

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Igor Batista Fernandes

**Desenvolvimento de uma game engine 2D
multiplataforma utilizando OpenGL e Java**

Uberlândia, Brasil

2018

Igor Batista Fernandes

Desenvolvimento de uma game engine 2D multiplataforma utilizando OpenGL e Java

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Faculdade de Computação da Universidade
Federal de Uberlândia, Minas Gerais, como
requisito exigido parcial à obtenção do grau
de Bacharel em Ciência da Computação.

Uberlândia, Brasil, XX de XX de 2018:

Profa. Maria Adriana Vidigal de Lima
Orientador

Professor

Professor

Uberlândia, Brasil
2018

Resumo

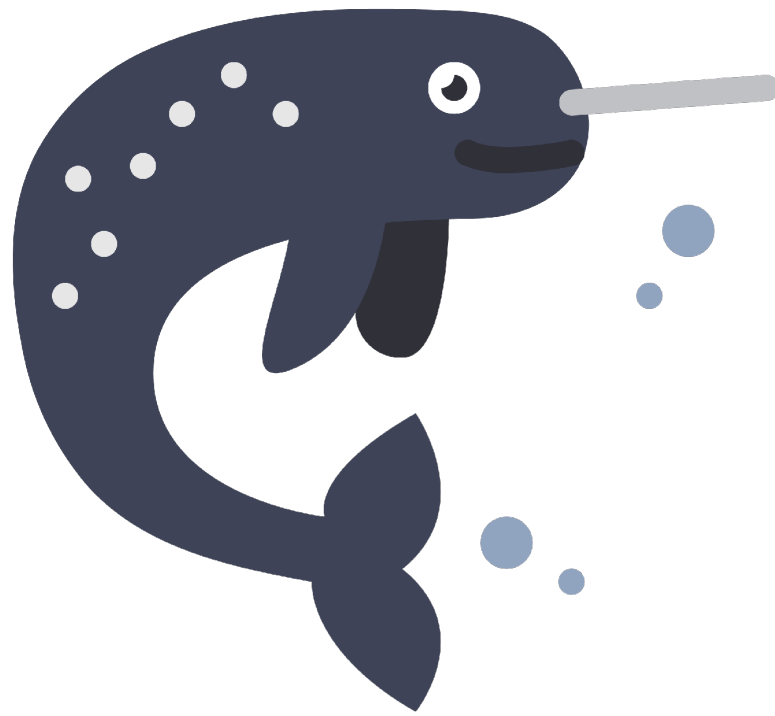
Este trabalho propõe a criação de uma Game Engine multiplataforma para desktop intitulada Narval e a subsequente elaboração de um protótipo de jogo. A implementação de código será realizada na linguagem Java e através da API gráfica OpenGL usando GLFW (OpenGL Frame Work). A elicitação dos requisitos do jogo será documentada em um artefato denominado *Game Design Document* que permite estruturar, sistematizar e organizar o processo de construção. O jogo será elaborado utilizando técnicas de algoritmos procedurais para geração de artes e ambientes, inteligência artificial para o comportamento de Non Playable Characters (NPC) e padrões de projeto aplicados em jogos.

Palavras-chave: Indie Game, Game Design Document, Jogos, Java, OpenGL, Game Engine, Artificial Intelligence

Resumo

This work proposes to develop a multiplatform game engine for desktop entitled Narval and a subsequent game prototype elaboration. The code implementation will be done in Java through the API OpenGL using GLFW (OpenGL Frame Work). The elicitation of requisites for the game will be documented in an artifact called Game Design Document which allows to structure, systematize and organize the process of building a game. The game will be elaborated using techniques of procedural algorithms to generate art and environment, artificial intelligence for Non Playable Characters (NPC) behaviours and design patterns applied to games.

Keywords: Indie Game, Game Design Document, Jogos, Java, OpenGL, Game Engine, Artificial Intelligence



NARVAL

GAME ENGINE

Lista de ilustrações

Figura 1 – Componentes de uma Game Engine. Fonte: (GREGORY, 2009)	19
Figura 2 – Execução do game loop básico ao longo do tempo	20
Figura 3 – Execução do game loop com timestep fixo ao longo do tempo	22
Figura 4 – Execução do game loop com timestep variável ao longo do tempo . . .	23
Figura 5 – Objeto ignorando colisão devido um timestep muito grande	23
Figura 6 – Execução do game loop com timestep semi-fixo ao longo do tempo . . .	24
Figura 7 – Método <code>update</code> com tempo de processamento maior que o Δt	25
Figura 8 – Renderização sem interpolação	26
Figura 9 – Renderização sem interpolação	26
Figura 10 – Etapas do pipeline	30
Figura 11 – Dois triângulos em coordenadas locais normalizadas que juntos formam um quadrado	32
Figura 12 – Resultado obtido com dois shaders simples	34
Figura 13 – Sistema ARGB e RGBA, ambos com canais de 8 bits (1 byte)	40
Figura 14 – Extração do canal verde em um inteiro de 3 bytes	40
Figura 15 – Wrap modes	41
Figura 16 – Ampliação de 32x usando cada tipo de filtro.	41
Figura 17 – Spritesheet com frames de 32x32 pixels	42
Figura 18 – Ordem correta de renderização: do menor y para o maior y	44
Figura 19 – Ordem correta de renderização: do menor y para o maior y conside- rando a caixa base	45
Figura 20 – Componentes do modelo de Phong	45
Figura 21 – Demonstração da luz ambiente com tonalidade alaranjada	46
Figura 22 – Ângulo θ entre raio luminoso e vetor normal da superfície iluminada . .	47
Figura 23 – Resultado da luz difusa usando a textura normal do objeto	48
Figura 24 – Luz especular do ponto de vista do observador	49
Figura 25 – Especialização das classes numa arquitetura baseada em objetos	53
Figura 26 – GameObject composto de vários componentes	54
Figura 27 – Diagrama de classes do sistema entity based	55
Figura 28 – Colisão AABB vs AABB	56
Figura 29 – Processo de transformações de coordenadas até o espaço final da tela. Fonte: (VRIES, 2015)	57
Figura 30 – Jogador caçando um coelho com arco e flecha	75
Figura 31 – Jogador pronto para atacar alvo que ficou preso na armadilha de chão .	76
Figura 32 – Jogador cantando em um vilarejo	77
Figura 33 – Jogador sendo prestigiado após término da música	77

Figura 34 – Esboço do menu para compor músicas	78
--	----

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de valores exemplo para a função de atenuação	50
---	----

Lista de Algoritmos

4.1	Estrutura básica do Game Loop	20
4.2	Game Loop com timestep fixo	22
4.3	Game loop com timestep variável	22
4.4	Game Loop com timestep semi-fixo	24
4.5	Game Loop com timestep semi-fixo e interpolação linear	26
4.6	Inicialização da janela e contexto OpenGL	28
4.7	Inicialização do VBO e VAO	31
4.8	Vertex shader header	33
4.9	Vertex shader simples	33
4.10	Fragment shader simples	33
4.11	Processo de compilação do shader	35
4.12	Processo de criação e link de um programa	35
4.13	Shader class	36
4.14	Inicializando uma textura no OpenGL a partir de um BufferedImage	38
4.15	Função auxiliar createByteBuffer	39
4.16	Vertex shader com animações	42
4.17	Classe Animation	43
4.18	Fragment Shader com luz ambiente	46
4.19	Fragment Shader com luz ambiente e difusa	47
4.20	Fragment Shader com luz ambiente, difusa e atenuação	50
4.21	Classe renderer simples	51
4.22	Demonstração do render	52
4.23	Colisão AABB vs AABB	55
4.24	Função Ortho do GLM	59
4.25	Função Perspective do GLM	59
4.26	Mouse input	60
4.27	Keyboard input	62
4.28	Mouse input	62
4.29	Classe Resource Manager	64
4.30	Leitura do arquivo de áudio	67
4.31	OpenAL Buffers	68
4.32	OpenAL Listener	68
7.1	Árvore de arquivos do projeto	73

Lista de abreviaturas e siglas

GDD	Game Design Document
API	Application Programming Interface
MVC	Model-view-controller
OpenGL	Open Graphics Library
GPU	Graphics Processing Unit
GLFW	Graphics Library Framework
GLSL	OpenGL Shading Language
NPC	Non Playable Character
HUD	Heads-Up Display
FPS	Frames per second
px	Pixel (Unidade de medida)
VBO	Vertex Buffer Object
VAO	Vertex Array Object
AABB	Axis Aligned Bouding Box
NDC	Normalized Device Coordinates
GLM	OpenGL Mathematics Library
IA	Inteligência Artificial
PCM	Pulse-code modulation

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Visão Geral da Proposta	13
1.2	Objetivo	13
1.3	Justificativa e Motivação	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Computação gráfica	15
2.2	OpenGL	15
2.3	Inteligência artificial	15
2.4	Procedural Content Generation	16
2.5	Game Engine	16
3	TRABALHOS CORRELATOS	17
4	ARQUITETURA DE UMA <i>GAME ENGINE</i>	18
4.1	<i>Game Loop</i>	20
4.2	Sistema de atualização	20
4.2.1	Timestep fixo	21
4.2.2	Timestep variável	22
4.2.3	Timestep semi-fixo	24
4.3	Sistema de renderização	25
4.3.1	Interpolação Linear	25
4.4	API gráfica OpenGL	27
4.4.1	Core-profile e Immediate mode	27
4.4.2	State Machine	28
4.4.3	Hello window	28
4.4.4	OpenGL Pipeline	29
4.4.5	Vertex Array Object e Vertex Buffer Object	31
4.4.6	OpenGL Shading Language (GLSL)	32
4.4.7	Vertex e Fragment shader	32
4.4.8	Compilando o shader em um programa	34
4.4.9	Uniforms	35
4.5	Renderer	38
4.5.1	Textura	38
4.5.2	Animações	42
4.5.3	Z-Ordering	44

4.6	Iluminação	45
4.6.1	Ambiente	45
4.6.2	Luz Difusa	46
4.6.3	Vetor Normal	48
4.6.4	Luz Especular	48
4.6.5	Atenuação	49
4.7	Classe Renderer	51
4.8	Arquitetura do Game Object	52
4.8.1	Object Based	52
4.8.2	Component Based	53
4.8.3	Entity Based	54
4.9	Sistema de colisões	55
4.9.1	Colisões do tipo AABB vs AABB	55
4.9.2	jBox2D	56
4.10	Sistema de coordenadas	57
4.10.1	Espaço local	57
4.10.2	Espaço de mundo	58
4.10.3	Espaço de visão	58
4.10.4	Espaço de recorte	58
4.10.5	Projeção	58
4.10.5.1	Projeção ortográfica	58
4.10.5.2	Projeção de perspectiva	59
4.10.6	jBox2D para espaço de mundo	59
4.11	Câmera	60
4.12	Sistema de input	61
4.12.1	GLFW Keyboard	62
4.12.2	GLFW Mouse	62
4.12.3	GLFW Game Control	63
4.13	Gerência de recursos	63
4.13.1	Chunk system	63
4.13.2	Chunk	64
4.13.3	Chunk Manager	64
4.13.4	A classe Resource Manager	64
4.14	Aúdio	67
4.14.1	Integrando o OpenAL	67
5	INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	69
5.1	Utility AI	69
5.1.1	Processo de funcionamento	69
5.2	Pathfinding	70

6	PROCEDURAL CONTENT GENERATION	72
6.1	Random noise	72
6.1.1	Perlin noise	72
6.2	Geração de terrenos	72
6.2.1	Florestas	72
7	DIAGRAMAS E PANORAMA GERAL	73
7.1	Estrutura hierárquica das classes	73
7.2	Estrutura dos arquivos e pacotes	73
8	CRIAÇÃO DE UM PROTÓTIPO	75
8.1	Mecânicas	75
8.1.1	Sistema de caça ativa	75
8.1.2	Sistema de armadilhas	76
8.1.3	Sistema de Combate	76
8.1.4	Sistema de apadrinhamento	76
8.1.5	Cantar músicas	77
8.1.6	Compor músicas	78
8.1.7	Contar histórias	78
8.1.8	Compor histórias	78
8.1.9	Atributos dos vilarejos e cidades	78
8.1.10	Atributos do jogador	78
8.1.11	Domar animais	79
9	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	80
9.1	Protótipo	80
9.2	Otimizações e testes de desempenho	80
10	CONCLUSÃO	81
	REFERÊNCIAS	82

1 Introdução

1.1 Visão Geral da Proposta

Estima-se que o mercado internacional de jogos movimentará aproximadamente 108.9 bilhões de dólares distribuídos entre 2.2 bilhões de jogadores em 2017. Destes, 58% representam os segmentos de PC e consoles ([MCDONALD, 2017](#)). Além de ser uma área comercial lucrativa é também interdisciplinar e aproxima diversos conceitos de Computação, Design gráfico, Música, Artes e outras esferas do conhecimento. Para a elaboração de um projeto bem construído e com alto potencial de sucesso é necessário respeitar as etapas de pré-produção, produção, testes e pós-produção. Ao longo de todas as etapas serão definidas estratégias de implementação em linguagens orientadas a objetos, engenharia de software, padrões de projeto voltados para jogos e metodologias ágeis.

1.2 Objetivo

Este projeto propõe portanto a construção de uma game engine, também traduzida como motor de jogo. Para isso será utilizado a linguagem Java e a biblioteca LWJGL, que incorpora a biblioteca OpenGL, GLFW e outras necessárias ao projeto. Desenvolvida pela Khronos Group a API OpenGL fornece uma ampla gama de soluções para aplicações gráficas, sendo acelerada diretamente em hardware, multiplataforma e robusta. Esses fatores culminaram na sua escolha como o componente responsável pela renderização da engine. Para a parte de áudio será utilizada a biblioteca OpenAL e para o módulo de física a biblioteca jBox2D. Ao fim de seu desenvolvimento será ainda construído um protótipo de jogo para demonstrar as funcionalidades da mesma.

1.3 Justificativa e Motivação

O consumo cada vez maior deste tipo de produto pelo público de todas as idades traz cada vez mais oportunidades de trabalho e aprendizagem. A insuficiência de materiais em língua portuguesa sobre os processos de desenvolvimento e planejamento de jogos é um grande instigador desse trabalho. Neste contexto, esse trabalho aborda todas as etapas pelas quais um jogo passa para torna-se um software que será distribuído e jogado por pessoas do mundo todo. Embora haja diversas opções de Engines no mercado como Unity, Unreal, CryEngine e afins, a grande maioria é de código fechado, o que torna extremamente difícil senão impossível de modificá-la para as necessidades específicas de um projeto. Além deste fato, para comercializar os produtos produzidos nelas é necessário

pagar uma porcentagem da revenda obtida com o produto lançado. Portanto, para este projeto será desenvolvida uma Engine própria, para ter-se uma maior flexibilidade de implementação e para ter uma licença de software próprio.

2 Revisão Bibliográfica

//TODO: Removi a seção Referencial Teórico e transformei as subseções em seções?

2.1 Computação gráfica

Computação gráfica refere-se a tudo que envolve criação ou manipulação de imagens no computador, incluindo animações ([ECK, 2018](#)). Este ramo abrange diversas áreas, tais como: Jogos, Arquitetura, Cinema, Medicina, Artes e várias outras. Toda a computação gráfica atual é baseada em cálculos matemáticos para sintetizar pixels em uma tela 2D. Esse processo se dá através de um pipeline por onde primitivas gráficas são manipuladas para obter o resultado final mostrado na tela do usuário.

2.2 OpenGL

A API (Application Programming Interface) OpenGL fornece um conjunto de funções para manipulações gráficas ([VRIES, 2015](#)), sendo acelerada diretamente em hardware, multiplataforma e robusta. Embora comumente referida como uma API, o OpenGL é, por si só, um conjunto de especificações que determinam o resultado/saída de cada função e como devem ser executadas. Fica a cargo dos fabricantes de placas gráficas implementarem a operação da função, respeitando as especificações do documento desenvolvido e mantido pela Khronos Group ([KHRONOS, 2017](#)).

O OpenGL foi lançado em 1992 como uma resposta direta a necessidade de se padronizar o conjunto de instruções usado em hardwares com interface gráfica. Até setembro de 2006 o padrão foi mantido pela ARB (Architecture Review Board), um conselho formado por empresas de grande renome no ramo como HP, IBM, Intel, NVIDIA, Dell e a própria fundadora, a Silicon Graphics. Em setembro de 2006 o conselho ARB tornou-se o OpenGL Working Group gerido e mantido pelo consórcio Khronos Group para Open Standard APIs([OPENGL, 2017](#)).

2.3 Inteligência artificial

Inteligência Artificial (IA) é um ramo da Ciência da Computação que teoriza e desenvolve sistemas capazes de realizar tarefas onde normalmente requeriam inteligência humana, como processamento de imagens, reconhecimento de fala, tomada de decisões e traduções linguísticas ([DICTIONARY, 2018](#)).

Existe uma distinção importante na IA estudada academicamente e na utilizada em jogos. A pesquisa acadêmica em IA é dividida em dois campos: *strong AI* e *weak AI*. O campo de *strong AI* preocupa-se em tentar criar sistemas que imitam o processo de pensamento humano enquanto o campo de *weak AI* se preocupa em aplicar tecnologias baseadas em IA para solucionar problemas do mundo real. Entretanto, ambos os campos procuram resolver os problemas de maneira ótima, sem preocupar-se com limitações de tempo e hardware (BUCKLAND, 2005).

Em contrapartida, a IA aplicada em jogos preocupa-se não com a solução ótima de um problema, mas com uma solução que seja capaz de dar ao usuário uma experiência agradável respeitando as capacidades do hardware para execução em tempo real.

2.4 Procedural Content Generation

Procedural Content Generation (PCG) é a criação algorítmica de conteúdo para jogos com pouca ou nenhuma interferência do usuário (SHAKER; TOGELIUS; NELSON, 2016). Por conteúdo define-se cenários, mapas, regras de jogo, texturas, itens, música, personagens e qualquer outro elemento que componha o jogo.

Esse processo comumente se dá pela utilização de métodos aleatórios ou pseudo-aleatórios para gerar dados que serão manipulados através de regras e transformados em uma infinidade de elementos do jogo (WIKI, 2018).

2.5 Game Engine

Define-se como game engine um sistema composto de outros sub sistemas cujo trabalho em coesão provém todas as funcionalidades necessárias para o desenvolvimento de um jogo. Uma arquitetura direcionada a dados é o que diferencia uma game engine de um pedaço de software que é o jogo, mas não uma engine (GREGORY, 2009).

Portanto, game engine é um software extensível e pode ser usado como fundação para diferentes tipos e gêneros de jogos sem mudanças maiores. Embora uma game engine ideal deva ser capaz de servir como base para qualquer jogo imaginável, é fato que quanto mais de propósito geral ela se torna, menos ótima ela é para rodar um jogo em determinada plataforma.

3 Trabalhos Correlatos

//TODO: Inserir imagens, citar livros relatos?

