragment Shader

Um shader de fragmento é um programa executado uma vez para cada pixel. Fragmentos são estruturas de dados (contidas em cada pixel) que são criadas pela rasterização das primitivas. Um fragmento contém todos os dados necessários para atualizar seu espaço no *frame buffer*. O processamento desses fragmentos consistem em operações feitas em cada pixel, sendo que as mais notáveis são a leitura da memória de textura e a aplicação do valor de textura para cada fragmento (ROST, 2006).

Nessa etapa o processador de fragmentos recebe as informações de cada pixel (seus valores de vermelho, verde, azul, transparência e coordenadas de textura). Cada pixel também possui informação recebida do processador de vértices e interpolada na rasterização. Esse processador também pode acessar informações globais como a posição das luzes e seu trabalho final é processar essas informações e produzir a cor final de cada pixel (ou descartá-lo). Sua grande utilidade consiste na possibilidade de customização da aparência dos pixels de acordo com as necessidades do programador (BAILEY; CUNNINGHAM, 2007).

Dependendo da resolução definida, algo em torno de 2 milhões de pixels podem precisar ser processados e renderizados a cada frame (60 FPS). Isso facilmente gera uma carga computacional enorme. Felizmente, com a evolução da tecnologia, os desenvolvedores podem facilmente implementar programas que controlam a iluminação, o sombreamento e a cor de cada pixel (NVIDIA, 2019).

Como foi mostrado por Bilodeau (2019), apesar de ser possível realizar computações de propósito geral no shader de fragmentos, vale a pena destacar a tecnologia dos shaders de computação e suas vantagens como maior controle sobre as *threads*, acesso à memória compartilhada, dispensabilidade de renderização de polígonos. Além disso, utilizar oclusão de ambiente em alta definição é muito custosa e pode ser substituída por meia resolução em conjunto com desfoque para melhorar a performance.

2.3 MOTORES DE JOGO E SUAS FERRAMENTAS

Criadores de jogos atualmente contam com motores de jogo para desenvolver as principais partes de software para seus jogos. Sua principal função é simplificar as tarefas dos desenvolvedores oferecendo abstrações convenientes para os sistemas operacionais e seus hardwares nos quais o jogo funcionará. Isso somado ao propósito de explorar ao máximo a capacidade das máquinas dos usuários para que seja proporcionada uma experiência mais imersiva possível (MESSAOUDI; SIMON; KSENTINI, 2015).

Quadro 1 – Principais componentes das game engines

	Godot	Unity	Unreal
Shading	GLSL	ShaderLab (HLSL) / Shader Graph	Material Nodes
Sistema de Partículas	Built-in	Built-in / VFX Graph	UnrealCascade
Motor de física	Bullet	PhysX	PhysX
Programação	GDSCript / C#	C#	C++ / Blueprint
Audio	Bus System	Audio Mixer	Sound Cue

Fonte – Elaborado pelo autor

Conforme definido por Barczak, Woźniak (2019) motores de jogo são softwares (proprietários ou de código aberto) voltados para facilitar a criação de jogos eletrônicos. Seus sistemas permitem a integração de vários elementos como *Scripts*, malhas, animações e audios que juntos podem formar um jogo eletrônico que pode ser distribuído para diferentes plataformas por indivíduos ou companhias.

Atualmente motores de jogo são utilizados não somente como ferramentas de desenvolvimento de jogos, mas também em comunidades científicas para estudos que envolvem simulações nas áreas de medicina, arquitetura (para design de ambientes), meteorologia, geologia (com simulação e estudo de topologias) e educação, principalmente através do uso de Realidade Virtual e Realidade Aumentada (ŻUKOWSKI, 2019).

Cada engine conta com um motor de renderização com funcionalidades que facilitam o processamento das informações da cena (câmera, luzes, materiais e texturas). Esse motor é uma parte fundamental de uma game engine e consome a maior parte dos recursos (90% dos cálculos dizem respeito a renderização). Como os jogadores esperam visuais melhores e os jogos precisam rodar em hardwares inferiores, há um conflito que faz com que os motores de renderização precisem ser otimizados e configuráveis durante o desenvolvimento (ŠMÍD, 2017).

Ambas as engines Unity e Unreal contém um sistema de iluminação global que simula operação em tempo real. Boa parte dos cálculos de renderização de luz são feitos antes

Quadro 2 – Funcionalidades gráficas presentes nas game engines

	Unity	Unreal	Godot
1. Texture			
1.1. Basic	✓	✓	✓
1.2. Procedural	✓	✓	✓
2. Lighting			
2.1. Per-vertex	✓	✓	✓
2.2. Per-pixel	✓	✓	✓
2.3. Light Mapping	✓	✓	✓
2.4. Gloss/Specular Maps	✓	✓	X
2.5. Basic	✓	✓	✓
3. Shadows			
3.1. Shadow Mapping	✓	✓	✓
3.2. Projected	✓	✓	✓

Fonte – Adaptado de Christopoulou e Xinogalos (2017)

de exibir o primeiro frame e seus resultados são utilizados durante a execução do jogo. As duas engines oferecem suporte a sombreamento baseado na física (simulação da interação física entre as luzes e as superfícies). Além disso, destaca-se o suporte a algumas técnicas avançadas como suavização de bordas, reflexões em tempo real, oclusão de ambiente, profundidade de campo, entre outras (BARCZAK; WOŹNIAK, 2019).

Em termos de qualidade de gráficos, Godot e Unity são considerados inferiores a Unreal, que é mais adequada para renderizar gráficos empolgantes e realistas. Sendo que Unreal Engine se destaca pelos seus notáveis efeitos de pós-processamento e por implementar um ótimo efeito de dispersão de subsuperfície (Figura 16) (BARCZAK; WOŹNIAK, 2019).

A escolha final das game engines requer a ponderação de alguns fatores como tipo de licença, possibilidade de modificação do código, possível uso comercial, especificações de hardware, plataforma alvo, habilidade da equipe de desenvolvimento, ferramentas de suporte, estabilidade da engine e público alvo (NAVARRO; PRADILLA; RIOS, 2012).

Por serem ferramentas complexas, sua comparação é uma tarefa complicada. A maneira mais apropriada seria implementar o mesmo projeto com complexidade apropriada e de maneira similar em cada game engine utilizando critérios mensuráveis para avaliação (ŠMÍD, 2017).

Figura 16 – A luz que penetra na superfície de um objeto translúcido é espalhada pela interação com o material e sai da superfície em um ponto diferente.



Fonte – <<http://www.mrbluesummers.com/wp-content/uploads/2010/07/Sub-Surface-Scattering-Example.jpg>>

2.3.1 Godot

2.3.2 Unity

Unity é um motor de jogo desenvolvido e mantido pela empresa Unity Technologies que permite a criação de jogos 2D e 3D. Apresentada em 2005, sua primeira versão era simples e compatível apenas com Mac OS, porém com sua evolução foi adicionado suporte a outras plataformas (PC, Linux, Android, iOS, PS4, etc) (BARCZAK; WOŹNIAK, 2019). Esse foi um dos principais fatores que tornou essa engine tão popular. Já que por suportar mais plataformas, pode proporcionar acesso a um público mais amplo.

Ela faz uso do DirectX como pipeline de renderização padrão, mas além disso ela utiliza quatro atividades de renderização adicionais. A pipeline de renderização direta é dividida em passagem de ambiente para objetos não afetados pela luz, passagem de transparência e passagem de luz para objetos opacos. Já a pipeline de renderização diferida é baseada em um modelo inteligente que primeiro computa a geometria e depois aplica a luz (MESSAOUDI; SIMON; KSENTINI, 2015).

A pipeline de renderização de pré-passagem é direcionada para as restrições no uso de diferentes shaders no processo diferido. As informações de luz são guardadas em um buffer para melhorar a performance dos cálculos. Por último é realizado o processo de renderização

de vértices iluminados (cada objeto é renderizado com a iluminação de todas as fontes de luz calculada nos vértices) que é o mais rápido (MESSAOUDI; SIMON; KSENTINI, 2015).