No Place for bravery: Jogo estilo Roguelike em pixel art. Atualmente em desenvolvimento pelo estúdio Glitch Factory situado no Distrito Federal.

Eitr: Jogo estilo Action RPG inspirado em Dark souls com uma temática sombria e em pixel art. Atualmente em desenvolvimento pelo estúdio Devolver Digital.

Kingdom: Jogo de plataforma feito em pixel art.

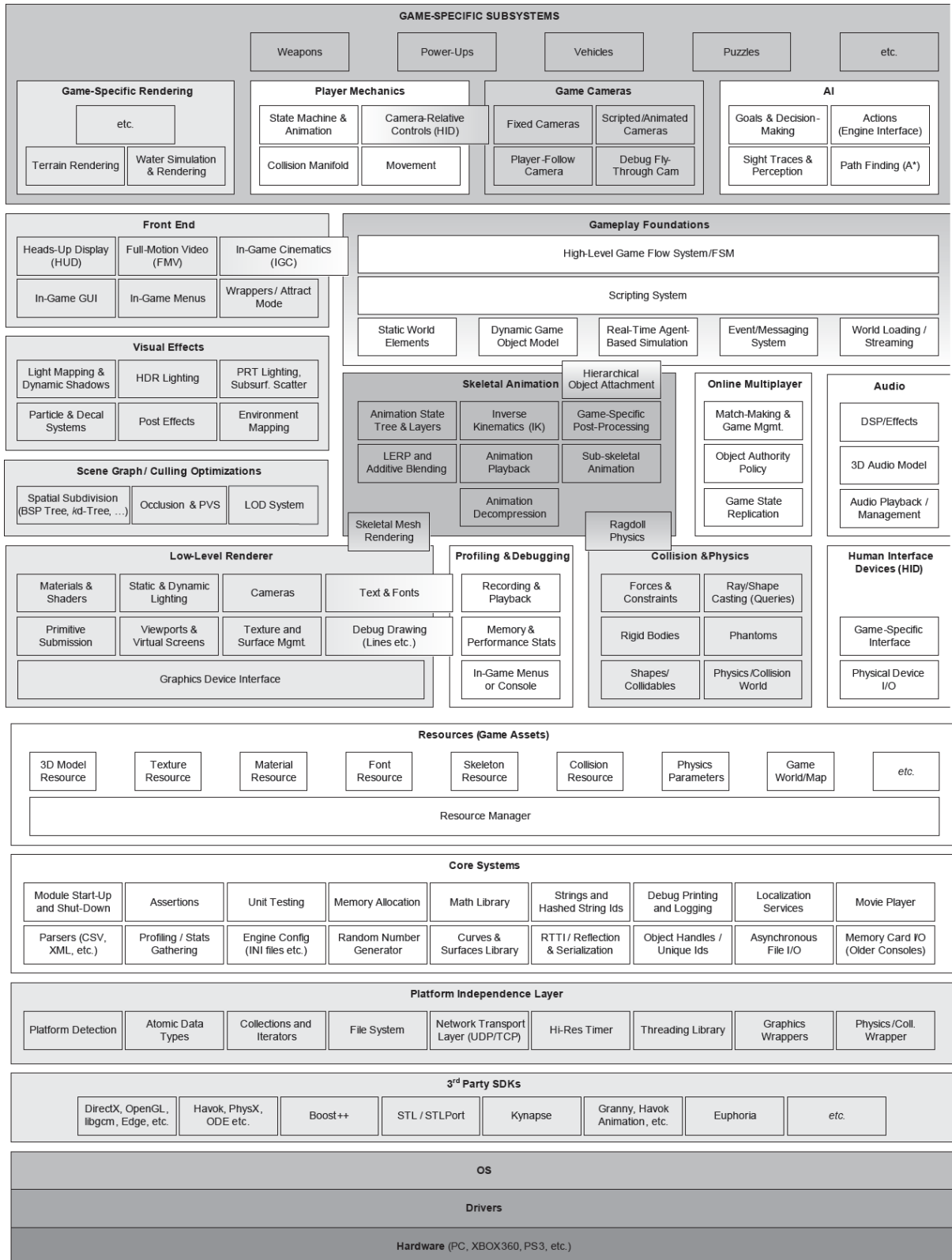
Moon Hunters: Action RPG em pixel art com mundo extenso e procedural, muito similar à proposta deste trabalho em alguns aspectos centrais.

Children of morta: Action RPG em pixel art.

4 Arquitetura de uma *Game Engine*

Game engine (em português literal, motor de jogo) é o termo designado ao motor que está por trás de todo jogo. É neste conjunto de sistemas de simulação em tempo real que todo o ambiente do jogo é construído. As principais funcionalidades providas em uma engine são: um sistema de renderização 2D e/ou 3D, detecção e resolução de colisões, áudio, inteligência artificial e muitos outros. A partir desses elementos há várias ramificações em subsistemas com funcionalidades específicas para satisfazer as necessidades individuais de cada projeto. Uma engine se assemelha em muitas características a um sistema operacional. Ela lida com aspectos de baixo nível da máquina como a *Graphic Processing Unit* (GPU) e é comumente construída utilizando-se o padrão de projeto em camadas. A Figura 1 ilustra um típico diagrama da arquitetura deste sistema e seus componentes.

Alguns exemplos muito populares de engines disponíveis no mercado são a Unity, Unreal Engine, Godot, Construct 2 entre muitas outras. Cada uma apresenta sua própria estrutura e especificidade. Algumas são voltadas para projetos 3D e 2D, outras são otimizadas especificamente para um ambiente 2D e outras 3D. Cabe ao projetista decidir qual desses produtos irá melhor atendê-lo conforme suas necessidades. Para este projeto, a engine utilizada será de desenvolvimento próprio.



//TODO: Substituir essa imagem pelo diagrama de modulos da engine

4.1 Game Loop

Game loop é o núcleo da arquitetura de uma engine. É neste loop que todos os subsistemas da engine são chamados e executados, como a renderização, detecção e resolução de colisões, áudio e muitos outros (GREGORY, 2009). Por se tratar de uma simulação em tempo real, onde a tela inteira deve ser atualizada em uma quantidade muito alta de vezes, é fundamental que tudo seja executado o mais rápido possível e em tempo constante para que o usuário tenha uma experiência fluída e dinâmica.

Portanto, o tempo demanda um papel chave neste sistema e deve ser cuidadosamente levado em consideração para que não haja quaisquer gargalos que deturpem a fluidez e experiência final do usuário. A estrutura mais simples de um game loop é composta como se segue:

```
1 while(true) {  
2     update();  
3     render();  
4 }
```

Algoritmo 4.1 – Estrutura básica do Game Loop

O algoritmo 4.1 sendo executado ao longo do tempo é representado pela Figura 2. Cada execução do método `render` significa o desenho de uma imagem na tela e a quantidade total de imagens desenhadas ao longo de um segundo é representada pela unidade de medida FPS (*Frames per second*). Cada execução do método `update` significa um passo no tempo do jogo (*timestep*). Da mesma forma que o relógio move-se em tiques de um segundo em um segundo, o tempo do jogo avança em tiques de `update` em `update`.

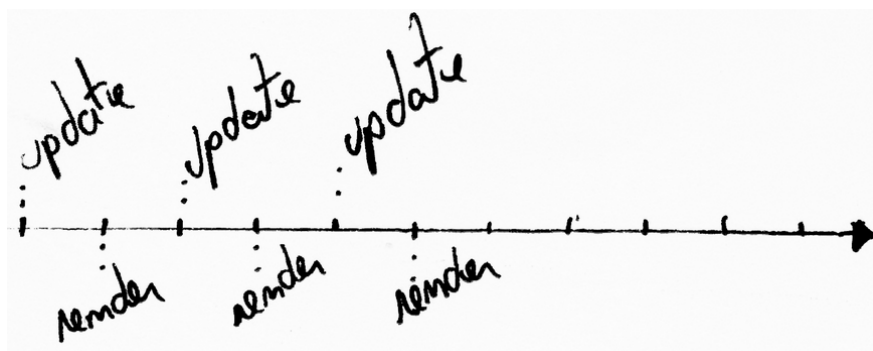


Figura 2 – Execução do game loop básico ao longo do tempo

4.2 Sistema de atualização

O sistema de atualização é responsável por controlar o aspecto lógico da engine. Nele ocorrem todos os cálculos relativos a movimentação dos objetos, colisões, inteligência artificial e outros. Sendo assim, é um sistema composto de outros sistemas, cada um

rodando com uma taxa de atualização específica e não obrigatoriamente atrelados ao FPS.

4.2.1 Timestep fixo

Sistemas de atualização com timestep fixo são aqueles que estavam diretamente atrelados ao FPS e eram utilizados em jogos antigos (GREGORY, 2009). As unidades de medida de tempo eram diretamente atreladas ao FPS tal que, se uma máquina fosse capaz de rodar o jogo a 30 FPS e outra a 60 FPS, na segunda máquina o jogo daria impressão de estar duas vezes mais rápido ou duas vezes mais lento dependendo do valor fixado para o timestep. Isso acontecia por que os jogos eram desenvolvidos para plataformas específicas e, sabendo em qual taxa de FPS o jogo iria rodar, era fácil delimitar um timestep fixo.

Entretanto, conforme as máquinas se tornaram mais potentes e o mercado passou a oferecer mais opções de hardware, logo a indústria estava produzindo jogos para um SO com múltiplas possibilidades de hardware. Essa gama de computadores com capacidades de processamento distintas gerou o problema descrito acima. Por exemplo, seja uma máquina MA capaz de rodar o jogo a 30 FPS e uma máquina MB capaz de rodar a 60 FPS, sendo a máquina MA o alvo do projeto. Se um personagem deveria mover-se a 300 pixels por segundo, logo 10 pixels por frame ($300px/30FPS$), na máquina MB ele estaria se movendo a 600 pixels por segundo pois ao dobrar o FPS dobra-se a quantidade de vezes que o método `update` é chamado, e portanto, o personagem passa a mover-se a 600 pixels por segundo ($60FPS * 10pxp/frame$). Isso acontece por que antigamente o jogo era projetado para rodar numa máquina cuja capacidade de FPS seria x e a variável Δt , que representa o tempo transcorrido entre um frame e outro, seria o inverso de x , ou simplesmente o inverso da frequência, o período $1/x$. A partir disso a posição do objeto era calculada efetuando-se $pos(i) = pos(i - 1) + velPerFrame$ e como Δt é um valor fixo dado por $1/x$ (baseado num FPS de x), tem-se que em um computador mais potente, o tempo transcorrido entre um frame e outro é menor e portanto o período aumenta. Como o valor foi pré-calculado para uma máquina alvo, ele não diminui na máquina mais potente e acaba sendo somado mais vezes, resultando em uma velocidade maior que a originalmente desejada. Esse problema pode ser facilmente representado por uma série.

Em um PC capaz de rodar a 30FPS:

$$\sum_{n=1}^{30} 10px = 300px/s$$

Em um PC capaz de rodar a 60FPS:

$$\sum_{n=1}^{60} 10px = 600px/s$$

Sendo assim, a estrutura do game loop com timestep fixo seria:

```

1 public static final float dt = 1f/30f;
2
3 while(true) {
4     update(dt);
5     render();
6 }

```

Algoritmo 4.2 – Game Loop com timestep fixo

E pode ser representado pela figura:

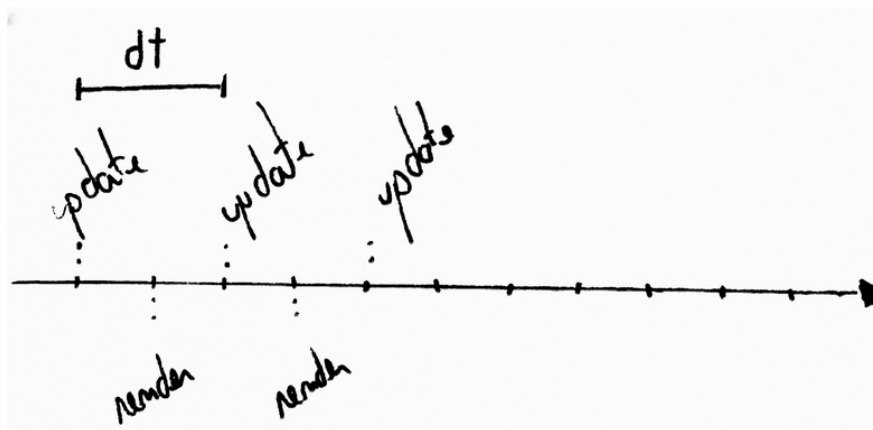


Figura 3 – Execução do game loop com timestep fixo ao longo do tempo

4.2.2 Timestep variável

Para que a taxa de atualização Δt seja dinâmica ao invés de fixa, ela precisa ser independente do FPS. Isso é possível medindo-se quanto tempo transcorre entre um frame e outro. Dessa forma o game loop fica definido como se segue:

```

1 private long lastFrame;
2 private long dt;
3
4 while(true) {
5     long currentFrame = System.nanoTime();
6     dt = currentFrame - lastFrame;
7     lastFrame = currentFrame;
8
9     update(dt);
10    render();
11 }

```

Algoritmo 4.3 – Game loop com timestep variável

Esse código é representado pela figura:

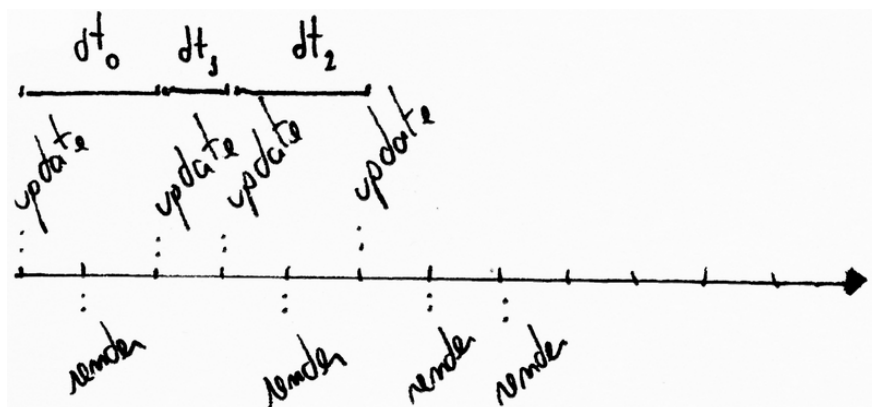


Figura 4 – Execução do game loop com timestep variável ao longo do tempo

Embora tenha-se resolvido o problema anterior de dois computadores com capacidades diferentes de processamento, o sistema ainda não é ideal. A falha está no fato de utilizar o Δt anterior ao frame atual. Se o tempo passado entre um frame e outro for muito grande, ou seja, se houver um pico de performance, será avançado um tempo muito grande e um passo do personagem que era para ser $10pixels$, passa a ser $10px + atraso$. Isso gera um efeito chamado de *stuttering* e é perceptível ao jogador, pois atrapalha a fluidez da movimentação. Isso também traz consequências na lógica do programa. Um objeto que deveria percorrer 10 pixels por timestep, ao percorrer mais em um único timestep poderia, por exemplo, estar ignorando uma colisão que iria ocorrer entre o ponto atual e o próximo.

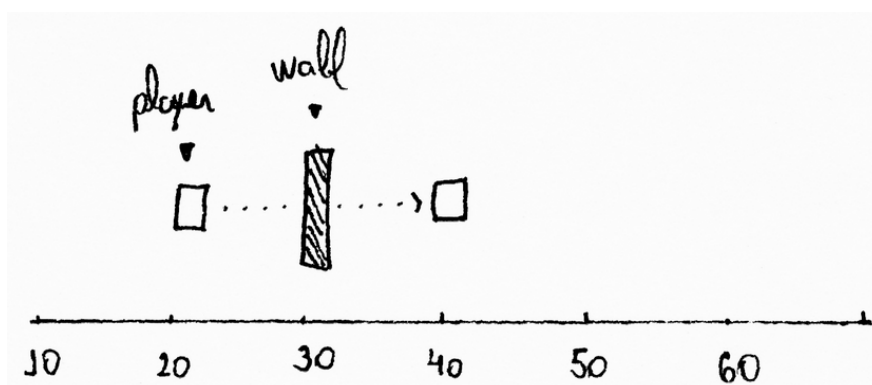


Figura 5 – Objeto ignorando colisão devido um timestep muito grande

Não só isso, mas um timestep variável traz toda uma complicação com a depuração. Ao introduzir um fator não determinístico no processo, pode ser que seja impossível reproduzir um cenário de bug para efetuar seu diagnóstico e correção.

4.2.3 Timestep semi-fixado

Um game loop com timestep semi-fixado tenta trazer o melhor dos dois mundos. Isso é possível usando um Δt fixo para cada chamada do método `update` e, quando o sistema demorar mais que o Δt fixado, faz-se a recuperação do mesmo chamando o método `update` quantas vezes necessário. Isso é fácil visualizar quando demonstrado em código:

```
1 private long lastFrame;  
2 private long accumulator = 0;  
3 private long dt;  
4 public static final long ONE_SECOND_IN_NANOSECONDS = 10^9;  
5 public static final long STEPS_PER_SECOND = 30;  
6 public static final long FIXED_DT = ONE_SECOND_IN_NANO/STEPS_PER_SECOND;  
7  
8 while(true) {  
9     long currentFrame = System.nanoTime();  
10    dt = currentFrame - lastFrame;  
11    lastFrame = currentFrame;  
12    accumulator += dt;  
13  
14    while (accumulator >= FIXED_DT){  
15        update(dt);  
16        accumulator -= FIXED_DT;  
17    }  
18  
19    render();  
20 }
```

Algoritmo 4.4 – Game Loop com timestep semi-fixado

É importante ter cuidado com o valor escolhido para o `FIXED_DT` (timestep). Se o timestep for menor que o tempo que se leva para processar o método `update` o sistema nunca irá recuperar seu atraso, tendo um acumulador que sempre cresce e nunca fica próximo de zerar (NYSTROM, 2014). O sistema de timestep semi-fixado é demonstrado pela ilustração:

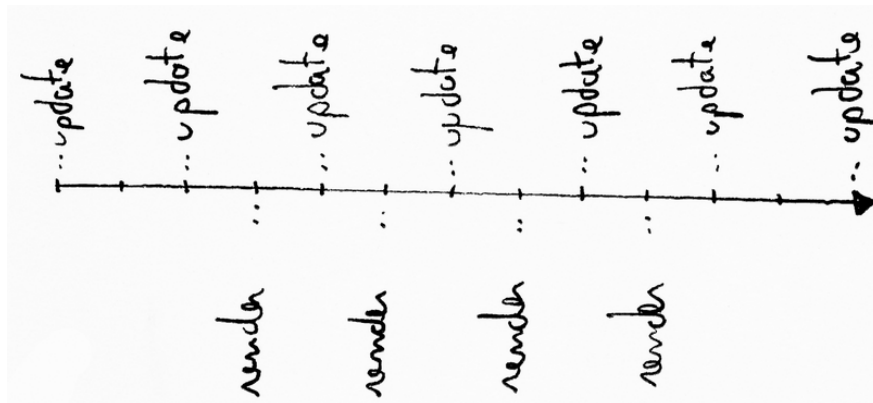


Figura 6 – Execução do game loop com timestep semi-fixado ao longo do tempo

O problema em que o processamento do método `update` é maior que o Δt é mos-

trado na figura seguinte. Note que o valor de dt_0 é maior que o Δt fixado e o sistema só tende a piorar ao longo do tempo, acumulando cada vez mais atraso nos valores de dt e nunca se recuperando.

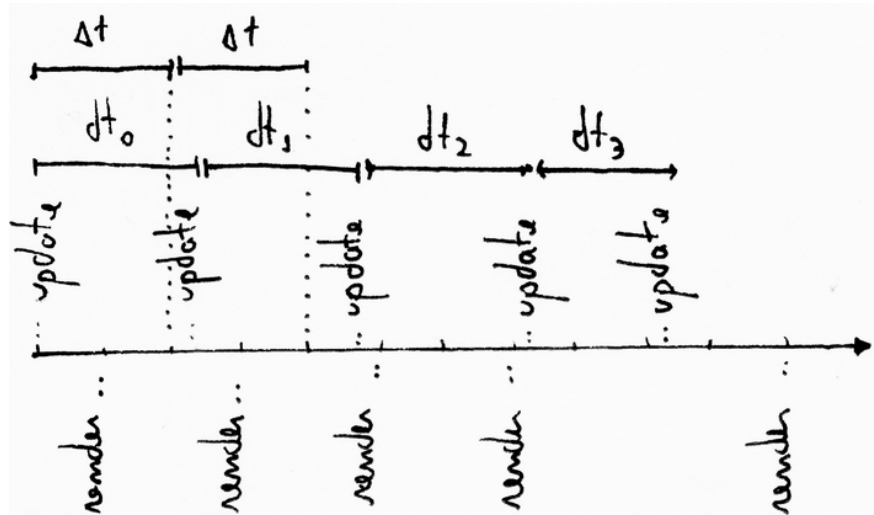


Figura 7 – Método `update` com tempo de processamento maior que o Δt

4.3 Sistema de renderização

É neste sistema que todos os objetos visíveis na tela são desenhados. Esse sistema é executado diversas vezes e em rápida sucessão durante um segundo através do método `render`, criando uma ilusão de movimento. Esse processo se inicia no processador e termina na placa gráfica acontecendo quantas vezes a máquina conseguir ou quantas vezes o usuário desejar configurar. Os valores mais comuns para fixar o FPS são atrelados à frequência do monitor que, atualmente, variam de 30 Hz até 144 Hz e para todos os efeitos Hertz é uma medida equivalente ao FPS ([GREGORY, 2009](#)).

4.3.1 Interpolação Linear

Com o timestep definido ainda é necessário mais um procedimento para que o sistema renderize objetos em movimento de forma suave. O efeito de *stuttering* pode ser causado tanto pelo aspecto lógico, através dos picos de performance, quanto pelo simples fato de que não se possui total controle sobre como o SO gerencia a aplicação. Não é possível garantir uma taxa de atualização e renderização intercalada e perfeita. Haverá momentos que depois de um único `update` o método `render` será chamado várias vezes se processado em um tempo menor que o Δt e, sem nenhum tratamento, este efeito também causa *stuttering*. Ao chamar o método `render` consecutivamente e não atualizar a posição do objeto em cada chamada, o usuário tem a impressão de um sistema engasgado com movimento não fluído. Para resolver este último problema é necessário realizar uma

interpolação linear entre a posição anterior e atual do objeto, tornando seu movimento suave. Esse efeito pode ser visualizado nas figuras 8 e 9 onde um objeto move-se 10 pixels por segundo. Na primeira figura a função `render` é chamada sem nenhum tratamento e portanto renderiza o objeto no mesmo lugar até que sua posição seja atualizada no próximo `update`. Já na segunda figura, é renderizada a interpolação da posição desse objeto, tornando seu movimento muito mais suave para o usuário.

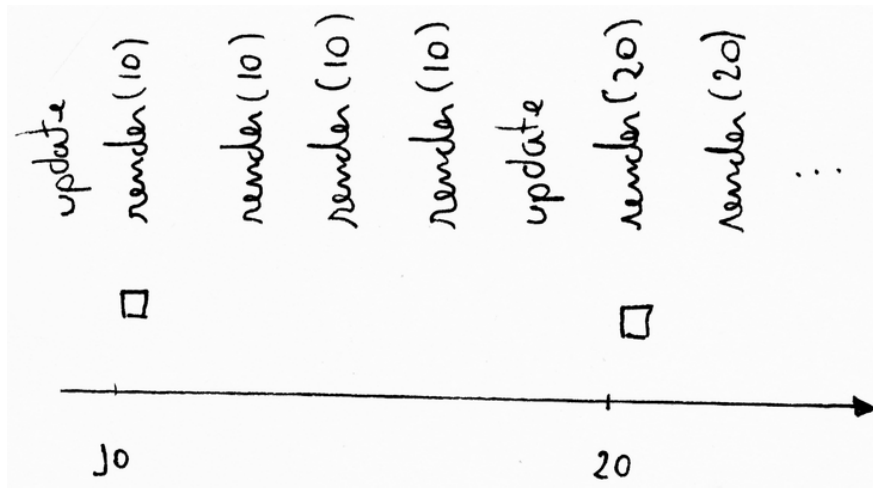


Figura 8 – Renderização sem interpolação

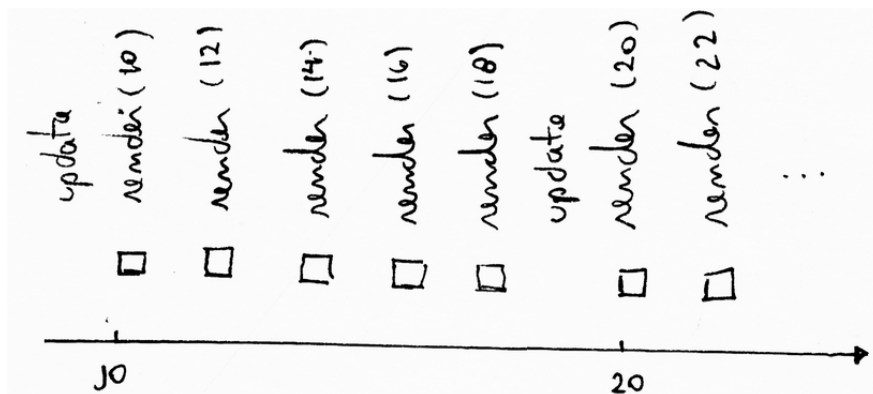


Figura 9 – Renderização com interpolação

O código final do game loop, para um sistema com timestep semi-fixo e com interpolação linear fica como se segue:

```

1      long lastFrame;
2      long accumulator = 0;
3      long dt;
4      public static final long ONE_SECOND_IN_NANOSECONDS = 10^9;
5      public static final long STEPS_PER_SECOND = 30;
6      public static final long FIXED_DT = ONE_SECOND_IN_NANO/STEPS_PER_SECOND;
7
8

```

```

9      while(true) {
10         long currentFrame = System.nanoTime();
11         dt = currentFrame - lastFrame;
12         lastFrame = currentFrame;
13         accumulator += dt;
14
15         while (accumulator >= FIXED_DT){
16             update(dt);
17             accumulator -= FIXED_DT;
18         }
19
20         long interpolationFactor = accumulator / FIXED_DT;
21
22         render(interpolationFactor);
23     }

```

Algoritmo 4.5 – Game Loop com timestep semi-fixo e interpolação linear

Dentro da função `render` o fator de interpolação é utilizado na seguinte fórmula para obter a posição onde o objeto deve ser renderizado:

$$renderPosition = currentPosition * interpolationFactor + previousPosition * (1 - interpolationFactor)$$

4.4 API gráfica OpenGL

OpenGL é a API encarregada da comunicação com a GPU. Através dela são realizadas todas as chamadas de função responsáveis por desenhar objetos na tela. Cada Engine deve utilizar uma API dependendo da plataforma na qual o produto final será disponibilizado. Por exemplo, para um sistema mobile existe a API OpenGL ES, para Windows tem-se a OpenGL, DirectX etc. De certa forma, as APIs gráficas compõem essencialmente o sistema de renderização.

4.4.1 Core-profile e Immediate mode

Immediate mode (legado) é o modo antigo de se operar com OpenGL e foi depreciado em 2008 com o lançamento da versão 3.0 (KHROS, 2018a). Hoje ele é substituído pelo modo *Core-profile*. No modo antigo as funções eram mais fáceis de usar, com muitas funcionalidades já abstraídas pela API. Entretanto, por serem funções abstraídas elas forneciam uma menor flexibilidade de controle sobre como o OpenGL operava e eram também ineficientes (VRIES, 2015). Com o passar do tempo e uma demanda dos desenvolvedores por maior flexibilidade a API foi depreciada e substituída pelo modo *Core-profile*, em que tem-se muito mais controle sobre como o OpenGL opera. Entretanto, isso vem ao custo de uma maior curva de aprendizagem e complexidade de implementação.

4.4.2 State Machine

O OpenGL funciona como uma grande máquina de estados, possuindo uma enorme coleção de variáveis que definem como operar no estado vigente. Chamam-se as funções para configurar o estado atual, passar dados (coordenadas geográficas, cores e outras informações) ou alterar modos de operação. Um desses estados é o *rendering state* cujo divisão é feita em várias categorias como: *color*, *texturing*, *lighting* e assim por diante. O *rendering state* é manipulado pelas funções `glEnable(feature)` e `glDisable(feature)` que recebem como argumento um `enum` indicando qual o atributo que se deseja habilitar.

4.4.3 Hello window

A primeira etapa necessária para usar o OpenGL é criar um contexto e uma janela onde renderizar. O processo de criação da janela é específico de cada SO e faz-se necessário o uso de outra API para abstrair esse passo. A biblioteca a ser utilizada será a GLFW. O código a seguir demonstra esse processo:

```
1 public class Window {
2     private int width;
3     private int height;
4     private Vec2 size;
5     private String name;
6     private long id;
7
8     public Window(int width, int height, String name) {
9         this.width = width;
10        this.height = height;
11        this.name = name;
12        size = new Vec2(width,height);
13    }
14
15    public void init() {
16        if (!glfwInit())
17            System.err.println("Could not initialize GLFW.");
18
19        glfwWindowHint(GLFW_CONTEXT_VERSION_MAJOR, 3);
20        glfwWindowHint(GLFW_CONTEXT_VERSION_MINOR, 3);
21        glfwWindowHint(GLFW_OPENGL_PROFILE, GLFW_OPENGL_CORE_PROFILE);
22        glfwWindowHint(GLFW_RESIZABLE, GL_FALSE);
23
24        id = glfwCreateWindow(width, height, name, NULL, NULL);
25        glfwMakeContextCurrent(id);
26
27        glfwSetWindowPos(id, 2000, 60);
28        glfwShowWindow(id);
29        GL.createCapabilities();
30        glfwSwapInterval(1); //VSYNC
31
32        glViewport(0,0, width, height);
33        glEnable(GL_CULL_FACE);
34        glEnable(GL_BLEND);
35        glBlendFunc(GL_SRC_ALPHA, GL_ONE_MINUS_SRC_ALPHA);
```

```
36     }  
37 }
```

Algoritmo 4.6 – Inicialização da janela e contexto OpenGL

Primeiramente inicia-se o GLFW através da chamada `glfwInit()`. Em seguida usa-se a função `glfwWindowHint(hint, value)` para adicionar atributos a janela, sendo o primeiro argumento o nome do atributo (de tipo `enum`) e o segundo argumento o valor que se deseja atribuir. No exemplo definido para a função `init` acima, foram inseridos os atributos `GLFW_CONTEXT_VERSION_MAJOR` e `GLFW_CONTEXT_VERSION_MINOR` indicando qual a versão mínima para rodar a aplicação. Essa versão é representada no formato `[MAJOR].[MINOR]` e, portanto, neste cenário a versão é 3.3. O atributo `GLFW_OPENGL_PROFILE` altera entre o modo core profile e immediate mode (legado). Cria-se então a janela com o método `glfwCreateWindow(width, height, title, monitor, share)` e usa-se o id retornado para torná-lo contexto vigente com `glfwMakeContextCurrent(id)`. A função `glfwShowWindow(id)` é chamada para tornar essa janela visível ao usuário. Para utilizar o OpenGL e criar seu contexto é necessário chamar `GL.createCapabilities`. A partir deste ponto o OpenGL pode ser utilizado normalmente. A função `glViewport(0,0, width, height)` define o tamanho do viewport ou, simplesmente, o tamanho da área de renderização e é geralmente usado como tendo o mesmo tamanho da janela.

4.4.4 OpenGL Pipeline

No intuito de desenhar objetos na janela, é necessário abordar dois elementos do OpenGL: *buffer objects* e *pipeline*. Os *buffer objects* são estruturas responsáveis por transmitir e encapsular os dados a serem enviados para a GPU. Existem 9 tipos de objetos e estes são divididos em duas categorias ([KHronos, 2018b](#)):

1. **Regular objects:** objetos dessa categoria contêm dados.
 - Buffer object
 - RenderBuffer object
 - Texture object
 - Query object
 - Sampler object
2. **Container objects:** objetos dessa categoria servem apenas de containers para transportar os elementos da lista anterior (*regular objects*).
 - Framebuffer object

- Vertex Array object
- Transform Feedback object
- Program pipeline object

Neste primeiro momento será abordado o *Vertex Buffer Object* (VBO) e *Vertex Array Object* (VAO). A fim de desenhar um objeto na tela faz-se necessário enviar a GPU os vértices que o compõem. O *pipeline* recebe como entrada uma série de vértices, os processa e transforma em pixels 2D na tela (VRIES, 2015). Cada etapa do *pipeline* recebe como entrada a saída da etapa anterior.

As etapas customizáveis do *pipeline* são processadas por pequenos programas chamados *shaders*. Esses programas são escritos em GLSL pelo desenvolvedor da aplicação e ficam alojados na GPU, sendo altamente paralelizáveis e especializados. A seguir tem-se uma representação simplificada do processo que ocorre no pipeline para desenhar um pequeno triângulo.



Figura 10 – Etapas do pipeline

Na etapa I o *vertex shader* é responsável, principalmente, por receber um único vértice e transformar sua coordenada cartesiana de um sistema para outro. Por exemplo, as coordenadas finais desse objeto vão mudar conforme a câmera se movimenta no espaço. É também necessário converter a posição local do objeto para a sua posição global no ambiente. Esses e outros processos serão melhor abordados no capítulo sobre Sistemas de Coordenadas.

Na etapa do *shape assembly* o OpenGL monta todos os vértices recebidos como entrada na primitiva selecionada para renderização. São algumas delas: *GL_POINTS*, *GL_LINES* e *GL_TRIANGLES*.

A etapa do *geometry shader* recebe como entrada a primitiva de saída do *shape assembly*. A partir desses vértices o *geometry shader* é capaz de gerar novos vértices e formar novas primitivas. No exemplo da Figura 10 ele recebe um triângulo e cria um novo vértice no centro, resultando em 3 sub-triângulos.

O *tessellation shader* é altamente especializado em subdividir uma primitiva em outras muito menores. Essa função é útil para, por exemplo, detalhar objetos mais próximos da tela e generalizar objetos mais distantes reduzindo sua quantidade de vértices.

A etapa de *rasterization* processa a saída do *tessellation shader* e converte todas essas informações em coordenadas 2D na tela ou, simplesmente, em pixels na tela. Esses pixels são então repassados como fragmentos para o *fragment shader*.

Na penúltima etapa do pipeline, o *fragment shader* processa todos os fragmentos para dar aos pixels sua cor final. É neste estágio que todos os efeitos visuais são aplicados como, por exemplo, a iluminação.

Por fim, no último estágio é aplicado o *blending* e outros testes. *Blending* nada mais é do que calcular o quanto a transparência de um objeto afeta outro. No exemplo da Figura 10 isso é representado pelos dois triângulos menores que afetam a cor final do triângulo maior aonde estes se sobrepõem. Neste estágio também são realizados os testes de *depth* e *stencil*.

4.4.5 Vertex Array Object e Vertex Buffer Object

Todo objeto no OpenGL é manipulado através de seu ID. Portanto, faz-se necessário gerar o ID do VAO e VBO chamando as funções `glGenVertexArrays()` e `glGenBuffers()`. Após gerados os IDs vincula-se esse *data object* como o vigente através da função `glBindBuffer(type, id)` e insere-se os dados nele através da função `glBufferData(type, data, draw_type)`. Para o *object container* o processo é similar. Vincula-se o VAO com `glBindVertexArray(id)` e habilita-se a localização do atributo do vértice no *vertex shader* através da função `glEnableVertexAttribArray(index)`. Por fim, configura-se como cada vértice deve ser interpretado, nesta situação como um bloco de 4 floats, sendo 2 deles as posições *x* e *y* do objeto e os dois últimos a posição *x* e *y* da textura que compõem esse objeto. Essa configuração é feita pela função `glVertexAttribPointer(index, size, type, normalized, stride, pointer)`.

```
1 private void init() {
2     float vertices [] = {
3         //Pos //Texture
4         0,  1,  0,  1f,
5         1,  0,  1f, 0,
6         0,  0,  0,  0,
7
8         0,  1,  0,  1f,
9         1,  1,  1f, 1f,
10        1,  0,  1f, 0
11    };
12
13    int quadVAO = glGenVertexArrays();
14    int VBO = glGenBuffers();
15
```



```

16  glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, VBO);
17  glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, BufferUtilities.createFloatBuffer(getVertices(3)
    ), GL_STATIC_DRAW);
18
19  glBindVertexArray(quadVAO);
20  glEnableVertexAttribArray(0);
21  glVertexAttribPointer(0, 4, GL_FLOAT, false, Float.BYTES * 4, 0);
22
23  glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, 0);
24  glBindVertexArray(0);
25  }

```

Algoritmo 4.7 – Inicialização do VBO e VAO

A variável `vertices` contém os vértices no espaço local do objeto. Essas coordenadas são então posteriormente processadas no vertex shader e transformadas em coordenadas globais.