Sua arquitetura consiste em um sistema modular baseado em componentes que são utilizados para compor os objetos nos jogos. Cada componente possui um conjunto de funcionalidades que afetam o comportamento do objeto, dessa forma não é necessário usar herança. Isso é uma vantagem visto que aumenta a flexibilidade e a eficiência da modificação dos objetos (BARCZAK; WOŹNIAK, 2019).

Cabe ainda destacar que ela possui uma das melhores documentações. A maioria das funções são descritas em profundidade e com bastante uso de exemplos, o que é muito útil principalmente para usuários iniciantes. Além disso ela possui uma vasta quantidade de templates, uma interface limpa e fácil de configurar, uma comunidade ativa, e seu uso de C# ao invés de C++ torna a programação mais simples e agradável (BARCZAK; WOŹNIAK, 2019).

Conforme verificado em estudo por Costa, Gomes, Duarte (2016), dentre os motores de jogo a Unity é uma das ferramentas mais vantajosa do ponto de vista de produção por possuir um formato mais profissional e comercial, voltado para desenvolvimento multiplataforma. Além disso ela é capaz de performar melhor em composições de hardware mais simples.

A escolha da Unity pode-se justificar pelo fato de sua notável popularidade e seu crescimento constante, sendo que mais de 47% dos desenvolvedores de jogos utilizam-na, com aproximadamente 45% de participação no mercado de game engines e mais de 600 milhões de jogadores gastando mais de US\$ 110 bilhões (MESSAOUDI; SIMON; KSENTINI, 2015).

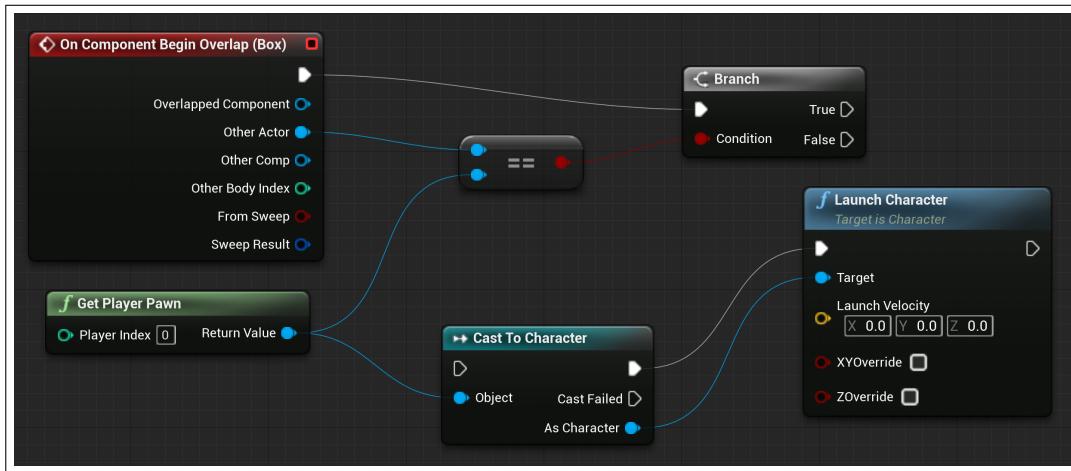
2.3.2.1 ShaderLab

2.3.3 Unreal

Unreal é mais um motor de jogo que está a mais tempo no mercado (desde 1998). Ela também permite a criação de jogos para múltiplas plataformas. Ela possui uma ferramenta específica para criação de scripts chamada *BluePrint* que permite implementar lógica de programação usando blocos, porém também é possível criar scripts em C++ (BARCZAK; WOŹNIAK, 2019).

É uma engine, em comparação com a Unity, mais difícil de dominar apesar de possuir uma interface amigável, porém com excesso de opções à primeira vista. Seu sistema de programação com *BluePrints* (Figura 17) traz uma vantagem para pessoas que não sabem ou não gostam de escrever código (BARCZAK; WOŹNIAK, 2019).

Figura 17 – A programação da lógica do jogo pode ser feita utilizando o sistema visual de *BluePrint*.



Fonte – <https://docs.unrealengine.com/4.27/Images/ProgrammingAndScripting/Blueprints/QuickStart/BPQS_6_Step4.png>

Merecem destaque seu sistema de renderização Multithread (intitulado Gemini) com 64 bits de HDR (High Dynamic Range), oclusão de ambiente, iluminação por pixel, iluminação especular dinâmica e reflexões, seu sistema de customização de terrenos e ainda o sistema de malhas de navegação para integração com personagens controlados por inteligência artificial (ARMSTRONG, 2013).

Unreal apresenta uma melhor performance audiovisual de maneira geral. Além disso ela apresenta uma interface mais complexa em comparação com Unity e Godot que oferece todas as ferramentas necessárias em uma única janela. É portanto uma engine voltada para usuários mais experientes e hardwares mais robustos (CHRISTOPOULOU; XINOGALOS, 2017).

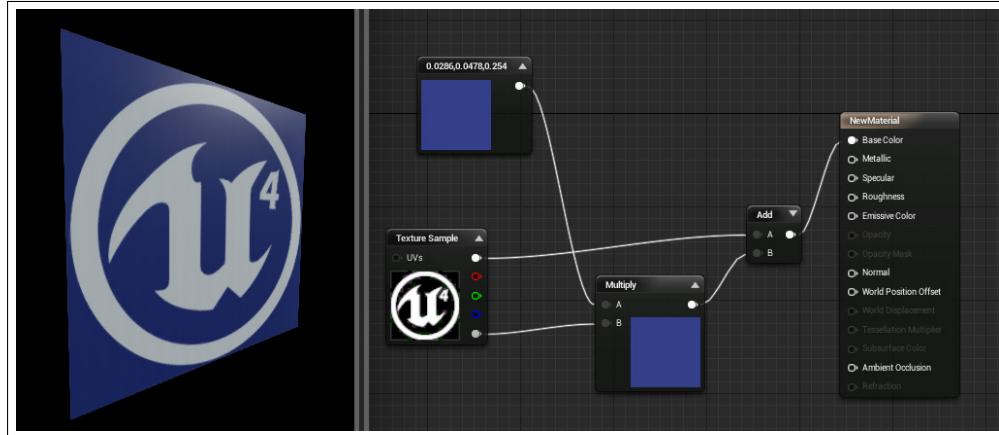
Essa engine

2.3.3.1 Nós de material

Novamente, a Unreal se destaca por implementar uma ferramenta visual de edição de materiais que reutiliza os nós das *Blueprints* mencionadas anteriormente, porém dessa vez voltadas para a modificação das propriedades dos materiais, o que torna o processo de criação de shader bastante amigável e divertido por estimular visualmente a criatividade dos usuários (BARCZAK; WOŹNIAK, 2019).

Seu sistema de materiais é uma das melhores ferramentas. Para cada material é compilado um shader. Então é possível utilizar o mesmo material ou pequenas variações deste. Esse método proporciona aos artistas uma ferramenta poderosa para criação de materiais, porém

Figura 18 – Uso de uma textura como base para definir a cor de um material.



Fonte – <https://docs.unrealengine.com/4.27/Images/RenderingAndGraphics/Materials/PhysicallyBased/BaseColor_QS.webp>

o lado negativo é que no caso de shaders mais complexos o tempo de compilação pode aumentar bastante (ŠMÍD, 2017).

Por baixo dos panos, essa engine implementa uma otimização de sombreamento chamada cascata de sombras. Ela renderiza múltiplos mapas de sombra baseado na distância da câmera para que objetos mais próximos tenham sombras mais definidas que objetos distantes. Há uma mistura suave entre esses mapas para que a mudança seja quase imperceptível. Isso melhora a performance e é muito eficiente especialmente para grandes cenas (ŠMÍD, 2017).

2.4 OTIMIZAÇÃO E PERFORMANCE

Devido à sua natureza de operação que requer simulação em tempo real, os jogos eletrônicos são softwares que exigem bastante recursos de hardware. Ainda mais atualmente quando os desenvolvedores cada vez mais objetivam criar produtos que perfaçam 60 frames por segundo (FPS) ou mais. Dessa forma, para atingir o maior público possível, vale a pena usar ferramentas que possibilitem o uso mais otimizado possível desses recursos (SKOP, 2018).

Com o crescimento do mercado de dispositivos móveis, a oportunidade de desenvolver e vender aplicações sofisticadas para esses dispositivos é ainda mais atrativa. Entretanto há também uma enorme quantidade de desafios ao lidar com esse tipo de tecnologia, entre eles: fonte de alimentação, quantidade de poder computacional, tamanho do display e tipos de entrada. Além disso, os processadores de smartphones não tratam números de ponto flutuante, o que reduz muito a precisão dos cálculos (SINGHAL; PARK; CHO, 2010).

Na GPU de dispositivos móveis o número de espaços de instrução é limitado para os

shaders de vértice e fragmento. Enquanto empacotar múltiplos ciclos de renderização em um único shader de fragmento aumenta a contagem de instruções, aumentar a quantidade de ciclos de renderização diminui o fracionamento paralelo. Nesse caso a melhor solução dependerá das necessidades da aplicação (SINGHAL *et al.*, 2011).

Segundo Singhal et al. (2011) algumas formas de otimizar shaders seriam por meio de compressão de texturas para diminuir a sobrecarga de transferência de memória (ou utilizar um formato de pixel de menor precisão), pré-computar coordenadas vizinhas de texturas no shader de vértice e substituir laços por códigos otimizados ou utilizar vetores para realizar operações (diminuir a quantidade de instruções).

Considerando o trabalho de Nusrat *et al.* (2021), cabe aos desenvolvedores simplificar os gráficos para melhorar a performance. Simplificação de shaders e de modelos 3D são os tipos de melhorias mais comuns que podem afetar a experiência visual dos usuários. Por exemplo, ativar o corte de oclusão estático/dinâmico desativa a renderização de objetos cobertos e ativar o Light Baking pré-calculta efeitos de luz durante a compilação.

Nesse sentido, os desenvolvedores devem tentar entender o custo computacional dos shaders e modelos 3D antes de usá-los. Para isso, antes de adicioná-los, devem ser feitos testes pois ao inserir vários modelos e shaders pode ser difícil distinguir quais estão causando problemas de performance (NUSRAT *et al.*, 2021).

Devido a melhoria no poder de processamento gráfico, o uso de técnicas como iluminação 3D, vegetação gerada proceduralmente e fotogrametria aumentou consideravelmente tornando o processo de renderização mais custoso. Métodos comuns para otimização de cenas que fazem uso dessas técnicas são alocação de memória, Multithread, e nível de detalhe. Ou seja, realizar a renderização em uma thread separada da lógica do jogo ajuda bastante a melhorar a performance (ZHANG *et al.*, 2017).

Nível de detalhe é uma forma de determinar a distribuição dos recursos de renderização entre os objetos (de acordo com a posição e a importância atribuída aos vértices desses), diminuindo o número de dados desnecessários. Outrossim, são gerados modelos simplificados que reduzem a complexidade da cena e permitem uma renderização em tempo real mais eficiente (ZHANG *et al.*, 2017).

Como as GPUs normalmente possuem ótima capacidade de processamento de vértices, a etapa de sombreamento de vértices raramente gerará um gargalo. Entretanto quando muitos pixels precisam ser processados por um shader de fragmentos com muitas instruções é esperado que haja um gargalo. Pode-se dizer que o número de instruções é inversamente

proporcional à performance (taxa de frames) (SINGHAL; PARK; CHO, 2010).

O controle de precisão de ponto flutuante — em OpenGL baixo (10 bits), médio (16 bits) e alto (32 bits) — é uma ótima ferramenta para melhorar o desempenho, porém precisa ser usada de forma apropriada, pois um nível de baixa precisão apesar de melhorar a performance pode acabar gerando artefatos indesejados (SINGHAL; PARK; CHO, 2010).

Quadro 3 – Exemplo do número de instruções necessárias para operações específicas no OpenGL

Operação	Número de Instruções	Número de ciclos de renderização	Operação	Número de Instruções	Número de ciclos de renderização
RGB2GRAY	5	1	Gaussian	21	1
RGB2YCbCr	14	1	Sharpening	13	1
YCbCr2RGB	14	1	Gradient	19	2
RGB2HSV	28	1	Bilateral	62	2
HSV2RGB	29	1	Laplacian	14	1
			Box filter	18	1
Bloom	15	1	Sobel	24	2
Skin detection	25	2	Prewitt	16	2
Detail enhancement	13	1	Contrast Stretching	13	1
Edge enhancement	25	2	Median filtering	43	1
Dilation	22	1	Erosion	22	1
Median	43	1	Zero-crossing	22	1
Sepia	21	1	Color gradient	20	1
Radial Blur	21	1	Negative	2	1
Edge overlay	25	2	Gamma	15	1
Gray	5	1	Edge	24	2

Fonte – (SINGHAL; PARK; CHO, 2010)

Para Crawford e O’Boyle (2018), a quantidade de linhas de código de um shader segue um distribuição de lei de potência, com poucos shaders longos, e vários shaders simples (poucas linhas). Entretanto, até os shaders mais longos possuem em torno de 300 linhas. A maioria contém menos que 50 linhas. Isso mostra que normalmente shaders são bem menores que softwares.

Além disso, como o número de vértices processados em operações de processamento de imagens é muito mais baixo que o de fragmentos (podem ser da ordem de milhões), é recomendado realizar cálculos por vértice ao invés de por fragmento por aquelas serem menos custosas. Por fim, cabe salientar que maiores velocidades de clock favorecem a performance (SINGHAL; PARK; CHO, 2010).

Como a criação de jogos tornou-se mais acessível, vários jogos são criados e lançados frequentemente. Com o aumento da quantidade de jogos no mercado os desenvolvedores precisam fazer com que eles se destaquem da concorrência. Para isso é comum o uso de modelos

gráficos com muitos detalhes, o que pode acabar sobrecarregando o sistema significativamente (MICHAŁ, 2020).

Quando muitos deles estão presentes na tela ao mesmo tempo, o jogo pode não funcionar bem, e isso afeta negativamente a experiência dos jogadores. Uma solução para esse problema consiste em aplicar algoritmos de tesselação para substituir dinamicamente modelos de objetos presentes no jogo. Cada modelo é substituído por um mais simplificado conforme a câmera se afasta, reduzindo a carga no sistema (MICHAŁ, 2020).

A maioria dos motores de jogos disponíveis no mercado oferecem uma ferramenta para geração automática de níveis de detalhe para modelos 3D. A única coisa que o desenvolvedor do jogo deve fazer é indicar como os níveis de detalhe devem ser gerados (caso os parâmetros padrões não se adequem ao seu projeto). A Unreal Engine possui uma ferramenta embutida para gerar níveis de detalhe por padrão com várias configurações prontas preparadas pelos criadores. A ferramenta é capaz de gerar automaticamente o número apropriado de níveis de detalhe (MICHAŁ, 2020).

Uma forma de otimização de shaders já descrita por Rost (2006) consiste na substituição da função de ruído embutida na linguagem de shader por uma função criada pelo próprio desenvolvedor ou por uma textura. A última opção é a melhor em termos de performance. Felizmente, a programabilidade oferecida pela GLSL torna possível pré-computar uma função de ruído e salvar seu resultado em mapas de textura de uma, duas ou três dimensões em cada um de seus quatro componentes.

Outra técnica útil para melhorar a performance ao lidar com várias luzes é o sombreamento diferido, que basicamente determina quais superfícies serão visíveis na cena final e aplica cálculos complexos de efeitos de shader apenas nos pixels que compõem essas superfícies. Dessa maneira, as operações são adiadas até que sejam estabelecidos os pixels que contribuirão para a imagem final. Essa técnica garante que não haja desperdício de ciclos de hardware com cálculos em pixels que sequer serão exibidos na tela (ROST, 2006).