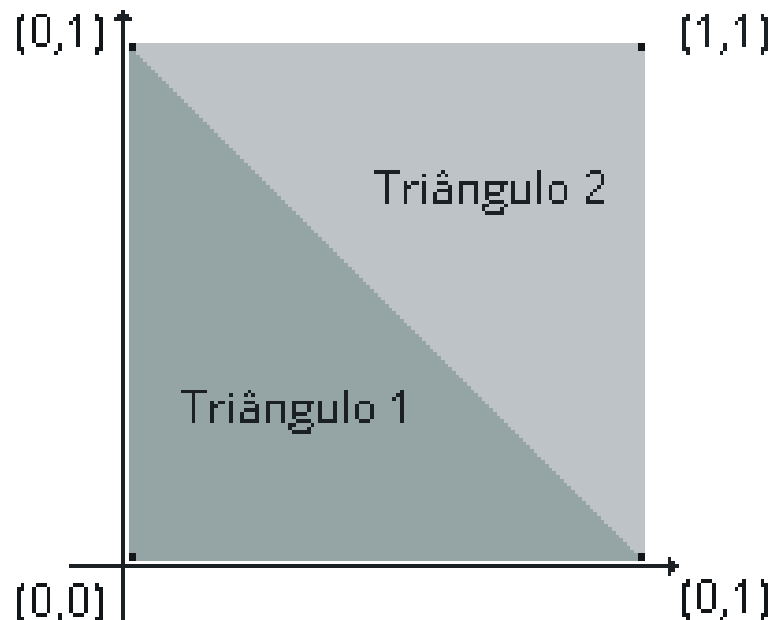


Figura 11 – Dois triângulos em coordenadas locais normalizadas que juntos formam um quadrado

4.4.6 OpenGL Shading Language (GLSL)

???

4.4.7 Vertex e Fragment shader

Após a geração do objeto, configuração e posterior transferência dos dados para a GPU, pode-se iniciar o processo de manipulação desses dados no *shader*. Como ilustrado na Figura 10, o primeiro shader do pipeline é o *vertex shader*. Todo código escrito no shader é iniciado com a versão do OpenGL. Neste caso, a versão utilizada é a 3.3 e o

modo, que deve ser explicitamente citado, é o modo *core profile*. O index layout, onde o dado é recebido no shader, para este exemplo é 0 e usa o formato de um vetor de 4 floats. Dessa forma a primeira parte do código fica:

```
1 #version 330 core
2 layout (location = 0) in vec4 vertex; //xy Obj coord
3                               //zw Texture coord
```

Algoritmo 4.8 – Vertex shader header

Definido o cabeçalho agora é necessário dizer quais serão as saídas do shader, ou simplesmente, seu retorno que servirá de entrada para a próxima etapa do pipeline. Isso é feito usando-se a palavra reservada `out` seguida do tipo e nome da variável. Ainda neste escopo são definidas as variáveis do tipo `uniform`, que funcionam como variáveis globais e podem ser acessadas em qualquer shader. Em seguida declara-se a função `main`, responsável pela manipulação destes dados.

```
1 #version 330 core
2 layout (location = 0) in vec4 vertex; //xy position
3                               //zw Tex coord
4
5 out vec2 TexCoords;
6
7 uniform mat4 model;
8 uniform mat4 projection;
9 uniform mat4 camera;
10
11 uniform vec2 flip;
12
13 void main(){
14     TexCoords = vertex.zw;
15     gl_Position = projection * camera * model *   vec4(vertex.xy, 0.0 , 1.0);
16 }
```

Algoritmo 4.9 – Vertex shader simples

Esse shader recebe um vetor de 4 floats contendo as coordenadas x e y do objeto e as coordenadas z e w da textura. As coordenadas da textura são passadas adiante para o fragment shader através da variável `TexCoords` e as coordenadas do vértice são multiplicadas pelas matrizes de projeção, câmera e modelo para obter as coordenadas globais. O resultado dessa multiplicação é armazenado na variável global do OpenGL chamada `gl_Position`.

A próxima etapa a ser abordada é a do fragment shader. Para a construção desse primeiro exemplo a única manipulação que será feita nos fragmentos é a renderização da textura. Com a entrada da etapa anterior (vertex shader) extrai-se da textura contida na variável `image` a fatia desejada usando as coordenadas em `TexCoords` (linha 5). Esse resultado é então enviado para a última etapa usando-se a variável `out vec4 color`.

```
1 #version 330 core
2 in vec2 TexCoords;
```

```

3  out vec4 color;
4
5  uniform sampler2D image;
6
7  void main(){
8      vec4 imgTex = texture(image, TexCoords).xyzw;
9      color = imgTex;
10 }

```

Algoritmo 4.10 – Fragment shader simples

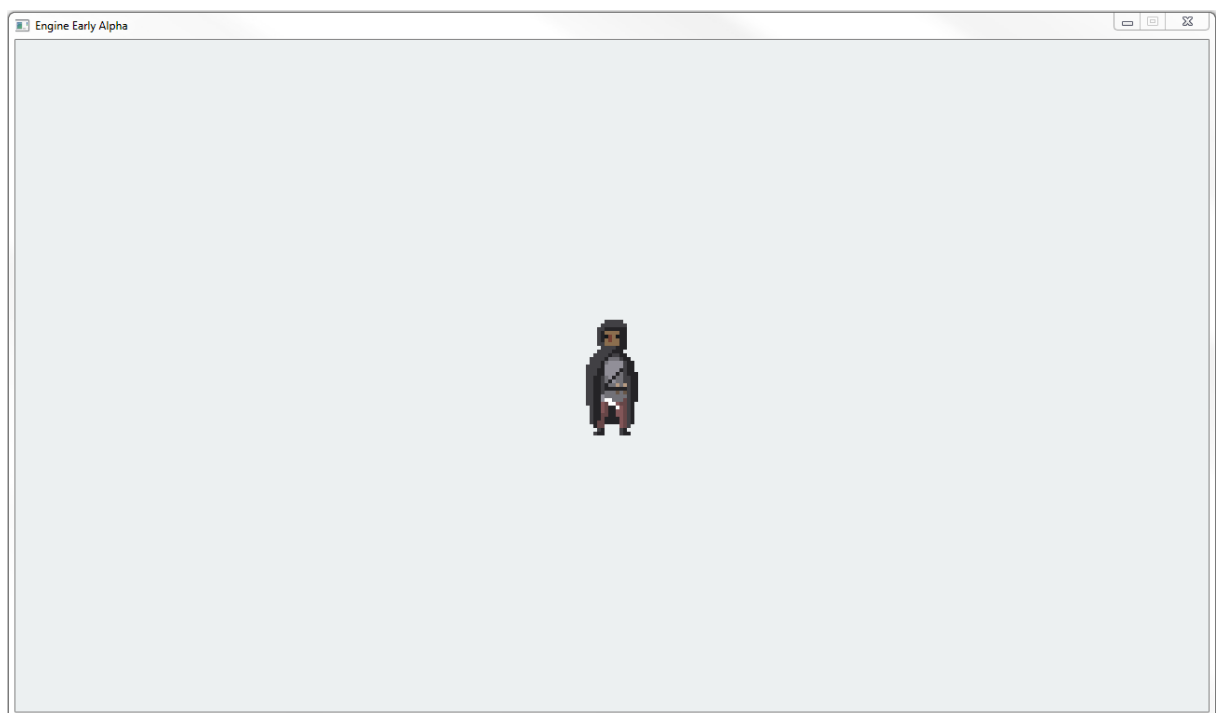


Figura 12 – Resultado obtido com dois shaders simples

4.4.8 Compilando o shader em um programa

Com o código dos shaders salvos em arquivo é necessário compilá-los e enviá-los a GPU antes de poderem ser efetivamente usados. Assim como qualquer objeto no OpenGL o primeiro passo é gerar um ID para referenciá-lo. Esse processo é feito chamando `glCreateShader(type)`. Os tipos possíveis de shader são aqueles demonstrados e numerados de I a IV na figura 10. Portanto, os valores possíveis são: `GL_COMPUTE_SHADER`, `GL_VERTEX_SHADER`, `GL_TESS_CONTROL_SHADER`, `GL_TESS_EVALUATION_SHADER`, `GL_GEOMETRY_SHADER`, e `GL_FRAGMENT_SHADER` (KHRO-NOS, 2018c). Com o objeto criado atribui-se o código ao objeto e o mesmo é compilado a partir das funções `glShaderSource(id, code)` e `glCompileShader(id)`. Para checar se a compilação foi realizada com sucesso chama-se a função `glGetShaderi(id, GL_COMPILE_STATUS)`. Se o retorno for 0 (FALSE) não houve erros. Caso contrário, a fun-

ção `glGetShaderInfoLog(id)` retorna a mensagem de erro, que pode ser posteriormente impressa na tela.

```
1  int vertexShader = glCreateShader(GL_VERTEX_SHADER);
2  glShaderSource(vertexShader, vertexSource);
3  glCompileShader(vertexShader);
4
5  int success = glGetShaderi(vertexShader, GL_COMPILE_STATUS);
6
7  if(success==0) {
8      String log = glGetShaderInfoLog(vertexShader);
9      System.err.println(log);
10 }
```

Algoritmo 4.11 – Processo de compilação do shader

Tendo os shaders necessários compilados agora é necessário criar um programa. Essa etapa segue um padrão baseado no processo de dois estágios para compile/link usada nos programas escritos em C e C++. O código fonte é primeiro servido ao compilador, produzindo um object file. Para obter o executável final é necessário encadear um ou mais object files juntos. Com o programa criado e os shaders encadeados a ele é possível utilizar todos esses shaders com apenas uma chamada do programa.

```
1  int id = glCreateProgram();
2  glAttachShader(id, vertexShader);
3  glAttachShader(id, fragmentShader);
4  glLinkProgram(id);
5
6  int success = glGetProgrami(id, GL_LINK_STATUS);
7
8  if(success==0) {
9      String log = glGetProgramInfoLog(id);
10     System.err.println(log);
11 }
```

Algoritmo 4.12 – Processo de criação e link de um programa

Os shaders uma vez encadeados podem ser removidos para liberar espaço usado a função `glDeleteShader(id)`.

4.4.9 Uniforms

Existem duas formas de se enviar dados para um shader, através dos objects e através das variáveis globais definidas como **uniform**. Para alocar um valor nessas variáveis é necessário primeiro usar o programa que contém este shader com a função `glUseProgram(id)` e em seguida usar uma das funções da família `glUniform...()`. O formato dessas funções é `glUniform+quantity+type`. Por exemplo, para atribuir um valor a uma variável float utiliza-se `glUniform1f (glGetUniformLocation (programID, variableName), value)`, para um vetor de 3 floats usa-se `glUniform3f(glGetUniformLocation (programID,variableName), x, y, z)`, para uma matriz 4 por 4 `glUniformMatrix4fv(glGetUnif`

(programID,variableName), false, BufferUtilities.createFloatBuffer(m)) e assim por diante. Dessa forma a classe final do Shader fica:

```
1 public class Shader {
2     private int id;
3
4     public Shader use() {
5         glUseProgram(this.id);
6         return this;
7     }
8     public int getId() {
9         return id;
10    }
11
12    public void compile(String vertexSource, String fragmentSource, String
        geometrySource) {
13        int vertexShader, geometryShader = 0, fragmentShader;
14
15        vertexShader = glCreateShader(GL_VERTEX_SHADER);
16        glShaderSource(vertexShader, vertexSource);
17        glCompileShader(vertexShader);
18        checkCompileErrors(vertexShader, "VERTEX");
19
20        fragmentShader = glCreateShader(GL_FRAGMENT_SHADER);
21        glShaderSource(fragmentShader, fragmentSource);
22        glCompileShader(fragmentShader);
23        checkCompileErrors(fragmentShader, "FRAGMENT");
24
25        if(geometrySource!=null) {
26            geometryShader = glCreateShader(GL_GEOMETRY_SHADER);
27            glShaderSource(geometryShader, geometrySource);
28            glCompileShader(geometryShader);
29            checkCompileErrors(fragmentShader, "GEOMETRY");
30        }
31
32        id = glCreateProgram();
33        glAttachShader(id, vertexShader);
34        if(geometrySource!=null)
35            glAttachShader(id, geometryShader);
36        glAttachShader(id, fragmentShader);
37        glLinkProgram(id);
38        checkCompileErrors(id, "PROGRAM");
39
40        glDeleteShader(vertexShader);
41        glDeleteShader(fragmentShader);
42        if(geometrySource!=null)
43            glDeleteShader(geometryShader);
44    }
45
46    private void checkCompileErrors(int object, String type) {
47        int success;
48        String log;
49
50        if(type!="PROGRAM") {
51            success = glGetShaderi(object, GL_COMPILE_STATUS);
52
53            if(success==0) {
```

```

54         log = glGetShaderInfoLog(object);
55         System.err.println(log);
56     }
57
58     }else {
59         success = glGetProgrami(object, GL_LINK_STATUS);
60
61         if(success==0) {
62             log = glGetProgramInfoLog(object);
63             System.err.println(log);
64         }
65
66     }
67 }
68
69 public void setFloat(String name, float value) {
70     glUniform1f(glGetUniformLocation(id,name), value);
71 }
72
73 public void setInteger(String name, int value) {
74     glUniform1i(glGetUniformLocation(id,name), value);
75 }
76
77 public void setVec2(String name, float x, float y) {
78     glUniform2f(glGetUniformLocation(id,name), x,y);
79 }
80
81 public void setVec2(String name, Vec2 pos) {
82     glUniform2f(glGetUniformLocation(id,name), pos.x, pos.y);
83 }
84
85 public void setVec3(String name, float x, float y, float z) {
86     glUniform3f(glGetUniformLocation(id,name), x,y,z);
87 }
88
89 public void setVec3(String name, Vec3 pos) {
90     glUniform3f(glGetUniformLocation(id,name), pos.x, pos.y, pos.z);
91 }
92
93 public void setVec4(String name, float x, float y, float z, float w) {
94     glUniform4f(glGetUniformLocation(id,name), x, y, z, w);
95 }
96
97 public void setVec4(String name, Vec4 pos) {
98     glUniform4f(glGetUniformLocation(id,name), pos.x, pos.y, pos.z, pos.w);
99 }
100
101 public void setMat4(String name, Mat4 m) {
102     glUniformMatrix4fv(glGetUniformLocation(id,name), false, BufferUtilities.
        createFloatBuffer(m));
103 }
104 }

```

Algoritmo 4.13 – Shader class

4.5 Renderer

4.5.1 Textura

Com o shader compilado e encadeado em um programa e os VBO's e VAO's prontos tudo que falta para renderizar a primeira imagem é carregá-la do arquivo e transferí-la para o shader usando uma *texture unit*. Esse processo tem início, como todo objeto no OpenGL, gerando um *id* via função. Para texturas a função utilizada é `glGenTextures()`. Em Java utiliza-se a classe `BufferedImage` para ler a imagem do arquivo e depois passar os pixels em formato de Buffer para o OpenGL.

```
1 public class Texture {
2     private int id;
3     private BufferedImage textureImage;
4     private static final int BYTES_PER_PIXEL = 4;
5     private int width, height;
6
7     public Texture(String path) {
8         id = glGenTextures();
9
10        try {
11            textureImage = ImageIO.read(getClass().getResourceAsStream(path));
12            width = textureImage.getWidth();
13            height = textureImage.getHeight();
14        } catch (IOException e) {
15            e.printStackTrace();
16        }
17
18        init();
19    }
20
21    private void init() {
22        int[] pixels = new int[textureImage.getWidth() * textureImage.getHeight()];
23        textureImage.getRGB(0, 0, textureImage.getWidth(), textureImage.getHeight(),
24            pixels, 0, textureImage.getWidth());
25        ByteBuffer buffer = BufferUtilities.createByteBuffer(
26            new byte[textureImage.getWidth() * textureImage.getHeight()
27                * BYTES_PER_PIXEL]
28        ); //4 for RGBA, 3 for RGB
29
30        for(int y = 0; y < textureImage.getHeight(); y++){
31            for(int x = 0; x < textureImage.getWidth(); x++){
32                int pixel = pixels[y * textureImage.getWidth() + x];
33
34                buffer.put((byte) ((pixel >> 16) & 0xFF)); // Red
35                component
36                buffer.put((byte) ((pixel >> 8) & 0xFF)); // Green
37                component
38                buffer.put((byte) (pixel & 0xFF)); // Blue
39                component
40                buffer.put((byte) ((pixel >> 24) & 0xFF)); // Alpha
41                component. Only for RGBA
42            }
43        }
44    }
45 }
```

```

38
39     buffer.flip();
40
41     glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, id); //Bind texture ID
42
43     //Setup wrap mode
44     glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_S, GL12.GL_CLAMP_TO_EDGE)
45     ;
46     glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_T, GL12.GL_CLAMP_TO_EDGE)
47     ;
48     //Setup texture scaling filtering
49     glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MIN_FILTER, GL_NEAREST); //
50     GL_LINEAR for smooth
51     glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MAG_FILTER, GL_NEAREST);
52
53     //Send texel data to OpenGL
54     glTexImage2D(GL_TEXTURE_2D, 0, GL_RGBA8, textureImage.getWidth(),
55     textureImage.getHeight(), 0, GL_RGBA, GL_UNSIGNED_BYTE, buffer);
56
57     glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, 0); //Unbind texture
58     textureImage = null; //'free' BufferedImage
59 }
60 }

```

Algoritmo 4.14 – Inicializando uma textura no OpenGL a partir de um BufferedImage

Primeiro cria-se um vetor de inteiros com tamanho da área total da imagem (width*height). Logo em seguida esse vetor é preenchido com os pixels do BufferedImage usando `textureImage.getRGB(startX, startY, width, height, toArray, offset, scanSize)`. Com todos os pixels da imagem no array `pixels` basta criar um ByteBuffer usando a função auxiliar `BufferUtilities.createByteBuffer()`.

```

1 public class BufferUtilities {
2     public static ByteBuffer createByteBuffer(byte[] array) {
3         ByteBuffer result = ByteBuffer.allocateDirect(array.length).order(ByteOrder.
4         nativeOrder());
5         result.put(array).flip();
6         return result;
7     }
8 }

```

Algoritmo 4.15 – Função auxiliar createByteBuffer

Com o byte buffer alocado a próxima etapa é preenchê-lo com os dados contidos no array `pixels`. O formato escolhido para essa engine foi o RGBA com canais de 1 byte cada, em que cada canal pode assumir valores entre 0 e 255 (2^8). Entretanto, a função `getRGB()` retorna um espaço de cores no formato ARGB e precisa ser convertido para RGBA antes da inserção no buffer.

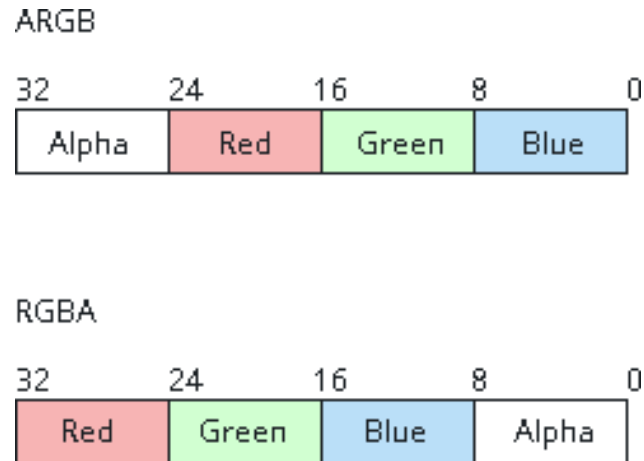


Figura 13 – Sistema ARGB e RGBA, ambos com canais de 8 bits (1 byte)

Para realizar essa conversão basta aplicar um deslocamento de 24, 16 ou 8 bits conforme o canal e depois aplicar uma máscara de $0x0000FF_{16}$ bits (e.g 1111111_2) para preservar somente o byte menos significativo. O tamanho do deslocamento depende da posição em que o canal se encontra. A extração do canal verde é exemplificada na figura a seguir.