Mais uma maneira de otimização descrita por Jensen *et al.* (2007) seria garantir que o código de shader seja movido para sua parte menos custosa. Nesse caso existem três possíveis lugares: no programa de vértices, no programa de fragmentos, ou nas declarações constantes. A última é a mais otimizada pois os cálculos são realizados em tempo de compilação. A segunda forma mais otimizada seria utilizar o espaço do programa de vértices, mas se houver muito código nessa parte haverá um desbalanceamento.

Caso seja necessário realizar transformações de coordenadas a melhor opção seria

utilizar o espaço do programa de vértices (por exemplo mover transformação da direção da luz em espaço tangente para essa etapa). Ao ponderar-se esses detalhes para as ferramentas de criação de shaders visuais, percebe-se que há uma certa dificuldade em realizar otimizações manuais, já que o código é gerado automaticamente (JENSEN *et al.*, 2007).

Segundo Arnau, Parcerisa e Xekalakis (2014), uma possível técnica de otimização seria o uso de memoização para evitar a execução redundante de computações reutilizando resultados anteriores, o que resulta em aumento de velocidade de execução e economia de energia. De forma simplificada, os cálculos realizados são salvos em uma tabela para que no próximo cálculo os valores sejam reutilizados.

Para medir a performance, é necessária uma forma de Benchmark para comparar a performance com mais precisão e objetividade. Alguma áreas onde o Benchmark é importante são na iluminação global, detecção de colisão, animação, renderização e em áreas onde é preciso medir e comparar a performance (LEXT; ASSARSSON; MOLLER, 2001).

Uma métrica muito comum para sistemas interativos de tempo real é a quantidade de quadros por segundo (taxa de quadros). Ela mede a frequência média de uma aplicação no hardware onde é executada. Assim pode-se obter diferentes valores para diferentes tipos de hardware. Essa é uma medida comum entre várias revistas de jogos de computadores para medir a performance (REHFELD; TRAMBEREND; LATOSCHIK, 2014).

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Integer non lacinia magna. Aenean tempor lorem tellus, non sodales nisl commodo ut. Proin mattis placerat risus sit amet laoreet. Praesent sapien arcu, maximus ac fringilla efficitur, vulputate faucibus sem. Donec aliquet velit eros, sit amet elementum dolor pharetra eget. Integer eget mattis libero

3.1 TRABALHO RELACIONADO A

Suspendisse vitae elit. Aliquam arcu neque, ornare in, ullamcorper quis, commodo eu, libero. Fusce sagittis erat at erat tristique mollis. Maecenas sapien libero, molestie et, lobortis in, sodales eget, dui. Morbi ultrices rutrum lorem. Nam elementum ullamcorper leo. Morbi dui. Aliquam sagittis. Nunc placerat. Pellentesque tristique sodales est. Maecenas imperdiet lacinia velit. Cras non urna. Morbi eros pede, suscipit ac, varius vel, egestas non, eros. Praesent malesuada, diam id pretium elementum, eros sem dictum tortor, vel consectetur odio sem sed wisi.

Sed feugiat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Ut pellentesque augue sed urna. Vestibulum diam eros, fringilla et, consectetur eu, nonummy id, sapien. Nullam at lectus. In sagittis ultrices mauris. Curabitur malesuada erat sit amet massa. Fusce blandit. Aliquam erat volutpat. Aliquam euismod. Aenean vel lectus. Nunc imperdiet justo nec dolor.

3.2 TRABALHO RELACIONADO B

Integer non lacinia magna. Aenean tempor lorem tellus, non sodales nisl commodo ut. Proin mattis placerat risus sit amet laoreet. Praesent sapien arcu, maximus ac fringilla efficitur, vulputate faucibus sem. Donec aliquet velit eros, sit amet elementum dolor pharetra eget. Integer eget mattis libero. Praesent ex velit, pulvinar at massa vel, fermentum dictum mauris. Ut feugiat accumsan augue, et ultrices ipsum euismod vitae

Nunc ac pretium dui. Mauris aliquam dapibus nulla ac mattis. Aenean non tortor volutpat, varius lectus vitae, accumsan nibh. Cras pretium vestibulum enim, id ullamcorper tortor ultrices non. Integer sodales viverra faucibus. Curabitur at dui lacinia, rhoncus lacus at, blandit metus. Integer scelerisque non enim quis ornare.

Nulla ac nisl. Nullam urna nulla, ullamcorper in, interdum sit amet, gravida ut,

Quadro 4 – Praesent ex velit, pulvinar at massa vel, fermentum dictum mauris. Ut feugiat accumsan augue

Quisque	pharetra	tempus	vulputate
E1	Complete coverage by a single transcript	Both	Complete
E2	Complete coverage by more than	Both splice sites	Complete
E3	Partial coverage	Both splice sites	Both

Fonte – Elaborado pelo autor

risus. Aenean ac enim. In luctus. Phasellus eu quam vitae turpis viverra pellentesque. Duis feugiat felis ut enim. Phasellus pharetra, sem id porttitor sodales, magna nunc aliquet nibh, nec blandit nisl mauris at pede. Suspendisse risus risus, lobortis eget, semper at, imperdiet sit amet, quam. Quisque scelerisque dapibus nibh. Nam enim. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nunc ut metus. Ut metus justo, auctor at, ultrices eu, sagittis ut, purus. Aliquam aliquam.

Quadro 5 – Duis faucibus, enim quis tincidunt pellentesque

Quisque	pharetra
E1	Complete coverage by a single transcript
E2	Complete coverage by more than
E3	Partial coverage
E4	Partial coverage
E5	Partial coverage
E6	Partial coverage
E7	Partial coverage

Fonte – Elaborado pelo autor

Etiam pede massa, dapibus vitae, rhoncus in, placerat posuere, odio. Vestibulum luctus commodo lacus. Morbi lacus dui, tempor sed, euismod eget, condimentum at, tortor. Phasellus aliquet odio ac lacus tempor faucibus. Praesent sed sem. Praesent iaculis. Cras rhoncus tellus sed justo ullamcorper sagittis. Donec quis orci. Sed ut tortor quis tellus euismod tincidunt. Suspendisse congue nisl eu elit. Aliquam tortor diam, tempus id, tristique eget, sodales vel, nulla. Praesent tellus mi, condimentum sed, viverra at, consectetur quis, lectus. In auctor vehicula orci. Sed pede sapien, euismod in, suscipit in, pharetra placerat, metus. Vivamus commodo dui non odio. Donec et felis.

Integer non lacinia magna. Aenean tempor lorem tellus, non sodales nisl commodo ut. Proin mattis placerat risus sit amet laoreet. Praesent sapien arcu, maximus ac fringilla efficitur, vulputate faucibus sem. Donec aliquet velit eros, sit amet elementum dolor pharetra eget. Integer eget mattis libero.

4 METODOLOGIA

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris. Etiam euismod. Fusce facilisis lacinia dui. Suspendisse potenti. In mi erat, cursus id, nonummy sed, ullamcorper eget, sapien. Praesent pretium, magna in eleifend egestas, pede pede pretium lorem, quis consectetur tortor sapien facilisis magna. Mauris quis magna varius nulla scelerisque imperdiet. Aliquam non quam. Aliquam porttitor quam a lacus. Praesent vel arcu ut tortor cursus volutpat. In vitae pede quis diam bibendum placerat. Fusce elementum convallis neque. Sed dolor orci, scelerisque ac, dapibus nec, ultricies ut, mi. Duis nec dui quis leo sagittis commodo.

O autor Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Tabela 2 – Um Exemplo de tabela alinhada que pode ser longa ou curta, conforme padrão IBGE

Nome	Nascimento	Documento
Maria da Silva	11/11/1111	111.111.111-11
Maria da Silva	11/11/1111	111.111.111-11
Maria da Silva	11/11/1111	111.111.111-11

Fonte – Produzido pelos autores

Nota – Esta é uma nota, que diz que os dados são baseados na regressão linear.

Anotações – Uma anotação adicional, seguida de várias outras.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi

ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

4.1 EXEMPLO DE ALGORITMOS E FIGURAS

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Algoritmo 1: Como escrever algoritmos no L^AT_EX2e

Entrada: o proprio texto

Saída: como escrever algoritmos com L^AT_EX2e

início

 inicialização;

repita

 leia o atual;

se entendeu **então**

 vá para o próximo;

 próximo se torna o atual;

fim

senão

 volte ao início da seção;

fim

até fim do texto;

fim

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam

tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Exemplo de alíneas com números:

1. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nunc dictum sed tortor nec viverra.
2. Praesent vitae nulla varius, pulvinar quam at, dapibus nisi. Aenean in commodo tellus. Mauris molestie est sed justo malesuada, quis feugiat tellus venenatis.
3. Praesent quis erat eleifend, lacinia turpis in, tristique tellus. Nunc dictum sed tortor nec viverra.
4. Mauris facilisis odio eu ornare tempor. Nunc dictum sed tortor nec viverra.
5. Curabitur convallis odio at eros consequat pretium.

Etiam euismod. Fusce facilisis lacinia dui. Suspendisse potenti. In mi erat, cursus id, nonummy sed, ullamcorper eget, sapien. Praesent pretium, magna in eleifend egestas, pede pede pretium lorem, quis consectetur tortor sapien facilisis magna. Mauris quis magna varius nulla scelerisque imperdiet. Aliquam non quam. Aliquam porttitor quam a lacus. Praesent vel arcu ut tortor cursus volutpat. In vitae pede quis diam bibendum placerat. Fusce elementum convallis neque. Sed dolor orci, scelerisque ac, dapibus nec, ultricies ut, mi. Duis nec dui quis leo sagittis commodo.

Tabela 3 – Internal exon scores

Ranking	Exon Coverage	Splice Site Support
E1	Complete coverage by a single transcript	Both splice sites
E2	Complete coverage by more than a single transcript	Both splice sites
E3	Partial coverage	Both splice sites
E4	Partial coverage	One splice site
E5	Complete or partial coverage	No splice sites
E6	No coverage	No splice sites

Fonte – os autores

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris. Referenciando a Tabela 3 Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec

aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Figuras podem ser criadas diretamente em LaTeX, como o exemplo da.

Ou então figuras podem ser incorporadas de arquivos externos, como é o caso da. Se a figura que ser incluída se tratar de um diagrama, um gráfico ou uma ilustração que você mesmo produza, priorize o uso de imagens vetoriais no formato PDF. Com isso, o tamanho do arquivo final do trabalho será menor, e as imagens terão uma apresentação melhor, principalmente quando impressas, uma vez que imagens vetoriais são perfeitamente escaláveis para qualquer dimensão. Nesse caso, se for utilizar o Microsoft Excel para produzir gráficos, ou o Microsoft Word para produzir ilustrações, exporte-os como PDF e os incorpore ao documento conforme o exemplo abaixo. No entanto, para manter a coerência no uso de software livre (já que você está usando LaTeX e abnTeX), teste a ferramenta InkScape, ao CorelDraw ou ao Adobe Illustrator. De todo modo, caso não seja possível utilizar arquivos de imagens como PDF, utilize qualquer outro formato, como JPEG, GIF, BMP, etc. Nesse caso, você pode tentar aprimorar as imagens incorporadas com o software livre Gimp. Ele é uma alternativa livre ao Adobe Photoshop.

4.2 USANDO FÓRMULAS MATEMÁTICAS

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

$$x = a_0 + \frac{1}{a_1 + \frac{1}{a_2 + \frac{1}{a_3 + \frac{1}{a_4}}}} \quad (4.1)$$

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt

tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

$$k_{n+1} = n^2 + k_n^2 - k_{n-1} \quad (4.2)$$

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

$$\cos(2\theta) = \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \quad (4.3)$$

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

$$A_{m,n} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1} & a_{m,2} & \cdots & a_{m,n} \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

$$f(n) = \begin{cases} n/2 & \text{if } n \text{ is even} \\ -(n+1)/2 & \text{if } n \text{ is odd} \end{cases} \quad (4.5)$$

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

4.3 USANDO ALGORITMOS

Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Donec odio elit, dictum in, hendrerit sit amet, egestas sed, leo. Praesent feugiat sapien aliquet odio. Integer vitae justo. Aliquam vestibulum fringilla lorem. Sed neque lectus, consectetuer at, consectetuer sed, eleifend ac, lectus. Nulla facilisi. Pellentesque eget lectus. Proin eu metus. Sed porttitor. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse eu lectus. Ut mi mi, lacinia sit amet, placerat et, mollis vitae, dui. Sed ante tellus, tristique ut, iaculis eu, malesuada ac, dui. Mauris nibh leo, facilisis non, adipiscing quis, ultrices a, dui.

Morbi luctus, wisi viverra faucibus pretium, nibh est placerat odio, nec commodo wisi enim eget quam. Quisque libero justo, consectetuer a, feugiat vitae, porttitor eu, libero. Suspendisse sed mauris vitae elit sollicitudin malesuada. Maecenas ultricies eros sit amet ante. Ut venenatis velit. Maecenas sed mi eget dui varius euismod. Phasellus aliquet volutpat odio. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Pellentesque sit amet pede ac sem eleifend consectetuer. Nullam elementum, urna vel imperdiet sodales, elit ipsum pharetra ligula, ac pretium ante justo a nulla. Curabitur tristique arcu eu

Algoritmo 2: Algoritmo de Otimização por Colônia de Formiga

Entrada: Entrada do Algoritmo

Saída: Saída do Algoritmo

início

Atribua os valores dos parâmetros;

Inicialize as trilhas de feromônios;

enquanto não atingir o critério de parada **faça**

para cada formiga **faça**

Construa as Soluções;

fim

Aplique Busca Local (Opcional);

Atualize o Feromônio;

fim

fim

metus. Vestibulum lectus. Proin mauris. Proin eu nunc eu urna hendrerit faucibus. Aliquam auctor, pede consequat laoreet varius, eros tellus scelerisque quam, pellentesque hendrerit ipsum dolor sed augue. Nulla nec lacus.

4.4 USANDO CÓDIGO-FONTE

Suspendisse vitae elit. Aliquam arcu neque, ornare in, ullamcorper quis, commodo eu, libero. Fusce sagittis erat at erat tristique mollis. Maecenas sapien libero, molestie et, lobortis in, sodales eget, dui. Morbi ultrices rutrum lorem. Nam elementum ullamcorper leo. Morbi dui. Aliquam sagittis. Nunc placerat. Pellentesque tristique sodales est. Maecenas imperdiet lacinia velit. Cras non urna. Morbi eros pede, suscipit ac, varius vel, egestas non, eros. Praesent malesuada, diam id pretium elementum, eros sem dictum tortor, vel consectetur odio sem sed wisi.

Código-fonte 1 – Hello World em C++

```

1 #include <iostream>
2 using namespace std;
3 int main() {
4     cout<<"Hello World!"<<endl;
5     system("pause");

```

6 } |

Sed feugiat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Ut pellentesque augue sed urna. Vestibulum diam eros, fringilla et, consectetur eu, nonummy id, sapien. Nullam at lectus. In sagittis ultrices mauris. Curabitur malesuada erat sit amet massa. Fusce blandit. Aliquam erat volutpat. Aliquam euismod. Aenean vel lectus. Nunc imperdiet justo nec dolor.

Código-fonte 2 – Hello World em Java

```

1 public class HelloWorld {
2     public static void main(String[] args) {
3         System.out.println("Hello World!");
4     }
5 }
```

Sed feugiat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Ut pellentesque augue sed urna. Vestibulum diam eros, fringilla et, consectetur eu, nonummy id, sapien. Nullam at lectus. In sagittis ultrices mauris. Curabitur malesuada erat sit amet massa. Fusce blandit. Aliquam erat volutpat. Aliquam euismod. Aenean vel lectus. Nunc imperdiet justo nec dolor.