R:192	G:128	B:255	
11000000	10000000	11111111	
>>8			Shift 8 bits to the right
<hr/>			
00000000	11000000	10000000	
&&			Apply mask 0x0000FF
<hr/>			
00000000	00000000	11111111	
<hr/>			
			G:10000000

Figura 14 – Extração do canal verde em um inteiro de 3 bytes

Uma vez que todos os dados foram inseridos no buffer, usa-se `buffer.flip()`. Antes de qualquer operação na textura vincula-se ela como atual usando `glBindTexture(type, id)`. Para este exemplo será utilizado o tipo `GL_TEXTURE_2D`, indicando uma imagem normal em 2D. Em seguida configura-se o modo de *wrapping*. Por padrão, quando as coordenadas de uma textura excedem seu tamanho o openGL as repete com o modo `GL_REPEAT`. Entretanto, existem 4 modos possíveis: `GL_REPEAT`, `GL_MIRRORED_REPEAT`, `GL_CLAMP_TO_EDGE` e `GL_CLAMP_TO_BORDER`.



Figura 15 – Wrap modes

Esses modos são configurados através da função `glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_S, GL_CLAMP_TO_EDGE)`. O segundo argumento indica o eixo para o qual se deseja aplicar a configuração, sendo eles S e T, equivalentes a x e y. Em seguida é escolhida a fórmula utilizada para escalonar a imagem. São dois modos possíveis: `GL_NEAREST` e `GL_LINEAR`.

O modo `GL_NEAREST` é o modo *default* do OpenGL e opera escolhendo o pixel cujo centro é o mais próximo da coordenada da textura. De uma maneira simples é o modo que ao ampliar a imagem não é aplicada nenhuma suavização, passando uma impressão de imagem serrilhada/pixelizada. A Figura 16 demonstra esse processo.

O modo `GL_LINEAR` interpola um valor entre os pixels vizinhos. É o modo que ao ampliar ou diminuir a imagem causa uma impressão de bordas mais suaves.



Figura 16 – Ampliação de 32x usando cada tipo de filtro.

Esses modos podem ser aplicados distintamente para operações de aumentar ou diminuir a imagem. O atributo responsável por dizer em qual das duas situações o filtro deve ser aplicado é: `GL_TEXTURE_MAG_FILTER` e `GL_TEXTURE_MIN_FILTER`. Sendo o primeiro para operações de magnifying (aumento) e o segundo para operações de minifying (diminuir).

Por fim, com todos esses parâmetros configurados envia-se o bytearray contendo os dados da imagem propriamente dita para o OpenGL. Isso é feito na função `glTexImage2D(type,`

mipmap_level, internal_format, width, height, border, color_format, type, bytebuffer

4.5.2 Animações

Uma vez que todo o sistema de shader program e texturas estão montados é possível usá-los para construir componentes mais avançados, como o de animação. Um objeto em animação não é nada mais que uma sequência de frames desenhados em um intervalo de milissegundos, criando ilusão de movimento. É comum a utilização de *spritesheets* para armazenar todas as imagens em um único arquivo e então recortá-las em pedaços (frames) em tempo de execução.

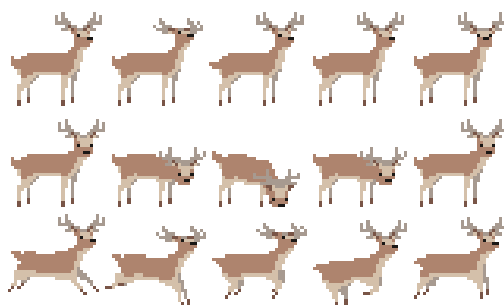


Figura 17 – Spritesheet com frames de 32x32 pixels

Para que esse recorte seja possível é necessário acrescentar alguns parâmetros ao shader para que este saiba qual pedaço deve ser recortado. Essa tarefa pode ser facilmente realizada alterando as coordenadas locais da textura enviadas através do atributo `glAttribXXXX 0` definido anteriormente.

```
1 #version 330 core
2 layout (location = 0) in vec4 vertex;
3 //Onde: xy coord. vertex e zw coord. textura
4
5 out vec2 TexCoords;
6 out vec3 FragPos;
7
8 uniform mat4 model;
9 uniform mat4 projection;
10 uniform mat4 camera;
11 uniform vec4 spriteFrame;
12 //Onde: xy coord. do frame na textura e zw largura e altura
13
14 void main(){
15     vec2 tCoords = vertex.zw;
16
17     tCoords *= spriteFrame.zw;
18     tCoords += spriteFrame.xy;
19
20     TexCoords = tCoords;
21     gl_Position = projection * camera * model * vec4(vertex.xy, 0.0, 1.0);
22     FragPos = vec3(model * vec4(vertex.xy, 0.0, 1.0));
```

Algoritmo 4.16 – Vertex shader com animações

Na variável `spriteFrame` tem-se as coordenadas de qual pedaço da textura deverá ser extraído. Essa informação é então repassada para o fragment shader onde por fim a função `texture()` irá colher esses pixels para manipulação.

Dessa forma o código da classe responsável pela manipulação lógica da animação fica como se segue. A classe pode ser ainda estendida para comportar frames com tempo de duração específico. Para isso basta substituir o parâmetro `long frameDuration` por um vetor com o tempo de duração correspondente a cada frame e alterar a lógica do método `update`.

```

1  public class Animation implements Serializable{
2      private Vec4 frames[];
3      private int currentFrame = 0;
4      private String texture;
5      private long frameDuration = -1;
6      private long startTime = System.nanoTime();
7      private boolean playedOnce = false;
8
9      public Animation(String texture, long frameDuration) {
10         this.texture = texture;
11         this.frameDuration = frameDuration;
12     }
13
14     public void setFrames(int quantity, Vec2 offset, Vec2 size) {
15
16         frames = new Vec4[quantity];
17         float width = ResourceManager.getSelf().getTexture(texture).getWidth();
18         float height = ResourceManager.getSelf().getTexture(texture).getHeight();
19
20         for(int i= 0; i< quantity; i++){
21             frames[i] = new Vec4(
22                 ((float)i*size.x + offset.x)/width,
23                 (offset.y)/height,
24                 (size.x)/width,
25                 (size.y)/height
26             );
27         }
28
29     }
30
31     public Vec4 getCurrentFrame() {
32         return frames[currentFrame];
33     }
34
35     public void update() {
36         if(frameDuration>0) {
37             long elapsed = (System.nanoTime() - startTime) / Engine.MILLISECOND;
38
39             if(elapsed > frameDuration) {
40                 currentFrame++;
41                 startTime = System.nanoTime();

```

```

42     }
43     if(currentFrame == frames.length) {
44         currentFrame = 0;
45         playedOnce = true;
46     }
47 }
48 }
49 }

```

Algoritmo 4.17 – Classe Animation

4.5.3 Z-Ordering

A técnica de z-ordering consiste na ordenação de objetos em sobreposição. É utilizada para organizar a ordem na qual os elementos devem ser renderizados tal que não haja elementos distantes sendo desenhados em cima de objetos mais próximos da câmera. Para ambientes 2D, basta ordenar os elementos pela posição y do menor para o maior.

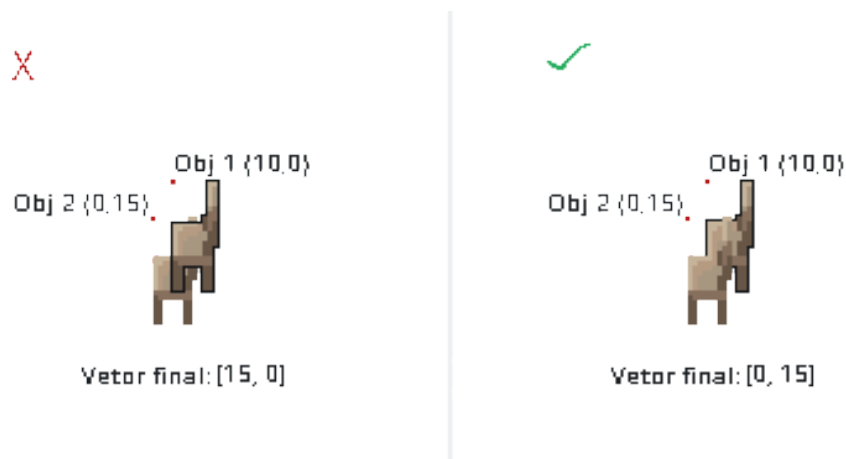


Figura 18 – Ordem correta de renderização: do menor y para o maior y

Deve-se atentar na implementação desta técnica para ordenar apenas os objetos que estão no espaço de visão da câmera, otimizando assim a performance do algoritmo de ordenação. É ainda necessário, para dar um melhor senso de profundidade, considerar a posição dos objetos a partir da sua base que toca o solo. Isto é, considerar que sua posição y no espaço seja relativa ao ponto no qual o objeto toca o chão invés de ser simplesmente o canto superior esquerdo da imagem. Esse mesmo princípio de caixa base é utilizada para calcular a colisão dos objetos que caminham pelo ambiente.



Figura 19 – Ordem correta de renderização: do menor y para o maior y considerando a caixa base

4.6 Iluminação

Existem muitos modelos de iluminação com equações sofisticadas que conseguem simular a luz de maneira muito próxima da realidade. Entretanto, estes modelos mais robustos não costumam servir para um sistema de tempo real pois são muito caros em performance, sendo geralmente utilizados em outras indústrias como, por exemplo, a cinematográfica. O modelo de iluminação adotado e adaptado nesta engine foi o de Phong que usa três componentes de luz em sua construção: ambient, diffuse e specular ([SCRATCHPIXEL, 2018](#)).



Figura 20 – Componentes do modelo de Phong

4.6.1 Ambiente

A luz ambiente representa as fontes de luz mais distantes que estão quase sempre presentes no mundo como, por exemplo, o sol. São essas fontes que garantem a visibilidade quase constante dos objetos pois, afinal, sem luz o ser humano não é capaz de perceber o mundo visível.

Vale ressaltar duas propriedades importantes da luz: reflexão e refração. A iluminação que advém de qualquer fonte luminosa pode impactar objetos mesmo que estes não

estejam sobre alcance direto. Esse efeito advém da propriedade da reflexão e é chamado de luz indireta. Algoritmos que levam esse fator em consideração são chamados de *global illumination*, mas geralmente custam caro em performance ou são muito complexos. Para esta engine será adotado um modelo simplificado que consiste em multiplicar a cor do objeto por uma variável `lightAmbientColor`, que define a cor e intensidade da luz que ilumina todo o mundo.

```
1 #version 330 core
2 in vec2 TexCoords;
3 out vec4 color;
4
5 uniform sampler2D image;
6
7 void main(){
8     vec4 lightAmbientColor = vec4(1.1,0.7,0.25,1);
9
10    vec4 imgTex = texture(image, TexCoords).xyzw;
11
12    color = imgTex*lightAmbientColor;
13 }
```

Algoritmo 4.18 – Fragment Shader com luz ambiente

Dessa forma o resultado que se obtêm com a cor acima é um ambiente com uma tonalidade um pouco alaranjada:

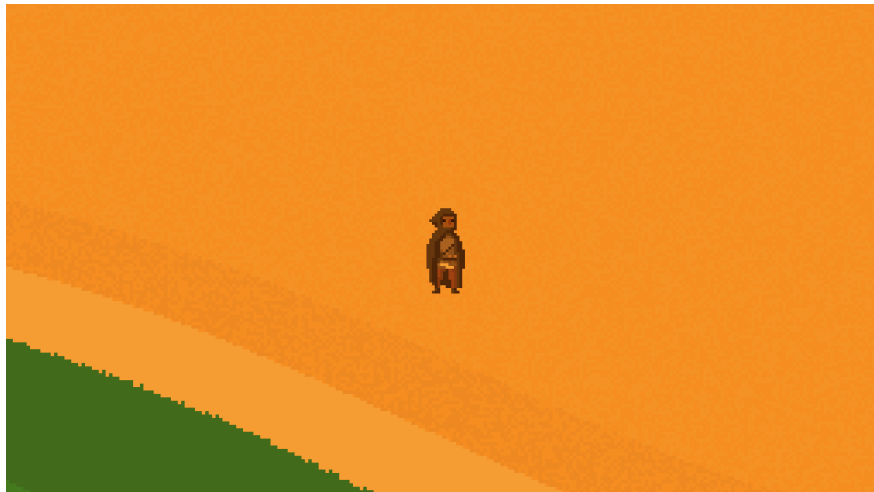


Figura 21 – Demonstração da luz ambiente com tonalidade alaranjada

4.6.2 Luz Difusa

A luz difusa simula o impacto direcional que uma fonte de luz tem sobre um objeto qualquer. Quanto mais perto o objeto está dessa fonte, mais brilhante ele será.

Para calcular a luz difusa é necessário antes ter em mãos o vetor normal do objeto que será atingido pelos raios de luz. Dessa forma, quando o raio de luz atinge o objeto calcula-se o ângulo θ entre os dois vetores usando o produto escalar.

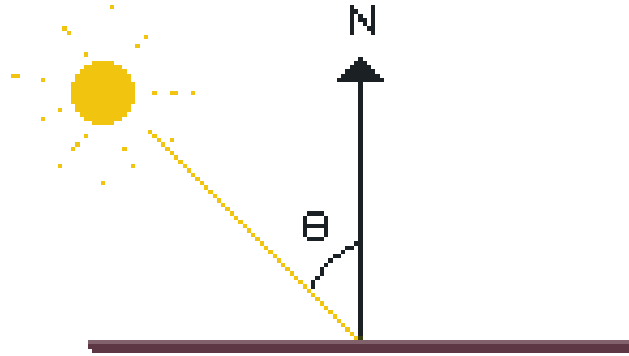


Figura 22 – Angulo θ entre raio luminoso e vetor normal da superfície iluminada

O resultado desse produto escalar indica o impacto que a luz terá sobre a cor do fragmento sendo processado pelo shader, tendo em conta sua orientação relativa à luz. Para realizar o cálculo será necessário então um vetor com a posição da fonte luminosa e o vetor normal e do fragmento sendo afetado por essa fonte. O vetor normal será obtido através de uma normal texture e o vetor da fonte luminosa através de uma variável `global uniform`. O vetor normal é pré-calculado e armazenado em uma imagem enviada ao shader juntamente com a posição e cor da fonte luminosa. O cálculo é então feito normalizando a subtração do `lightPos` pela posição do fragmento, obtendo assim a direção da luz. Com o valor normalizado realiza-se o produto escalar da direção da luz pela textura normal. Multiplica-se então o resultado pela cor da luz e ao final somada-se a luz difusa a luz ambiente. Esse resultado é multiplicado pela textura para obter o resultado final. O resultado obtido com o shader é ilustrado na figura abaixo. //TODO: falta explicar melhor o `lightDir`

```

1  #version 330 core
2
3  in vec2 TexCoords;
4  in vec3 FragPos;
5
6  out vec4 color;
7
8  uniform sampler2D image;
9  uniform sampler2D normalTex;
10
11 uniform vec3 lightPos;
12 uniform vec3 lightColor;
13
14 void main(){
15
16     vec3 normal = normalize(texture(normalTex, TexCoords).xyz);
17
18     vec3 lightDir = normalize(lightPos - FragPos);
19     float diff = max(dot(normal, lightDir), 0.0);
20     vec3 diffuse = diff * lightColor;
21
22     vec4 lightAmbientColor = vec4(1.1,0.7,0.25,1);
23     vec4 imgTex = texture(image, TexCoords).xyzw;

```



```

24
25     color = imgTex * (lightAmbientColor + vec4(diffuse.xyz,1));
26 }

```

Algoritmo 4.19 – Fragment Shader com luz ambiente e difusa



Figura 23 – Resultado da luz difusa usando a textura normal do objeto

4.6.3 Vetor Normal

Um vetor normal unitário é aquele perpendicular à superfície do vértice. A técnica comumente utilizada para trabalhar com os vetores normais de um objeto consiste em mapeá-los em uma textura de forma que, para cada pixel da textura original, haja um vetor normal. Como o vetor normal precisa de apenas 3 coordenadas (x,y,z) isso é facilmente convertido para as coordenadas de cores RGB e, por fim, são armazenadas em uma imagem (textura).

4.6.4 Luz Especular

A luz especular é o ponto brilhante que aparece em objetos lisos e reluzentes, ajudando numa melhor percepção do espaço 3D e da textura do objeto que a reflete. O termo especular significa que a luz é perfeitamente refletida, assim como acontece em uma superfície perfeitamente lisa de, por exemplo, um espelho.

Assim como a luz difusa, a luz especular possui o vetor de direção da luz e o vetor normal do objeto. Entretanto, ela também é calculada baseando-se na direção em que a câmera está olhando.

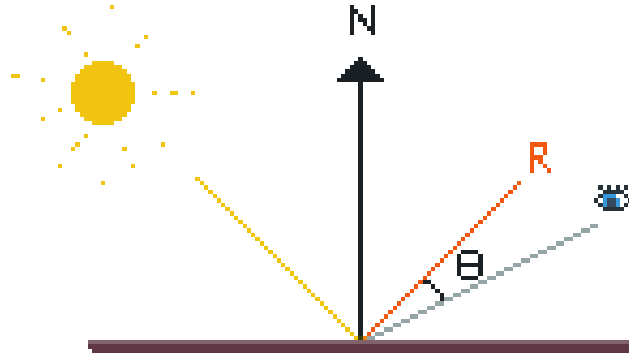


Figura 24 – Luz especular do ponto de vista do observador

//TODO: include incidence and reflect angles to better explain.

4.6.5 Atenuação

A intensidade da luz diminui quanto maior a distância de um objeto, começando intensa e rapidamente desvanecendo. Aplicar uma fórmula linear para calcular esse efeito daria uma impressão errônea do comportamento da luz, tratando-a como se fosse uniforme. Portanto, faz-se necessário utilizar uma fórmula que melhor simule este comportamento. Sendo ela:

$$F = \frac{1}{(K_c + K_l * d + K_q * d^2)}$$

Aonde:

- K_c é uma constante arbitrária para garantir que o denominador nunca seja 0
- K_l é uma constante linear
- K_q é uma constante quadrática
- d é a distância do fragmento até a fonte luminosa

Existe uma tabela para auxiliar na escolha do valor das constantes para distâncias entre 0 e 3200. A tabela pode ser facilmente estendida para distâncias maiores.