4.5 USANDO TEOREMAS, PROPOSIÇÕES, ETC

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nunc dictum sed tortor nec viverra. consectetur adipiscing elit. Nunc dictum sed tortor nec viverra.

Teorema 4.5.1 (Pitágoras) *Em todo triângulo retângulo o quadrado do comprimento da hipotenusa é igual a soma dos quadrados dos comprimentos dos catetos.*

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nunc dictum sed tortor nec viverra. consectetur adipiscing elit. Nunc dictum sed tortor nec viverra.

Teorema 4.5.2 (Fermat) *Não existem inteiros $n > 2$, e x, y, z tais que $x^n + y^n = z$*

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nunc dictum sed tortor nec viverra. consectetur adipiscing elit. Nunc dictum sed tortor nec viverra.

Proposição 4.5.3 *Para demonstrar o Teorema de Pitágoras...*

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nunc dictum sed tortor nec viverra. consectetur adipiscing elit. Nunc dictum sed tortor nec viverra.

Exemplo 1 *Este é um exemplo do uso do ambiente `exe` definido acima.*

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nunc dictum sed tortor nec viverra. consectetur adipiscing elit. Nunc dictum sed tortor nec viverra.

Definição 4.5.1 *Definimos o produto de ...*

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nunc dictum sed tortor nec viverra. consectetur adipiscing elit. Nunc dictum sed tortor nec viverra.

4.6 USANDO QUESTÕES

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nunc dictum sed tortor nec viverra. consectetur adipiscing elit. Nunc dictum sed tortor nec viverra.

Questão 1. Esta é a primeira questão com alguns itens:

- (a) Este é o primeiro item
- (b) Segundo item

Questão 2. Esta é a segunda questão:

- (a) Este é o primeiro item
- (b) Segundo item

Questão 3. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nunc dictum sed tortor nec viverra. consectetur adipiscing elit. Nunc dictum sed tortor nec viverra.

- (a) consectetur
- (b) adipiscing
- (c) Nunc
- (d) dictum

4.7 CITAÇÕES

4.7.1 Documentos com três autores

Quando houver três autores na citação, apresentam-se os três, separados por ponto e vírgula, caso estes estejam após o texto. Se os autores estiverem incluídos no texto, devem ser separados por vírgula e pela conjunção "e".

4.7.2 Documentos com mais de três autores

Havendo mais de três autores, indica-se o primeiro seguido da expressão *et al.* (do latim *et alli*, que significa e outros), do ano e da página.

4.7.3 Documentos de vários autores

Havendo citações indiretas de diversos documentos de vários autores, mencionados simultaneamente e que expressam a mesma ideia, separam-se os autores por ponto e vírgula, em ordem alfabética.

4.8 NOTAS DE RODAPÉ

Deve-se utilizar o sistema autor-data para as citações no texto e o numérico para notas explicativas¹. As notas de rodapé podem e devem ser alinhadas, a partir da segunda linha da mesma nota, abaixo da primeira letra da primeira palavra, de forma a destacar o expoente² e sem espaço entre elas e com fonte menor (tamanho 10).

¹ Veja - se como exemplo desse tipo de abordagem o estudo de Netzer (1976)

² Encontramos esse tipo de perspectiva na 2^a parte do verbete referido na nota anterior, em grande parte do estudo de Rahner (1962).

5 RESULTADOS

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

5.1 RESULTADOS DO EXPERIMENTO A

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

5.2 RESULTADOS DO EXPERIMENTO B

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris. Nullam eleifend justo in nisl. In hac habitasse platea dictumst. Morbi nonummy. Aliquam ut felis. In velit leo, dictum vitae, posuere id, vulputate nec, ante. Maecenas vitae pede nec dui dignissim suscipit. Morbi magna. Vestibulum id purus eget velit laoreet laoreet. Praesent sed leo vel nibh convallis blandit. Ut rutrum. Donec nibh. Donec interdum. Fusce sed pede sit amet elit rhoncus ultrices. Nullam at enim vitae pede vehicula iaculis.

6.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

6.2 LIMITAÇÕES

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

6.3 TRABALHOS FUTUROS

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

REFERÊNCIAS

- ABDALA, D. D. **Primitivas Gráficas 2D**. [2014?]. 37 slides, color. Disponível em: <<https://www.slideserve.com/vera/efficient-compute-shader-programming>>. Acesso em: 16 nov. 2021.
- AHN, S. H. **Homogeneous Coordinates**. Disponível em: <http://www.songho.ca/math/>. Acesso em: 04 nov. 2021.
- AHN, S. H. **OpenGL**. Disponível em: <http://www.songho.ca/opengl/index.html>. Acesso em: 04 nov. 2021.
- ARMSTRONG, M. S. Game engine review. **NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION**, 2013.
- ARNAU, J.-M.; PARCERISA, J.-M.; XEKALAKIS, P. Eliminating redundant fragment shader executions on a mobile gpu via hardware memoization. In: **2014 ACM/IEEE 41st International Symposium on Computer Architecture (ISCA)**. [S.l.: s.n.], 2014.
- BAILEY, M.; CUNNINGHAM, S. A hands-on environment for teaching gpu programming. In: **Proceedings of the 38th SIGCSE Technical Symposium on Computer Science Education**. [S.l.: s.n.], 2007.
- BARCZAK, A.; WOŹNIAK, H. Comparative study on game engines. **STUDIA INFORMATICA**, 2019.
- BASECOLOR QS. Disponível em: <https://docs.unrealengine.com/4.27/Images/RenderingAndGraphics/Materials/PhysicallyBased/BaseColor_QS.webp>. Acesso em: 11 nov. 2021.
- BELAIR, F.; LOVATO, N. **outline3D**. Disponível em: <https://github.com/GDQuest/godot-shaders/blob/master/godot/Shaders/outline3D.shader>. Acesso em: 09 nov. 2021.
- BILODEAU, B. **Efficient Compute Shader Programming**. Uberlândia: Facom/Ufu, 2019. 74 slides, color. Disponível em: <http://www.facom.ufu.br/~abdala/GBC204/03_primitivas2D.pdf>. Acesso em: 31 out. 2021.
- BPQS 6 Step 4. Disponível em: <https://docs.unrealengine.com/4.27/Images/ProgrammingAndScripting/Blueprints/QuickStart/BPQS_6_Step4.png>. Acesso em: 11 nov. 2021.
- CHRISTOPOULOU, E.; XINO GALOS, S. Overview and comparative analysis of game engines for desktop and mobile devices. **International Journal of Serious Games**, 2017.
- COOKSON, A.; DOWLINGSOKA, R.; CRUMPLER, C. **Unreal Engine 4 Game Development in 24 Hours, Sams Teach Yourself**. Indianapolis: Sams Publishing, 2016.
- COORDINATE Systems. Disponível em: <https://learnopengl.com/img/getting-started/coordinate_systems.png>. Acesso em: 05 nov. 2021.
- COSTA, D. P.; GOMES, F. F. B.; DUARTE, R. Estudo comparativo entre as game engines unity e ogre. **Revista Computação Aplicada**, 2016.
- CRAWFORD, L.; O'BOYLE, M. A cross-platform evaluation of graphics shader compiler optimization. In: **2018 IEEE International Symposium on Performance Analysis of Systems and Software (ISPASS)**. [S.l.: s.n.], 2018.

HAAS, J. K. **A History of the Unity Game Engine**. 44 p. Monografia (Graduação) — Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA, Estados Unidos, 2014.

HE, Y.; FOLEY, T.; TATARCHUK, N.; FATAHALIAN, K. A system for rapid, automatic shader level-of-detail. **ACM Trans. Graph.**, 2015.

HOLOGRAM planet. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=F0CWzpYY68A&t=2s>>. Acesso em: 29 out. 2021.

IBM CGA graphics card. Disponível em: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/55/IBM_Color_Graphics_Adapter.jpg>. Acesso em: 26 out. 2021.

JENSEN, P. D. E.; FRANCIS, N.; LARSEN, B. D.; CHRISTENSEN, N. J. Interactive shader development. In: **Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH Symposium on Video Games**. [S.l.: s.n.], 2007.

KL_NVIDIA_GEFORCE_256.JPG. Disponível em: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c1/KL_NVIDIA_Geforce_256.jpg>. Acesso em: 27 out. 2021.

LEXT, J.; ASSARSSON, U.; MOLLER, T. A benchmark for animated ray tracing. **IEEE Computer Graphics and Applications**, 2001.

LUTEN, E. **OpenGLBook.com**. Disponível em: <https://openglbook.com/the-book.html>. Acesso em: 25 out. 2021.

MANZUR, A.; MARQUES, G. **Godot Engine Game Development in 24 Hours, Sams Teach Yourself: The Official Guide to Godot 3.0**. Indianapolis: Sams Publishing, 2018.

MESSAOUDI, F.; SIMON, G.; KSENTINI, A. Dissecting games engines: The case of unity3d. In: **2015 International Workshop on Network and Systems Support for Games (NetGames)**. [S.l.: s.n.], 2015.

MICHAŁ, T. Comparison of methods and tools for generating levels of details of 3d models for popular game engines. **STUDIA INFORMATICA**, 2020.

MICROSOFT. **Compare the OpenGL ES 2.0 shader pipeline to Direct3D**. Disponível em: <<https://docs.microsoft.com/en-us/windows/uwp/gaming/change-your-shader-loading-code>>. Acesso em: 07 nov. 2021.

MONTENEGRO, A. **Computação Gráfica I**. Niterói: Instituto de computação UFF, [2017?]. 99 slides, color. Disponível em: <[http://www.ic.uff.br/~anselmo/cursos/CGI/slidesGrad/CG_aula4\(introducaoOpenGL\).pdf](http://www.ic.uff.br/~anselmo/cursos/CGI/slidesGrad/CG_aula4(introducaoOpenGL).pdf)>. Acesso em: 02 nov. 2021.

NAVARRO, A.; PRADILLA, J.; RIOS, O. Open source 3d game engines for serious games modeling. In: _____. [S.l.]: InTech, 2012. cap. 6.

NUSRAT, F.; HASSAN, F.; ZHONG, H.; WANG, X. How developers optimize virtual reality applications: A study of optimization commits in open source unity projects. In: **2021 IEEE/ACM 43rd International Conference on Software Engineering (ICSE)**. [S.l.: s.n.], 2021.

NVIDIA. **Vertex Shaders**. Disponível em: <<https://www.nvidia.com/en-us/drivers/feature-vertexshader/>>. Acesso em: 12 nov. 2021.

NVIDIA. **Vertex Shaders**. Disponível em: <<https://www.nvidia.com/en-us/drivers/feature-pixelshader/>>. Acesso em: 12 nov. 2021.

REHFELD, S.; TRAMBEREND, H.; LATOSCHIK, M. E. Profiling and benchmarking event-and message-passing-based asynchronous realtime interactive systems. In: **Proceedings of the 20th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology**. [S.l.: s.n.], 2014.

RENDERING Pipeline. Disponível em: <https://miro.medium.com/max/700/1*_z7Vbb0msvXsUFq3sSMZAg.png>. Acesso em: 12 nov. 2021.

ROST, R. J. **OpenGL Shading Language**. Boston: Addison Wesley, 2006.

SHEA, R.; LIU, J. On gpu pass-through performance for cloud gaming: Experiments and analysis. In: **2013 12th Annual Workshop on Network and Systems Support for Games (NetGames)**. [S.l.: s.n.], 2013.

SINGHAL, N.; PARK, I. K.; CHO, S. Implementation and optimization of image processing algorithms on handheld gpu. In: **Proceedings of 2010 IEEE 17th International Conference on Image Processing**. Hong Kong: [s.n.], 2010.

SINGHAL, N.; YOO, J. W.; CHOI, H. Y.; PARK, I. K. Design and optimization of image processing algorithms on mobile gpu. In: **ACM SIGGRAPH 2011 Posters**. [S.l.: s.n.], 2011.

SKETCHPAD. Disponível em: <<http://i0.wp.com/www.designleap.org/wp-content/uploads/2014/06/Sketchpad-Ivan-Sutherland-1963.jpg?resize=572%2C572>>. Acesso em: 26 out. 2021.

SKOP, P. Comparison of performance of game engines across various platforms. **Journal of Computer Sciences Institute**, 2018.

ŠMÍD, A. Comparison of unity and unreal engine. **Czech Technical University in Prague**, 2017.

STENCIL Buffers. Disponível em: <<https://www.ronja-tutorials.com/assets/images/posts/022/Result.gif>>. Acesso em: 01 nov. 2021.

SUB Surface Scattering Example. Disponível em: <<http://www.mrbluesummers.com/wp-content/uploads/2010/07/Sub-Surface-Scattering-Example.jpg>>. Acesso em: 11 nov. 2021.

TECHTARGET. **GPGPU (general purpose graphics processing unit)**. Disponível em: <<https://whatis.techtarget.com/definition/GPGPU-general-purpose-graphics-processing-unit>>. Acesso em: 08 nov. 2021.

TESSELATION Level Table. Disponível em: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fc/Tessellation_Level_Table.png>. Acesso em: 08 nov. 2021.

VARCHOLIK, P. **Real-Time 3D Rendering with DirectX and HLSL**. Boston: Addison-Wesley Professional, 2014.

VIEIRA, T. **OpenGL**. Maceió: Instituto de computação UFAL, [2017?]. 9 slides, color. Disponível em: <<https://ic.ufal.br/professor/thales/OpenGL.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2021.

VISIONTEK_GEFORCE_256.JPG. Disponível em: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e1/VisionTek_GeForce_256.jpg>. Acesso em: 27 out. 2021.

VIVO, P. G.; LOWE, J. **The Book of Shaders**. Disponível em: <https://thebookofshaders.com/>. Acesso em: 25 out. 2021.

WANG, R.; YANG, X.; YUAN, Y.; CHEN, W.; BALA, K.; BAO, H. Automatic shader simplification using surface signal approximation. **ACM Trans. Graph.**, 2014.

WOLFENSTEIN VS DOOM – The battle of the first person shooters! - Retro Refurbs. Disponível em: <<https://www.retrorefurbs.com/wolfenstein-vs-doom-the-battle-of-the-first-person-shooters/>>. Acesso em: 26 out. 2021.

Z-BUFFERING. Disponível em: <<https://larranaga.github.io/Blog/imagenes/z-buffer.png>>. Acesso em: 01 nov. 2021.

ZHANG, Z.; LUO, X.; VACA, M. G. S.; CASTRO, D. A. E.; CHEN, Y. Vegetation rendering optimization for virtual reality systems. In: **2017 International Conference on Virtual Reality and Visualization (ICVRV)**. [S.l.: s.n.], 2017.

ZUCCONI, A.; LAMMERS, K. **Unity 5.x Shaders and Effects Cookbook**. Birmingham: Packt Publishing, 2016.

ŻUKOWSKI, H. Comparison of 3d games' efficiency with use of cryengine and unity game engines. **Journal of Computer Sciences Institute**, 2019.

GLOSSÁRIO

B

Benchmark: ato de executar um programa, um conjunto de programas ou outras operações, a fim de avaliar o desempenho relativo, normalmente executando uma série de testes padrão e ensaios.

L

Light Baking: Processo de pré-cálculo de realces e sombras para cenas estáticas que cria a ilusão de iluminação em tempo real..

M

Multithread: capacidade que o sistema operacional possui de executar vários conjuntos de tarefas simultaneamente sem que uma interfira na outra.

R

Realidade Aumentada: integração de elementos virtuais a visualizações do mundo real normalmente através de uma câmera.

Realidade Virtual: ambiente gerado por computador com cenas e objetos que parecem reais, fazendo com que os usuários se sintam imersos nessa realidade.