Range	Constant	Linear	Quadratic
3250	1.0	0.0014	0.000007
600	1.0	0.007	0.0002
325	1.0	0.014	0.0007
200	1.0	0.022	0.0019
160	1.0	0.027	0.0028
100	1.0	0.045	0.0075
65	1.0	0.07	0.017
50	1.0	0.09	0.032
32	1.0	0.14	0.07
20	1.0	0.22	0.20
13	1.0	0.35	0.44
7	1.0	0.7	1.8

Tabela 1 – Tabela de valores exemplo para a função de atenuação

A implementação do fator de atenuação é feita diretamente no shader multiplicando os valores da luz ambiente, difusa e especular.

```

1 #version 330 core
2
3 in vec2 TexCoords;
4 in vec3 FragPos;
5
6 out vec4 color;
7
8 uniform sampler2D image;
9 uniform sampler2D normalTex;
10
11 uniform vec3 lightPos;
12 uniform vec3 lightColor;
13
14 void main(){
15
16     vec3 normal = normalize(texture(normalTex, TexCoords).xyz);
17
18     vec3 lightDir = normalize(lightPos - FragPos);
19     float diff = max(dot(normal, lightDir), 0.0);
20     vec3 diffuse = diff * lightColor;
21
22     float distance = length(lightPos - vec3(FragPos.xyz));
23     float constant = 1;
24     float linear = 0.007;
25     float quadratic = 0.0002;
26
27     float attenuation = 1 / (constant + linear * distance + quadratic * (distance*
        distance));
28
29     vec4 lightAmbientColor = vec4(1.1,0.7,0.25,1);
30     vec4 imgTex = texture(image, TexCoords).xyzw;
31
32     color = vec4((imgTex.xyz + lightAmbientColor + (lightColor * attenuation*0.8)
        ) * attenuation, imgTex.w);

```

4.7 Classe Renderer

A classe renderer é responsável por conter e controlar todos métodos de desenho do sistema. Nela define-se uma função única tal que não seja necessário, a todo momento, configurar o shader e atualizar diretamente as variáveis uniform, VBO e VAO. Ela abstrai todos esses processos em uma simples chamada que recebe como argumento as coordenadas, texture e afins do objeto. Dessa forma, o código 4.7 será incorporado em uma classe renderer juntamente com o método render descrito a seguir:

```

1  public class TextureRenderer(){
2
3      public TextureRenderer(){
4          init();
5      }
6
7      private void init(){
8          //code from algorithm 4.7
9      }
10
11     public void render(Texture texture, Vec2 position, Vec2 size, float rotate,
12         Vec4 color, Vec4 spriteFrame) {
13         this.shader.use();
14         Mat4 model = new Mat4();
15
16         model = model.translate(position.x, position.y, 0);
17         model = model.translate(0.5f * size.x, 0.5f *size.y, 0); //Move the origin
18             of rotation to object's center
19         model = model.rotate(rotate, 0, 0, 1); // Must be in radians
20         model = model.translate(-0.5f * size.x, -0.5f *size.y, 0); //Move the origin
21             of rotation back to it's top left
22         model = model.scale(size.x, size.y, 1);
23
24         shader.setMat4("model", model);
25         shader.setVec4("spriteColor", color);
26         shader.setVec2("flip", orientation);
27         shader.setVec4("spriteFrame", spriteFrame);
28
29         shader.setInteger("image", 0);
30
31         glActiveTexture(GL_TEXTURE0);
32         texture.bind();
33
34         glBindVertexArray(quadVAO);
35         glDrawArrays(GL_TRIANGLES, 0, 6*3);
36         glBindVertexArray(0);
37     }
38 }
```

Dessa forma, para renderizar os objetos itera-se numa lista e para cada objeto chama-se `TextureRenderer.render()`.

```
1  for(GameObject obj: listOfObjects){
2      textureRenderer.render(obj.getTexture(), obj.getPosition(), obj.getSize(),
3          obj.size(), ...);
4  }
```

Algoritmo 4.22 – Demonstração do render

Entretanto, esta implementação é ingênua pois é necessário realizar n chamadas à função `render`, sendo n a quantidade de objetos na lista. Ou seja, se há um milhão de objetos na tela serão realizadas um milhão de chamadas ao método `render` e consequentemente um milhão de trocas de contexto de shader em `this.shader.user()` mais 4 transferências de informação para as variáveis uniform por chamada do método. Toda essa troca de contexto e transferência de dados entre CPU e GPU possuem um impacto enorme no desempenho e quanto maior a lista de objetos a serem desenhados pior será a performance.

Para fins de introdução ao conceito e abstração do processo de renderização abordou-se o modelo acima. Entretanto, o problema será tratado em uma sessão mais adiante que implementará o método de batch rendering, que resolve esta situação realizando apenas uma única chamada do método `render` por tipo de shader e realizando a transferência desses dados em um único e enorme pacote de dados, evitando gargalo no BUS da placa mãe.

4.8 Arquitetura do Game Object

Os game objects, também conhecidos como entidades, estão no centro de tudo aquilo que dá vida ao cenário do jogo. São esses arquétipos que definem NPC's, inimigos, vida selvagem e até mesmo o próprio jogador. Existem três arquiteturas muito presentes e comuns no desenvolvimento de games: Component Based, Object Oriented e Entity System ([WENDERLICH, 2018](#)).

4.8.1 Object Based

Uma arquitetura baseada em objetos trabalha sobre o conceito de hierarquia de classes. Haverá uma classe `GameObject` que é então especializada para cada tipo de objeto. Por exemplo, uma classe `minotauro` estende uma classe `monstro` que, por sua vez, estende a classe `GameObject`. Da mesma forma uma classe `besouro` estende a classe `monstro` que estende a classe `GameObject`.

O problema dessa implementação é que quanto mais especializações são criadas mais difícil e complexo se torna a manutenção dessa estrutura. Para cada nova regra

implementada em uma especialização surgem exceções que começam a tornar necessário uma generalização ainda maior, resultando em uma classe `GameObject` extensa e com recursos muitas das vezes usados apenas por uma certa especialização.

Isso ainda pode causar relações de hierarquia que não fazem sentido lógico como, por exemplo, uma armadilha que estende a classe `monstro` só para ser capaz de usar o sistema de dano.

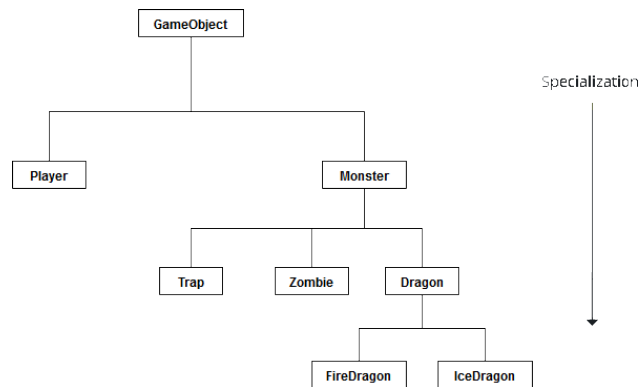


Figura 25 – Especialização das classes numa arquitetura baseada em objetos

4.8.2 Component Based

A arquitetura baseada em componentes, também conhecida pelo nome de behavior, consiste no uso de composição invés de herança. Ao contrário da especialização e generalização utilizados na herança o sistema de composição consiste em criar vários pequenos componentes e então "especializar" um `GameObject` atribuindo a ele os componentes que se deseja. Dessa forma, para que um `GameObject` seja um `monstro` basta adicionar um componente de dano, vida e IA.

Existem várias maneiras de se implementar essa arquitetura. Através do uso de switches para assinalar qual componente está ativo ou não, através do padrão de projeto com componentes usando passagem de mensagem. A maior desvantagem dessa arquitetura está na relação estrita entre os dados e o sistema que os manipula, tornando o processamento de um sistema que requer múltiplos dados não diretamente relacionados complicado.

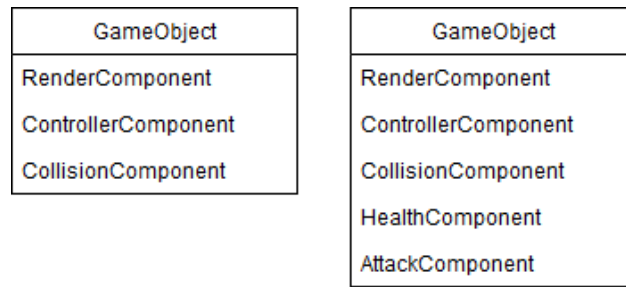


Figura 26 – GameObject composto de vários componentes

//TODO: falar da leitura simplificada de arquivo tanto no Component Based quanto Entity Based

//TODO:cód. exemplo dos switches

4.8.3 Entity Based

Um game object baseado em entidades trabalha de maneira similar à forma como um banco de dados trata suas informações. O sistema que manipula as informações é desacoplado dos dados em si. Dessa maneira, uma entidade é composta apenas de dados e um sistema à parte é responsável por processar essas informações e realizar suas tarefas. Assim, uma entidade do tipo monstro precisa ter associado a ela apenas os atributos pertinentes como dano, vida e IA. O sistema então responsável verifica se a entidade possui esses atributos e, caso tenha, realiza seus cálculos senão, o sistema ignora essa entidade e avança para a próxima da lista.

//TODO: cód.

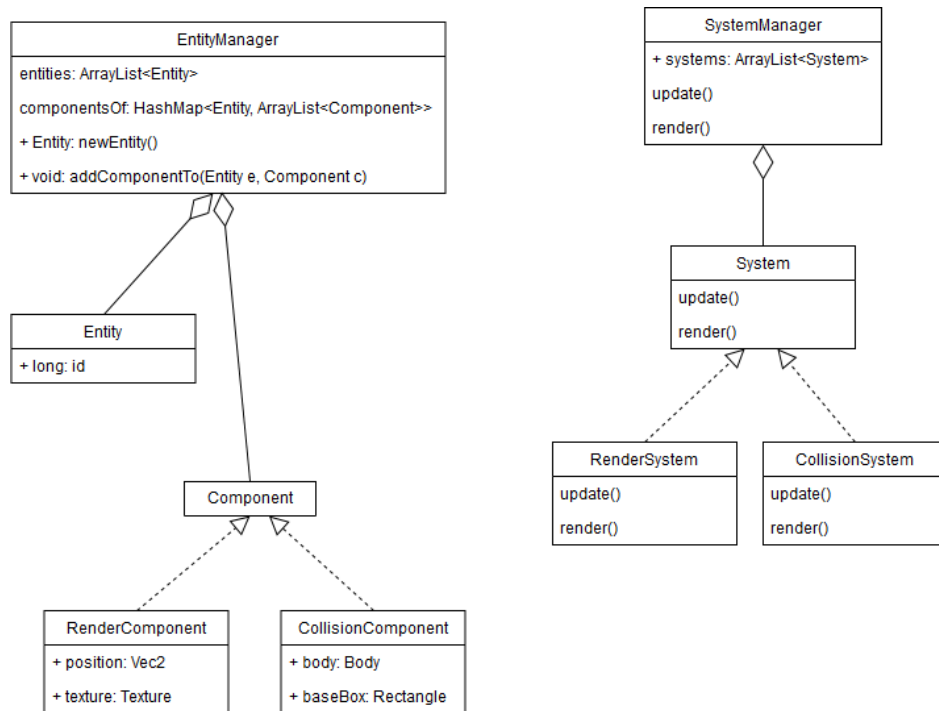


Figura 27 – Diagrama de classes do sistema entity based

4.9 Sistema de colisões

O sistema de colisões é responsável por delimitar o espaço físico que cada objeto deve ocupar no ambiente. Para formas geométricas mais básicas como retângulos, círculos e triângulos existem fórmulas simples e otimizadas para detectar essas colisões. Para polígonos mais complexos existem diversos algoritmos que usufruem de métodos avançados para detectar e resolver essas colisões.

Um problema de colisão é dividido em duas etapas principais: detecção e resolução. A etapa de detecção consiste em detectar quais objetos colidiram com quais outros objetos em um tempo t . Esse processo pode ocorrer de duas formas, por antecipação ou no tempo de colisão. A segunda etapa consiste em resolver essas colisões usando uma série de critérios como, por exemplo: gravidade, massa, velocidade, impulso, torque etc.

4.9.1 Colisões do tipo AABB vs AABB

Colisões do tipo Axis Aligned Bounding Box (AABB) são as mais simples de resolver. Um retângulo do tipo AABB possui o seu eixo x paralelo ao eixo x do plano cartesiano, e o seu eixo y paralelo ao eixo y do plano cartesiano, ou seja, sem qualquer rotação. Para detectar se dois retângulos de eixo alinhado colidiram basta checar se houve sobreposição em qualquer um dos eixos x e y .

```

1 public boolean intersects(Rectangle r) {
2     float tw = this.width;

```



```

3      float th = this.height;
4      float rw = r.width;
5      float rh = r.height;
6
7      if (rw <= 0 || rh <= 0 || tw <= 0 || th <= 0)
8          return false;
9
10     float tx = this.x;
11     float ty = this.y;
12     float rx = r.x;
13     float ry = r.y;
14     rw += rx;
15     rh += ry;
16     tw += tx;
17     th += ty;
18
19     return ((rw < rx || rw > tx) &&
20            (rh < ry || rh > ty) &&
21            (tw < tx || tw > rx) &&
22            (th < ty || th > ry));
23 }

```

Algoritmo 4.23 – Colisão AABB vs AABB

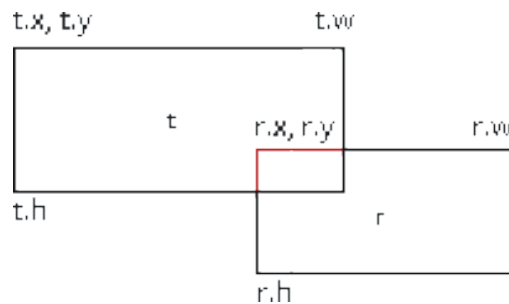


Figura 28 – Colisão AABB vs AABB

Para o exemplo da figura acima a intersecção ocorreu onde $rw > tx$, $rh > ty$, $tw > rx$ e $th > ry$. Ou seja, o retângulo r está abaixo e a direita do retângulo t.

4.9.2 jBox2D

A biblioteca jBox2D é um porte da biblioteca Box2D, originalmente implementada em C++. Trata-se de uma ferramenta rica em recursos para manipulação de corpos rígidos 2D. Embora o sistema de medidas implementado pelo jBox2D esteja no padrão internacional (metros) isso não o torna inutilizável para um ambiente 2D com sistema de medida em pixels. Entretanto, faz-se necessário criar um fator de escala para converter entre um sistema e outro.

Para o sistema de colisões funcionar ele precisa, assim como a própria engine, de um mundo e um timestep, neste caso, fixo. Define-se abaixo o exemplo:

//TODO: código exemplo

4.10 Sistema de coordenadas

O sistema de coordenadas abrange todo o processo de manipulação das coordenadas dos game objects até a sua conversão NDC e por fim rasterização para a tela. Note que o OpenGL espera todas as coordenadas finais no formato NDC (Normalized Device Coordinates), que varia entre $[-1, 1]$. Cada etapa manipula e converte de um sistema para o outro. São cinco sistemas de coordenadas no total:

1. Espaço local
2. Espaço de mundo
3. Espaço de visão (ou espaço de câmera)
4. Espaço de recorte
5. Espaço da tela

Uma vez processadas elas são passadas para o *shader rasterization* e enfim convertidas para pixels em 2D na tela.

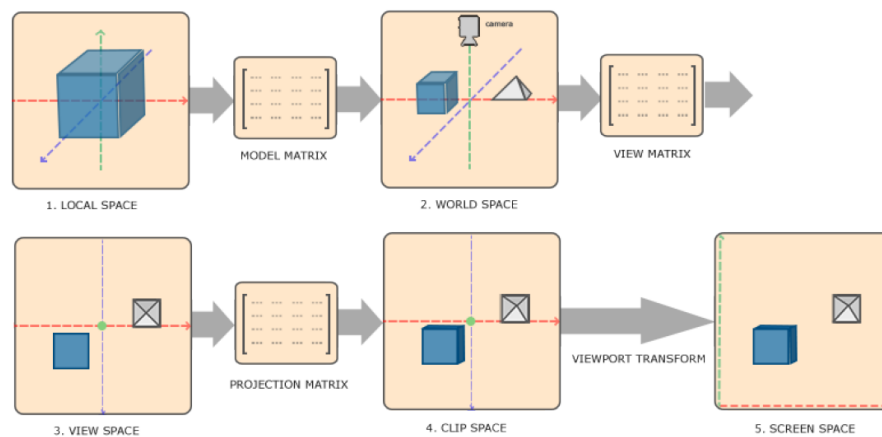


Figura 29 – Processo de transformações de coordenadas até o espaço final da tela.
Fonte: (VRIES, 2015)

4.10.1 Espaço local

As coordenadas em espaço local referem-se ao próprio espaço do objeto. Representam as coordenadas do objeto relativo à sua própria origem. Geralmente são normalizadas no formato NDC com origem no ponto $(0, 0)$.

//TODO: imagem de um objeto no local space.

4.10.2 Espaço de mundo

As coordenadas em espaço de mundo são obtidas através da multiplicação do espaço local pela matriz *model*. O resultado representa a posição do objeto no mundo relativo à origem do mundo. O processo de multiplicação do espaço local pela *model* escala, rotaciona e translada o objeto para o espaço de mundo através do processo chamado transformação afim.

Se todos os objetos fossem inseridos no mundo somente usando as coordenadas locais provavelmente todos estariam sobrepostos na origem. O processo de conversão para o espaço de mundo pode ser exemplificado por uma pilha de caixas onde se deseja inserir outra. Para empilhá-la é necessário escalá-la para o mesmo tamanho das outras, rotacioná-la para alinhar com as outras e caber no espaço vazio e, por fim, transladá-la para a posição na pilha.

//TODO: imagem exemplo ilustrando o processo de inserir a caixa.

4.10.3 Espaço de visão

O espaço de visão, também referenciado como espaço da câmera, é obtido a partir da multiplicação do espaço de mundo pela *view matrix* e representa o ponto de vista da câmera sobre o mundo.

//TODO: imagem exemplo

4.10.4 Espaço de recorte

Espaço de recorte é a zona visível na tela de forma que todos os pontos fora desse espaço são descartados. Para que o usuário não tenha de especificar todas coordenadas em um intervalo NDC desde o início do processo trabalha-se com dois sistemas de projeção responsáveis por converter do espaço de visão de volta para um intervalo NDC. São os dois sistemas: projeção ortográfica e projeção de perspectiva. Note que, se um triângulo possui apenas um parte visível e terá uma parte recortada o OpenGL divide esse triângulo em primitivas menores e então descarta aquelas que estão fora da tela, ou simplesmente, fora do intervalo NDC.

4.10.5 Projeção

Existem duas formas de aplicar a projeção. São elas projeção ortográfica e projeção de perspectiva.

4.10.5.1 Projeção ortográfica

//TODO: frustum - tronco de base paralela

Para especificar uma matriz de projeção ortográfica é necessário fornecer a largura, altura e comprimento do frustum. Dessa forma, todas as coordenadas que estiverem entre o retângulo formado pelo plano mais próximo e pelo plano mais distante serão apresentadas ao usuário. Todo o resto será recortado fora. //TODO: imagem do far e near plane

A projeção ortográfica mapeia linearmente coordenadas 3D diretamente para o plano 2D da tela, sem levar em consideração a perspectiva. Isso produz um efeito não realístico para ambientes 3D pois passa a impressão de objetos prensados na tela, sem profundidade.

//TODO: imagem do resultado de uma matriz orto

Para especificar a matriz ortográfica será utilizada a função do GLM definida a seguir. Os dois primeiros parâmetros são as coordenadas esquerda e direita do frustum, o terceiro e quarto parâmetro a parte de baixo e topo do frustum. Com esses quatro parâmetros definiu-se o tamanho do plano mais próximo e do plano mais distante. O quinto e sexto parâmetro indicam a distância entre os dois planos.

```
1 Mat4 projection = new Mat4();
2 projection = projection.ortho(float left, float right, float bottom, float top,
    float zNear, float zFar);
```

Algoritmo 4.24 – Função Ortho do GLM

//TODO: inserir imagem indicando parâmetros. Mais fácil visualizar

4.10.5.2 Projeção de perspectiva

A projeção de perspectiva simula a percepção humana de profundidade. Objetos mais distantes se tornam menores e a esse efeito é dado o nome de perspectiva. A matriz de projeção pode ser criada utilizando a seguinte função do GLM.

```
1 Mat4 perspective = new Mat4();
2 perspective = perspective.perspective(toRadians(45), width/height, near, far);
```

Algoritmo 4.25 – Função Perspective do GLM

4.10.6 jBox2D para espaço de mundo

Para trabalhar com os dois sistemas de medida (pixels e metros) basta selecionar um fator de escalonamento. Supondo um fator de 100, basta multiplicar por 100 para converter de metros para pixels e dividir por 100 para converter de pixels para metros.

4.11 Câmera

A classe câmera é responsável por manter, calcular e enviar o valor da matriz de visão para o uniform no shader. Ela é necessária pois, a partir de uma única classe fica fácil manipular em quem está o foco da câmera, aplicar efeitos como tremulação entre outras funções. É importante frisar que ela deve atualizar a variável uniform dentro do método `variableUpdate` para que seja utilizado o valor baseado na interpolação, caso contrário ela dará impressão de objetos travando como discutido na subseção de interpolação linear 4.3.1.

```
1 public class Camera {
2     private float x=0,y=0,z=0;
3     private Entity focus;
4     private Mat4 camera;
5     private Mat4 transform;
6     private EntityManager em;
7
8     public Camera(EntityManager em) {
9         this.em = em;
10        camera = new Mat4();
11        transform = new Mat4();
12        camera = camera.identity();
13    }
14
15    public void setFocusOn(Entity entity) {
16        focus = entity;
17    }
18
19    public void moveDirectTo(float x, float y) {
20        this.x = x;
21        this.y = y;
22        camera = camera.identity();
23        camera.translate(x, y,0);
24    }
25
26    public void move(float x, float y) {
27        this.x += x;
28        this.y += y;
29        camera = camera.identity();
30        camera.translate(this.x, this.y,0);
31    }
32
33    public void update(float deltaTime) {}
34
35    public void variableUpdate(float alpha) {
36        RenderComponent rc = ((RenderComponent)(em.getFirstComponent(focus,
37            RenderComponent.class)));
38        Vec2 position = rc.getRenderPosition();
39        Vec2 size = rc.getSize();
40
41        if(focus != null)
42            moveDirectTo(-position.x + 1280/2 - size.x/2, -position.y +720/2 -
43                size.y/2);
```

```

43         transform = transform.identity();
44         transform.translate(this.x, this.y, 0);
45
46         ResourceManager.getSelf().getShader("texture").use();
47         ResourceManager.getSelf().getShader("texture").setMat4("camera",
48             transform);
49
50         ResourceManager.getSelf().getShader("batchRenderer").use();
51         ResourceManager.getSelf().getShader("batchRenderer").setMat4("camera",
52             transform);
53     }
54
55     public float getX() {
56         return x*-1;
57     }
58
59     public float getY() {
60         return y*-1;
61     }
62
63     public Vec2 getPos() {
64         return new Vec2(x*-1, y*-1);
65     }
66 }

```

Algoritmo 4.26 – Mouse input

4.12 Sistema de input

O sistema de input é responsável por mapear botões de uma interface física como teclado, mouse e controle de videogame em ações dentro do jogo. Para não lidar diretamente com a interface de hardware a biblioteca GLFW apresenta uma abstração que realiza essa comunicação.

O conceito para implementar o mapeamento de input consiste em definir um mapa de ações que podem então ser associadas ao input do usuário. Dessa forma, se o usuário trocar o equipamento, suponha-se, de um teclado para um controle de videogame tudo que o sistema precisa fazer é associar os novos botões às ações. Por exemplo, a ação de pular no teclado é mapeada para a tecla espaço. Quando o usuário trocar para o controle de videogame o sistema mapeia a ação pular para o botão "X" do controle, por exemplo. Dessa forma abstrai-se a ação que o game object vai realizar do hardware que está sendo utilizado.

Entretanto, haverá casos que essa abstração não será suficiente e as ações serão mapeadas diretamente ao hardware em uso. Essa situação irá ocorrer, por exemplo, na interação com a interface onde o cursor do mouse não é diretamente mapeável para o joystick. Seria necessário implementar um pseudo cursor usando os botões analógicos do controle ou mapear o movimento de tecla em tecla ao invés de usar o conceito de ponteiro.

4.12.1 GLFW Keyboard

Para o controle do teclado é necessário primeiro definir uma classe que irá implementar o callback do GLFW. Nela será criado um vetor de booleanos que indica quais teclas estão pressionadas em determinado momento.

```
1 public class KeyboardControl extends GLFWKeyCallback implements Control {
2     private boolean keys[] = new boolean[512];
3
4     @Override
5     public void invoke(long window, int key, int scancode, int action, int mods)
6     {
7         keys[key] = action != GLFW.GLFW_RELEASE;
8     }
9
10    @Override
11    public boolean isKeyPressed(int key) {
12        return keys[key];
13    }
14
15    @Override
16    public boolean isKeyReleased(int key) {
17        return keys[key];
18    }
19 }
```

Algoritmo 4.27 – Keyboard input

A partir da classe KeyBoardControl é possível implementar então um HashMap que mapeia as teclas para ações que serão então utilizadas pelos game objects.

4.12.2 GLFW Mouse

De maneira similar o controle do mouse contém um vetor de booleanos indicando quais teclas estão sendo pressionadas e também um Vetor de duas coordenadas indicando sua posição na janela. Note-se que as coordenadas são calculadas considerando o canto superior esquerdo da janela como origem.

```
1 public class MouseControl extends GLFWCursorPosCallback implements Control{
2     private int previousState = -1;
3     private Vec2 cursorPos = new Vec2(0,0);
4
5     @Override
6     public boolean isKeyReleased(int key) {
7         int state = glfwGetMouseButton(Engine.getSelf().getWindow().getId(), key
8         );
9
10        if (state == GLFW_RELEASE)
11            return true;
12        else
13            return false;
14    }
15
16    @Override
```

```

16     public boolean isKeyPressed(int key) {
17         int state = glfwGetMouseButton(Engine.getSelf().getWindow().getId(), key
18             );
19
20         if (state == GLFW_RELEASE && previousState== GLFW_PRESS) {
21             previousState=state;
22             return true;
23         }else {
24             previousState=state;
25             return false;
26         }
27     }
28
29     @Override
30     public void invoke(long window, double xpos, double ypos) {
31         cursorPos.x = (float) xpos;
32         cursorPos.y = (float) ypos;
33     }
34
35     public Vec2 getCursorPos() {
36         return cursorPos;
37     }

```

Algoritmo 4.28 – Mouse input

4.12.3 GLFW Game Control

4.13 Gerência de recursos

O sistema de gerência de recursos é responsável por ler e salvar todos os arquivos da Engine. Em suma, esse sistema é responsável por centralizar todas as operações de I/O e gerenciá-las num único lugar de forma que seja evitado a ocorrência de dois arquivos idênticos em memória.

4.13.1 Chunk system

O sistema de chunks reparte toda a extensão do mapa em pequenos pedaços para uma maior facilidade de manuseio na hora de ler e salvar no disco. Outro fator determinante para a escolha deste formato é a necessidade de poder gerar um mapa infinito e com carregamento dinâmico, ou seja, sem telas de loading. Isso é possível repartindo o mapa em pequenos pedaços que serão gerados, lidos e escritos sobre demanda.

É importante notar que este é um sistema crítico e deve ser meticulosamente ajustado para as necessidades de cada projeto. Um arquivo muito grande pode gerar um atraso de leitura e escrita muito grande, enquanto um arquivo muito pequeno pode sobrecarregar o sistema com o overhead de muitas chamadas de função I/O num período curto de tempo. É necessário implementar este sistema utilizando técnicas de leitura e

escrita assíncronas de forma que a Engine não congele enquanto aguarda cada operação de I/O.

Com estes detalhes abordados a implementação se faz com duas classes principais: Chunk e ChunkManager.

//TODO: check class names

4.13.2 Chunk

O chunk contem todas as entidades que intersectam sua *bounding box* e as informações pertinentes do terreno como: textura, regiões etc. Ele é serializado para leitura e escrita em disco. Sendo assim, um conjunto n de chunks sendo carregados ao iniciar o jogo representam o último estado do jogo.

A geração da textura do mapa pode ser dinâmica, isto é, ser gerada a cada frame, ou estática, gerando-se uma única vez.

4.13.3 Chunk Manager

O Chunk manager fica responsável por gerenciar quais chunks devem ser lidos ou salvos. De maneira similar ao clipping do OpenGL o chunk manager verifica quais chunks estão visíveis na tela e partir disso, estando visível ele é lido e estando fora de visão ele é salvo e liberado da memória.

4.13.4 A classe Resource Manager

A classe responsável pela leitura e escrita desses arquivos segue o padrão de projeto Singleton, sendo assim facilmente invocada de qualquer lugar do código.

```
1
2 public final class ResourceManager {
3     private static ResourceManager self;
4     private static HashMap<String, Shader> shaders = new HashMap<String, Shader>();
5     private static HashMap<String, Texture> textures = new HashMap<String, Texture>();
6     private static HashMap<String, Audio> audio = new HashMap<String, Audio>();
7     private static HashMap<String, Font> fonts = new HashMap<String, Font>();
8     private static HashMap<String, Renderer> renderers = new HashMap<String, Renderer>();
9
10    private ResourceManager() {}
11
12    public static ResourceManager getSelf() {
13        if(self == null)
14            self = new ResourceManager();
15        return self;
16    }
```

```

17
18     public Audio loadAudio(String name, String audioPath) {
19         if(audio.containsKey(name))
20             return audio.get(name);
21         return audio.put(name, new Audio(audioPath));
22     }
23
24     public Audio getAudio(String name) {
25         return audio.get(name);
26     }
27
28     public Font loadFont(String name, String fontPath) {
29         if(fonts.containsKey(name))
30             return fonts.get(name);
31         return fonts.put(name, new Font());
32     }
33
34     public Font getFont(String name) {
35         return fonts.get(name);
36     }
37
38     public int playAudio(String name, Vec2 pos, float maxDistance) {
39         AudioSource a = new AudioSource(audio.get(name).getBufferPointer(), pos,
40             maxDistance);
41         a.play();
42
43         return a.getSourcePointer();
44     }
45
46     public Shader loadShader(String name, String vertexShaderPath, String
47         fragmentShaderFilPath, String geometryShaderPath) {
48         if(shaders.containsKey(name))
49             return shaders.get(name);
50         return shaders.put(name, loadShaderFromFile(vertexShaderPath,
51             fragmentShaderFilPath, geometryShaderPath));
52     }
53
54     public Texture loadTexture(String name, String imgPath) {
55         if(textures.containsKey(name))
56             return textures.get(name);
57         return textures.put(name, loadTextureFromFile(imgPath));
58     }
59
60     public Shader getShader(String name) {
61         return shaders.get(name);
62     }
63
64     public Texture getTexture(String name) {
65         return textures.get(name);
66     }
67
68     private Shader loadShaderFromFile(String vertexShaderPath, String
69         fragmentShaderPath, String geometryShaderPath) {
70         String vertexCode = null, fragmentCode = null, geometryCode = null;
71
72         try {
73             //Vertex Code

```

```

70     StringBuilder stringBuilder = new StringBuilder();
71     BufferedReader bufferedReader;
72
73
74
75     bufferedReader = new BufferedReader(new InputStreamReader(
76         this.getClass().getResourceAsStream("/") + vertexShaderPath)
77     ));
78     String line;
79
80     while((line = bufferedReader.readLine())!=null)
81         stringBuilder.append(line).append("\n");
82
83     bufferedReader.close();
84     vertexCode = stringBuilder.toString();
85
86     //Fragment Code
87     stringBuilder = new StringBuilder();
88
89     bufferedReader = new BufferedReader(new InputStreamReader(
90         this.getClass().getResourceAsStream("/") + fragmentShaderPath
91     ));
92
93     while((line = bufferedReader.readLine())!=null)
94         stringBuilder.append(line).append("\n");
95
96     bufferedReader.close();
97     fragmentCode = stringBuilder.toString();
98
99     //Geometry Code
100    if(geometryShaderPath!=null){
101        stringBuilder = new StringBuilder();
102        bufferedReader = new BufferedReader(new InputStreamReader(
103            this.getClass().getResourceAsStream("/") +
104                geometryShaderPath)
105        ));
106
107        while((line = bufferedReader.readLine())!=null)
108            stringBuilder.append(line).append("\n");
109
110        bufferedReader.close();
111        geometryCode = stringBuilder.toString();
112    }
113    } catch (IOException e) {
114        e.printStackTrace();
115    }
116
117    Shader shader = new Shader();
118    shader.compile(vertexCode, fragmentCode, (geometryCode==null)? null :
119        geometryCode);
120    return shader;
121
122 private Texture loadTextureFromFile(String imgPath) {
123     Texture t = new Texture("/"+imgPath);
124     return t;

```

```

124     }
125
126     public void setRenderer(String name, Renderer r) {
127         renderers.put(name, r);
128     }
129
130     public <T extends Renderer> T getRenderer(String name) {
131         return (T) renderers.get(name);
132     }
133 }

```

Algoritmo 4.29 – Classe Resource Manager

4.14 Áudio

A implementação de áudio foi feita utilizando outra biblioteca multiplataforma da Khronos, o OpenAL, voltada especificamente para áudio. Através dela é possível utilizar diversas funções para manipulação de áudio 3D numa maneira eficiente e ágil.

4.14.1 Integrando o OpenAL

O openAL usa conceitos similares aos que são empregados no OpenGL. Cria-se e vincula-se buffers para transferir e receber dados através da API. Sempre existe um único ouvinte por *audio context*, que representa a posição de onde todas as fontes serão escutadas. Para definir uma fonte de áudio é necessário primeiro carregar o áudio do arquivo. O OpenAL por padrão usa buffers com formato Modulação por Código de Pulso(PCM) em 8 ou 16 bits, mono ou stereo.

Para ler o arquivo e prepará-lo para inserção no buffer é necessário carregá-lo usando a biblioteca auxiliar STBVorbis, que acompanha o LWJGL. Lê-se o arquivo usando `this.getClass().getResourceAsStream`, em sequência aloca-se dois buffers de inteiro numa pilha, aonde salva-se a quantidade de canais, no caso, se é mono ou stereo, e a taxa de amostragem. Por fim usando um shortBuffer usa-se a função `stb_vorbis_decode_memory` para decodificar o áudio do arquivo.

```

1     String fileName = audioPath;
2     byte[] memory = null;
3
4     try {
5         int numberOfBytes = this.getClass().getResourceAsStream("/") +
6             audioPath).available();
7         memory = new byte[numberOfBytes];
8         this.getClass().getResourceAsStream("/") + audioPath).read(memory, 0,
9             numberOfBytes);
10
11     } catch (IOException e) {
12         e.printStackTrace();
13     }

```

```

12
13     stackPush();
14     IntBuffer channelsBuffer = stackMallocInt(1);
15     stackPush();
16     IntBuffer sampleRateBuffer = stackMallocInt(1);
17
18     ShortBuffer rawAudioBuffer = stb_vorbis_decode_memory(BufferUtilities.
        createByteBuffer(memory), channelsBuffer, sampleRateBuffer);
19
20     int channels = channelsBuffer.get();
21     int sampleRate = sampleRateBuffer.get();
22
23     stackPop();
24     stackPop();
25
26     int format = -1;
27     if(channels == 1) {
28         format = AL_FORMAT_MONO16;
29         System.out.println("mono");
30     } else if(channels == 2) {
31         format = AL_FORMAT_STEREO16;
32     }

```

Algoritmo 4.30 – Leitura do arquivo de áudio

A última etapa é gerar um openAL buffer e transferir os dados alocados em `rawAudioBuffer` no formato e taxa de amostragem escolhidos.

```

1     bufferPointer = alGenBuffers();
2     alBufferData(bufferPointer, AL_FORMAT_MONO16, rawAudioBuffer, sampleRate);

```

Algoritmo 4.31 – OpenAL Buffers

No gameloop ou na classe player define-se a posição do ouvinte com a função `allListener3f`.

```

1     PositionComponent playerPosComp = em.getFirstComponent(player, PositionComponent
        .class);
2     allListener3f(AL_POSITION, playerPosComp.getPosition().x, playerPosComp.
        getPosition().y, 0);

```

Algoritmo 4.32 – OpenAL Listener

5 Inteligência artificial

O sistema responsável pela IA da Engine é parte fundamental do sistema. Sem ela o jogo seria um conjunto de imagens estáticas distribuídas à esmo na tela. Em essência IA é aquilo que dá vida a todos os personagens do jogo, tornando-o dinâmico e interativo para o usuário. A IA é focada nas ações que um agente deve tomar, baseado nas condições atuais. A IA deve observar o ambiente, tomar decisões e então agir. Esse ciclo é descrito na literatura como Observar, Pensar e Agir ([SIZER, 2018](#)).

A implementação da IA de um game object pode ser feita usando diversas técnicas, desde clausulas if ou else até redes neurais. Entretanto, as mais comuns na indústria de jogos não envolvem técnicas com uso de treinamento pois o objetivo aqui não é uma IA ótima, mas sim uma capaz de desafiar e entreter o jogador. Outra restrição é que, para treinar a rede neural seria necessário alimentá-la com dados de muitos jogadores, algo impraticável no estágio de produção pois se quer o jogo está em numa etapa jogável.

Assim como o processo de renderização não pode demorar mais do que alguns milissegundos, o mesmo se aplica para a tomada de decisões da IA. Portanto, é fundamental que esta seja a mais rápida possível para que o jogador não experiencie travamentos na jogabilidade.