S

Scripts: programas escritos para um sistema de tempo de execução especial que automatiza a execução de tarefas.

V

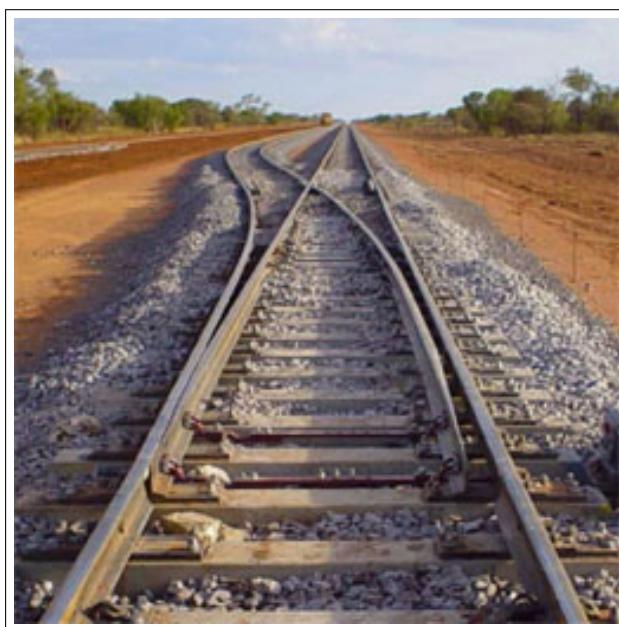
Viewing Frustum: região do espaço no mundo modelado que pode aparecer na tela; campo de visão de um sistema de câmera virtual em perspectiva.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Coordenadas Homogêneas

As coordenadas homogêneas foram criadas para solucionar um problema presente na geometria do espaço Euclidiano, onde duas linhas paralelas no mesmo plano nunca poderão se cruzar. Isso só é interessante até o ponto em que precisamos definir o comportamento geométrico no espaço de projeção. Por exemplo na Figura 19 os trilhos se aproximam até que convergem no horizonte (um ponto no infinito no espaço Euclidiano) distante do observador (AHN, 2012).

Figura 19 – A ferrovia fica mais estreita e se cruza no horizonte.



Fonte – <<http://www.songho.ca/math/homogeneous/homogeneous.html>>

Quando um ponto vai para o infinito ele é representado pelas coordenadas (∞, ∞) e isso se torna uma informação inexpressiva. As linhas paralelas deveriam se cruzar no espaço de projeção mas não conseguem no espaço Euclidiano. Para resolver esse problema os matemáticos criaram as coordenadas homogêneas. O motivo de serem chamadas "homogêneas" se dá devido ao fato de que ao convertê-las para coordenadas cartesianas, percebe-se a relação de proporcionalidade explicitada na equação A.5, onde os diferentes pontos representam o mesmo ponto no espaço Euclidiano, ou seja, coordenadas homogêneas são invariantes à escala (AHN, 2012).

Coordenadas homogêneas são utilizadas para fazer a representação de coordenadas N-dimensionais utilizando N+1 números. Então para transformar um ponto de duas dimensões no sistema de coordenadas cartesianas (X, Y) basta simplesmente adicionar uma variável, portanto

(x, y, w) . A correlação matemática entre coordenadas cartesianas e coordenadas homogêneas é exibida abaixo na equação A.1. Utilizando essa lógica fica claro que se um ponto $(1, 2)$, se move em direção ao infinito, se tornando (∞, ∞) , ele passa a ser representado por $(1, 2, 0)$ em coordenadas homogêneas, conforme a equação A.2 (AHN, 2012).

$$X = \frac{x}{w} \quad (A.1)$$

$$Y = \frac{y}{w}$$

$$(1, 2, 0) \rightarrow \left(\frac{1}{0}, \frac{2}{0} \right) \approx (\infty, \infty) \quad (A.2)$$

Para provar matematicamente que duas retas paralelas se cruzarão, basta analisar a equação A.3 considerando a geometria Euclidiana. Nesse caso não há solução pois $C \neq D$, apenas se as duas linhas fossem idênticas (sobrepostas) seria possível afirmar que $C = D$. Para que o sistema possua solução é preciso reescrevê-lo como na equação A.4, trocando x e y por suas respectivas coordenadas homogêneas. Então como $(C - D)w = 0 \therefore w = 0$, prova-se que as duas linhas paralelas são capazes de se cruzarem em $(x, y, 0)$ que é um ponto no infinito (AHN, 2012).

$$\begin{cases} Ax + By + C = 0 \\ Ax + By + D = 0 \end{cases} \quad (A.3)$$

$$\begin{cases} A\frac{x}{w} + B\frac{y}{w} + C = 0 \\ A\frac{x}{w} + B\frac{y}{w} + D = 0 \end{cases} \implies \begin{cases} Ax + By + Cw = 0 \\ Ax + By + Dw = 0 \end{cases} \quad (A.4)$$

$$\begin{aligned}
 (1,2,3) &\rightarrow \left(\frac{1}{3}, \frac{2}{3} \right) \\
 (2,4,6) &\rightarrow \left(\frac{2}{6}, \frac{4}{6} \right) = \left(\frac{1}{3}, \frac{2}{3} \right) \\
 (4,8,12) &\rightarrow \left(\frac{4}{12}, \frac{8}{12} \right) = \left(\frac{1}{3}, \frac{2}{3} \right) \\
 &\vdots \qquad \rightarrow \qquad \vdots \\
 (1a,2a,3a) &\rightarrow \left(\frac{1a}{3a}, \frac{2a}{3a} \right) = \left(\frac{1}{3}, \frac{2}{3} \right)
 \end{aligned} \tag{A.5}$$

APÊNDICE B – Código-fonte do shader de contorno em HLSL

Código-fonte 3 – Transcrição do shader de contorno de GLSL para HLSL

```

1   Shader "Unlit/SimpleOutline"
2   {
3       Properties
4       {
5           _OutlineColor("Outline Color", Color) =
6               (1,1,1,1)
7           _OutlineWidth("Outline Width", Float) = 0.5
8       }
9
10      SubShader
11      {
12          Tags {"Queue"="Transparent" "RenderType"=""
13              Opaque" }
14          Cull Front
15          Blend SrcAlpha OneMinusSrcAlpha
16
17          Pass
18          {
19              CGPROGRAM
20              #pragma vertex vert
21              #pragma fragment frag
22              #include "UnityCG.cginc"
23
24              struct appdata {
25                  float4 vertex : POSITION;
26              };
27
28              struct v2f {
29                  float4 vertex : SV_POSITION;

```

```
28     };
```

```
29
```

```
30     float4 _OutlineColor;
```

```
31     float _OutlineWidth;
```

```
32
```

```
33     v2f vert (appdata v) {
```

```
34         v2f o;
```

```
35         o.vertex = UnityObjectToClipPos(v.
```

```
36             vertex);
```

```
37         o.vertex.xyz *= _OutlineWidth;
```

```
38         return o;
```

```
39     }
```

```
40
```

```
41     fixed4 frag (v2f i) : SV_Target {
```

```
42         return _OutlineColor;
```

```
43     }
```

```
44     ENDCG
```

```
45 }
```

```
46 }
```

ANEXOS

ANEXO A – Código-fonte do shader de contorno em GLSL

Código-fonte 4 – Shader GLSL 3D simples para efeito de contorno

```
1 shader_type spatial;  
2  
3 render_mode unshaded, cull_front, depth_draw_always;  
4  
5 uniform float thickness = 0.1; // espessura do contorno  
6 uniform vec4 outline_color : hint_color = vec4(1.0); // cor  
    do contorno  
7  
8 void vertex() {  
9     /* desloca cada vertice na direcao de sua normal vezes  
     o fator de espessura */  
10    VERTEX += NORMAL * thickness;  
11}  
12  
13 void fragment() {  
14     /* aplica a cor em cada pixel */  
15     ALBEDO = outline_color.rgb;  
16     if(outline_color.a < 1.0) ALPHA = outline_color.a;  
17 }
```