5.1 Utility AI

Em economia, *utility* é uma medida da satisfação relativa de, ou desejo de, consumo de vários bens e serviços. Dado essa medida, alguém poderá expressar o acréscimo ou decréscimo desta *utility*, e assim explicar o comportamento econômico em termos de tentativas para incrementar tal *utility*.

Incorporando esse conceito em IA pode-se delimitá-lo como o desejo de uma entidade em realizar determinada ação dado certo valor do utility, calculado com base no contexto em questão. Esse cálculo é realizado através de funções que recebem como parâmetro o contexto e dele extraem os valores que quantificam o ambiente. Por fim, o cálculo é realizado e indica o utility, ou o quão desejável, aquela ação é ([MARK; DILL, 2018](#)).

5.1.1 Processo de funcionamento

Para cada ação que o agente pode realizar é atribuída uma curva de pontuação. A função que gera essa curva recebe como parâmetros variáveis do ambiente que afetam essa ação. Por exemplo, um agente capaz de realizar três ações, atirar, abrigar-se e perseguir terá atribuído a cada uma dessas ações uma função de pontuação. Ao final, compara-se o

valor calculado (utility) das funções e o maior deles representa a ação dentre as três que será executada.

//TODO: imagem com o gráfico mostrando a interpolação das funções

Para a função de pontuação que calcula o score da ação atirar tem-se como parâmetros a distância do inimigo. Para a função de abrigar-se tem-se a distância do inimigo e a vida do agente como parâmetros. Supondo que cada ação seja calculada pelas funções:

- Atirar: $return 0.5$
- Abrigar-se: $return (vida - 1)^2$
- Perseguir: $return distancia^3$

A partir dessas funções é possível calcular qual utility será o maior para cada conjunto de parâmetros. Note ainda que todos os parâmetros estão normalizados no intervalo $[0, 1]$. Para normalizar a distância é necessário escolher um valor máximo e assim todo valor que excedê-lo será fixado em 1. O gráfico para cada função é dado a seguir.

//TODO: gráfico das funções

Sobrepondo as três funções pode-se ter uma melhor noção de qual comportamento irá se sobressair em cada situação para cada valor do parâmetro. Entretanto, vale lembrar que os valores de vida e distância são independentes e portanto as funções não necessariamente estarão no mesmo ponto do eixo X ao mesmo tempo. A tabela abaixo demonstra três situações em que, para cada conjunto de parâmetros tem-se uma ação que é decidida usando a maior utility.

Vida do agente : Distância até o inimigo :

Atirar Abrigar-se Perserquir 00 00

Por fim, o código de implementação é composto de três classes: Action, Consideration e ConsiderationTree. //TODO: good example <https://alastaira.wordpress.com/2013/01/25/at-a-glance-functions-for-modelling-utility-based-game-ai/> // <https://www.gamasutra.com/blogs/Jakob>

5.2 Pathfinding

Existem muitas maneiras de se implementar o algoritmo de pathfinding. Alguns funcionam muito bem para sistemas estáticos onde tem-se conhecimento do mundo enquanto outros nem tanto. Para ambientes dinâmicos não pode-se, por exemplo, assumir way-points estáticas com caminhos pré-calculados pois o ambiente muda a todo momento.

O processo de pathfinding no ambiente 2D consiste em primeiro mapear uma seção do mapa para uma matriz. Essa seção é geralmente a parte visível pela câmera mais um offset arbitrário. Para cada entidade que intersecta essa seção será feito um mapeamento da sua caixa de colisão para a matriz. Cada posição da matriz representa um retângulo de um tamanho arbitrário fixo. Note-se que, a não ser que todas as entidades do jogo possuam a mesma base comum com o tamanho do retângulo da matriz haverá um erro a se considerar. Por exemplo, se uma entidade com retângulo de 32x32 vai ser inserido em uma matriz cujo cada posição representa um retângulo de 10x10, na hora do mapeamento essa entidade vai ocupar 4x4 na matriz, tendo assim, para o algoritmo de pathfinding, um tamanho de 40x40. Esse exemplo pode ser melhor visualizado na figura a seguir.

//TODO: Imagem do desperdício gerado ao mapear entity para matriz de pathfinding.

Uma vez realizado o mapeamento tem-se uma matriz booleana representando quais pontos são transponíveis. A partir desse ponto basta implementar um algoritmo de busca como, por exemplo, o A estrela para percorrer a matriz e encontrar um caminho do ponto A para um ponto B. É importante levar em consideração que os objetos podem ocupar mais um nodo ao mesmo tempo devido ao seu tamanho variável e isso possui implicação direta na implementação do algoritmo de busca.

//TODO: img demonstrando a busca com mais de um nodo de tamanho

6 Procedural Content Generation

Procedural Content Generation (PCG) é o termo cunhado para descrever processos de geração de dados aleatórios ou pseudo-aleatórios em jogos. Esses dados são utilizados para criar regras que definem desde terrenos até modelos 3D de maneira algorítmica ao invés de manual.

6.1 Random noise

O conceito mais básico na construção de elementos baseados em PCG envolve a utilização de ruídos como fonte de dados pseudo-aleatória. Existem diversos algoritmos para obtenção de ruído pseudo-aleatório como, por exemplo, perlin noise, simplex noise e gradient noise. Há ainda técnicas que se utilizam de maneiras não determinísticas e implementam outras fontes de dados.

//TODO: good source: <https://thebookofshaders.com/12/> <http://pcgbook.com/>

6.1.1 Perlin noise

Perlin noise é um tipo de ruído gradiente concebido por Ken Perlin em 1983 //TODO: cite. O algoritmo tem início definindo um grid de dimensão n . O processo mais básico consiste em definir o grid com uma série de vetores gradiente, computar o produto escalar entre vetores gradiente de distância e então realizar uma interpolação entre esses valores.

6.2 Geração de terrenos

A geração de terreno utilizada na engine consiste em preencher um conjunto de matrizes com valores gerados por um tipo de ruído diferente. Cada um desses valores é então extraído da matriz e atribuído um significado baseado numa regra determinada pelo usuário. Por exemplo, para a geração de ruídos utilizando perlin noise o valor retornado geralmente está no intervalo $[-1,1]$. A partir disso pode-se atribuir um significado onde para todo valor gerado inferior a 0 representa água e todo valor acima de 0 representa terra. A partir disso a textura pode ser gerada ..

6.2.1 Florestas

7 Diagramas e panorama geral

7.1 Estrutura hierárquica das classes

Todas as classes até então desenvolvidas e abordadas se organizam da seguinte maneira no escopo global do projeto:

7.2 Estrutura dos arquivos e pacotes

A estrutura geral de arquivos e pacotes do projeto da Engine Narval é dada a seguir. Cada arquivo representa uma classe Java.

```
1 Engine
2     /ai
3         Action
4         AStar
5         Anode
6         Consideration
7     /audio
8         Audio
9         AudioSource
10    /controllers
11        Controller
12        PlayerController
13    /engine
14        Engine
15        GameState
16        PhysicsEngine
17        Settings
18        Window
19    /entity
20        /component
21            Component
22            PositionComponent
23            RenderComponent
24        SystemManager
25        PositionSystem
26        RenderSystem
27    /geometry
28        Rectangle
29        Segment
30    /graphic
31        Shader
32        Animation
33        Texture
34    /input
35        Control
36        JoystickControl
37        KeyboardControl
38        MouseControl
```

```

39     /logic
40         Camera
41         Chunk
42         ChunkMap
43         ReadingChunk
44         SavingChunk
45         Timer
46     /noise
47         FastNoise
48     /renderer
49         AnimationsManager
50         Renderer
51         TextureRenderer
52         BatchTextureRenderer
53     /ui
54         Font
55         Glyph
56     /utilities
57         ResourceManager
58         ArraysExt
59         BufferUtilities
60         Color
61         GLFWUtil
62         MathExt
63         QuadTree

```

Algoritmo 7.1 – Árvore de arquivos do projeto

8 Criação de um protótipo

8.1 Mecânicas

8.1.1 Sistema de caça ativa



Figura 30 – Jogador caçando um coelho com arco e flecha

O sistema de caça é dado pelo seguinte fluxo de ações:

1. Jogador avista animal em ambiente selvagem
2. Ao se aproximar o animal pode perceber sua presença. Caso seja notado, a presa irá executar uma animação indicando que está desconfiado.
3. Se o jogador continuar avançando o animal irá tentar fugir
4. Senão o jogador executa um ataque quando estiver ao alcance

8.1.2 Sistema de armadilhas

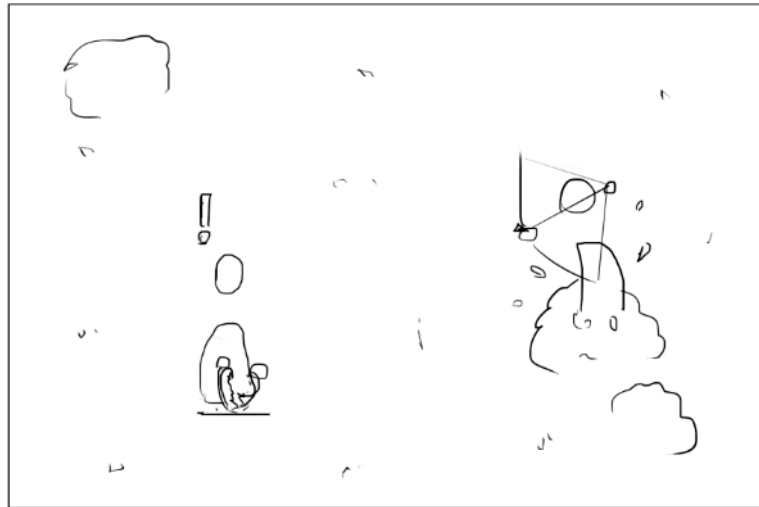


Figura 31 – Jogador pronto para atacar alvo que ficou preso na armadilha de chão

O sistema de armadilhas é dado pelo seguinte fluxo de ações:

1. Jogador aciona armadilha no local desejado
2. Qualquer animal ou inimigo pode acionar a armadilha e acionar o seu efeito

8.1.3 Sistema de Combate

O sistema de combate é delimitado pela arma escolhida. Cada arma implica em um estilo de combate totalmente diferente e só pode ser utilizada ao aprender esse estilo com um mestre. Os mestres podem ser encontrados aleatoriamente pelo mapa em grandes cidades de cada reino.

8.1.4 Sistema de apadrinhamento

Ao atingir um nível significativo de reputação o jogador pode tentar ganhar um apadrinhamento de um rei ou lorde. Ganhando assim uma quantia semanal e benefícios como alimento e teto para poder compor suas músicas.

8.1.5 Cantar músicas

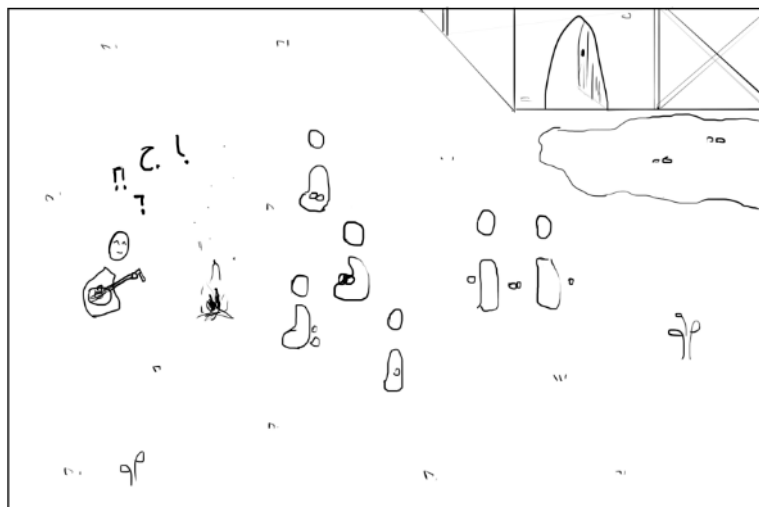


Figura 32 – Jogador cantando em um vilarejo



Figura 33 – Jogador sendo prestigiado após término da música

Cada vilarejo ou cidade tem um nível de interesse próprio em determinados instrumentos. Quanto maior o interesse, maior serão as chances de receber uma boa quantia em ouro pela apresentação. As músicas podem ser tocadas em fogueiras que o próprio jogador pode criar em volta da cidade, ou em tavernas, festivais e praças.

8.1.6 Compor músicas

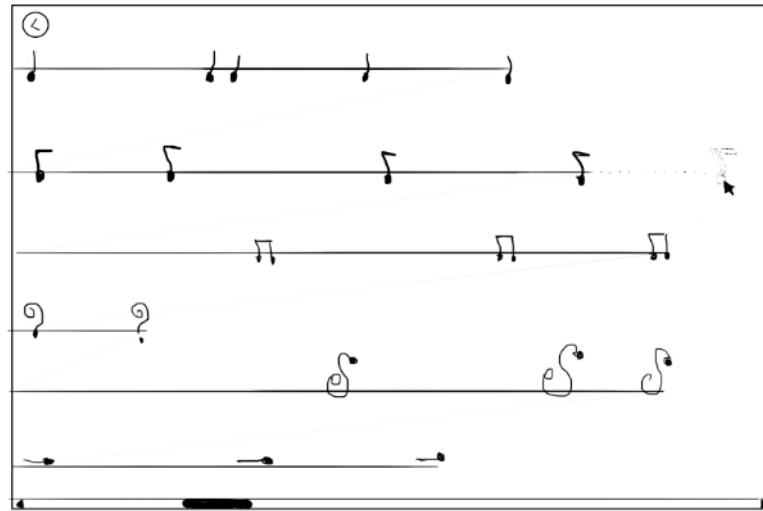


Figura 34 – Esboço do menu para compor músicas

ASD.

8.1.7 Contar histórias

ASD.

8.1.8 Compor histórias

ASD.

8.1.9 Atributos dos vilarejos e cidades

Cada cidade e vilarejo possui os seguintes atributos:

Lista de interesses instrumentais Cada vilarejo tem uma preferência por um instrumento. Quanto maior o interesse, maior a recompensa dada ao tocar músicas com aquele instrumento.

8.1.10 Atributos do jogador

Fome Ao longo do tempo o jogador precisa se alimentar para manter-se vivo. A fome é dividida em três estágios: Sem fome, fome controlável e faminto. Cada um dos estágios é apresentado ao jogador em forma de uma animação de andar diferente. Quanto mais faminto o personagem está mais lento e curvado ele irá andar, até que ela chegue em zero e culmine na morte do personagem.

8.1.11 Domar animais

Alguns animais podem ser domados através dos instrumentos. Basta cantar próximo a eles então eles serão domados.

9 Experimentos e resultados

9.1 Protótipo

O protótipo final construído utilizando a game engine demonstra suas principais funcionalidades em um pequeno jogo de exploração em um ambiente procedural 2D ambientado num mundo fantástico.

Nele pode-se caminhar através do cenário explorando novos

9.2 Otimizações e testes de desempenho

Perlin noise vs GPU? ou noiseSize text mult

Batch Rendering vs One draw call per object

Real time PCG x Loading chunk

Leitura assíncrona vs síncrona

10 Conclusão

Com a primeira versão da game engine finalizada é necessário agora realizar considerações finais. Um sistema dessa magnitude deve ser constantemente atualizado com novas tecnologias para manter-se relevante em um cenário competitivo como a indústria de jogos. A pesquisa permitiu produzir um extenso material em língua portuguesa acerca do tema, documentando e exemplificando cada etapa, desde a demonstração de possibilidades até a implementação de uma delas.

...

Referências

BUCKLAND, M. *Programming Game AI by Example*. [S.l.]: Wordware Publishin, 2005. Citado na página 16.

DICTIONARY, O. 2018. Disponível em: <https://en.oxforddictionaries.com/definition/artificial_intelligence>. Citado na página 15.

ECK, D. J. *Introduction to Computer Graphics*. 2018. Disponível em: <<http://math.hws.edu/eck/cs424/downloads/graphicsbook-linked.pdf>>. Citado na página 15.

GREGORY, J. *Game Engine Architecture*. [S.l.]: Taylor and Francis Group, 2009. ISBN 9781439865262. Citado 6 vezes nas páginas 5, 16, 19, 20, 21 e 25.

KHRONOS. *OpenGL Specifications*. 2017. Disponível em: <<https://www.khronos.org/registry/OpenGL/specs/gl/>>. Citado na página 15.

KHRONOS. *History of OpenGL*. 2018. Disponível em: <https://www.khronos.org/opengl/wiki/History_of_OpenGL#OpenGL_3.0_.282008.29>. Citado na página 27.

KHRONOS. *OpenGL Object*. 2018. Disponível em: <https://www.khronos.org/opengl/wiki/OpenGL_Object>. Citado na página 29.

KHRONOS. *OpenGL shader compilation*. 2018. Disponível em: <https://www.khronos.org/opengl/wiki/Shader_Compilation>. Citado na página 34.

MARK, D.; DILL, K. *Improving AI Decision Modeling Through Utility Theory*. 2018. Disponível em: <<http://www.intrinsicalgorithm.com/media/2010GDC-DaveMark-KevinDill-UtilityTheory.pdf>>. Citado na página 69.

MCDONALD, E. *The Global Games Market Will Reach \$108.9 Billion in 2017 With Mobile Taking 42%*. 2017. Disponível em: <<https://newzoo.com/insights/articles/the-global-games-market-will-reach-108-9-billion-in-2017-with-mobile-taking-42/>>. Citado na página 13.

NYSTROM, R. *Game Programming Patterns*. [S.l.]: Genever Benning, 2014. ISBN 0990582906. Citado na página 24.

OPENGL. *About OpenGL*. 2017. Disponível em: <<https://www.opengl.org/about/>>. Citado na página 15.

SCRATCHAPIXEL. *The Phong Model, Introduction to the Concepts of Shader, Reflection Models and BRDF*. 2018. Disponível em: <<https://www.scratchapixel.com/lessons/3d-basic-rendering/phong-shader-BRDF>>. Citado na página 45.

SHAKER, N.; TOGELIUS, J.; NELSON, M. J. *Procedural Content Generation in Games*. [S.l.]: Springer, 2016. Citado na página 16.

SIZER, B. *The Total Beginner's Guide to Game AI*. 2018. Disponível em: <<https://www.gamedev.net/articles/programming/artificial-intelligence/the-total-beginners-guide-to-game-ai-r4942/>>. Citado na página 69.

VRIES, J. de. *Learn OpenGL*. 2. ed. [s.n.], 2015. Disponível em: <<https://learnopengl.com/book/offline%20learnopengl.pdf>>. Citado 5 vezes nas páginas 5, 15, 27, 30 e 57.

WENDERLICH, R. *Introduction to Component Based Architecture in Games*. 2018. Disponível em: <<https://www.raywenderlich.com/2806-introduction-to-component-based-architecture-in-games>>. Citado na página 52.

WIKI, P. 2018. Disponível em: <<http://pcg.wikidot.com/>>. Citado na página 16.