|  |
| --- |
| Universidad de Oviedo |
| Motor de videojuegos con OpenGL y arquitectura Entity Component System |
| Trabajo de Fin de Grado |

|  |
| --- |
| Valentin Dumitru  [Fecha] |

A picture containing diagram

Description automatically generated

|  |  |
| --- | --- |
| Motor de videojuegos con OpenGL y arquitectura Entity Component System  Trabajo de Fin de Grado | **Abstract**  Este proyecto consiste en el desarrollo de un motor de un videojuego simple, cuyo objetivo es la generación de terreno de forma procedural. Con un enfoque en la eficiencia, extensibilidad y buenas prácticas.  **Autor**  Valentin Dumitru  Y1746034A  UO277867  **Grado**  **INGENIERÍA INFORMÁTICA DEL SOFTWARE**  **Tutor**  Benjamín López Pérez  **Palabras Clave**  OpenGL, SDL, Terreno Procedural, Motor gráfico, Motor de Videojuegos, Motor |
|  |  |

# Índice

# Índice de contenidos

# Índice de tablas

# Memoria del proyecto

## Resumen de la motivación, objetivo y alcance del proyecto.

La motivación de este pro

## Resumen de todos los aspectos

# Introducción

## Justificación del proyecto

La principal justificación del proyecto proviene de la necesidad de satisfacción de un sueño a la par con la necesidad de un reto.

Desde que era niño tenía como meta conseguir hacer por mí mismo algo parecido a los juegos que tanto me impresionaban. Y qué mejor forma que hacerlo a lo grande, estudiándome los cimientos más profundos de lo que es “un sistema multimedia interactivo de tiempo real suave que utiliza pantallas gráficas y audiovisuales, dispositivos de entrada del usuario y algoritmos computacionales para generar y administrar un entorno virtual o simulación”, es decir, un **Videojuego**.

Otra justificación, que descubrí más bien a posteriori, es la implementación de un motor que implemente una arquitectura Entity Component System que sea lo más fiel posible a su motivación, que es la programación orientada a datos (Data Driven Programming), pero, a su vez, manteniendo un estilo orientado objetos (Object Oriented Programming), conservando la elegancia y la mantenibilidad.

El principal problema de hacerlo utilizando OOP para la creación de entidades, sistemas y componentes es que son incompatibles. La separación de datos de la funcionalidad es totalmente contraria a un buen diseño OOP. Pero juntar datos y funcionamiento no será mi meta, si no dar una interfaz al usuario para utilizar las entidades como si de objetos que encapsulan datos se tratara y por debajo, jugar con la potencia de la programación orientada a datos.

La siguiente justificación es la fantasía y romance de crear un terreno propio. ¿Quién no desearía poder imaginar la realidad desde cero y hacer que el horizonte se vea a su merced? Pues eso lograré con este proyecto, fundar las bases de mi mundo para luego crear mi mundo, como si de Atlas se tratase.

Podría añadir como ultima justificación, el deseo de aprender cómo utilizar herramientas de desarrollo gráficos. Aprender el pipeline gráfico y aprender herramientas como OpenGL es también algo que me fascina. Tiene grandes utilidades y no se enseña de ninguna forma en nuestro grado, y pienso que es parecido a un arte. Un arte muy complejo, pero eso lo hace mejor.

## Alcance del proyecto

El alcance será explicado a continuación en distintos apartados estructurados.

### Interfaz de usuario

El nivel más superficial de este proyecto será la interfaz o el Front End para el usuario o game developer. Esta interfaz será, en la medida de lo posible, orientada a objetos. Se buscará que sea sencilla, con poca curva de aprendizaje y que facilite lo máximo posible la programación con patrones Entity Component System. De esta manera, el usuario deberá poder crear sus propios sistemas y componentes de forma sencilla.

### Componentes y Sistemas

El motor deberá incluir unos sistemas y componentes nucleares para permitir un funcionamiento básico que cualquier motor de videojuegos debe proporcionar. Esto incluye:

1. Sistema de renderizado: La renderización de entidades con mallas (meshes) y sombras (shaders).
2. Sistema de físicas: El cálculo de físicas de las entidades según distintos tipos (estática o dinámica):
3. Sistema de inputs: La facilidad de proporcionar funcionalidad a las entradas del usuario por teclado (key inputs).
4. Transformaciones: Deberá incluir componentes para las entidades para permitir.

### Funcionalidad nuclear

El motor deberá proporcionar unas interfaces núcleo para que los sistemas puedan utilizarlos, ya que la capa ECS deberá ser independiente de la tecnología para facilitar reutilización.

#### Renderización

El motor deberá proporcionar un motor de renderización flexible para poder cambiar APIs de renderizado a la hora de compilar el juego. También deberá permitir la generación programática de mallas (meshes)

#### Inputs

El motor deberá proporcionar un gestor de inputs utilizando SDL.

#### Físicas

El motor deberá proporcionar un motor de físicas para calcular distintos de forma flexible la posición de las entidades dinámicas, incluyendo colisiones y gravedad.

#### Sonidos

El motor deberá facilitar la reproducción de sonidos y música.

#### Depuración

El motor también deberá facilitar la depuración del juego mediante una consola, un cuadro de listado de entidades, un cuadro de información y depuración de entidades y un listado de estadísticas básicas.

### Arquitectura

El motor deberá seguir una arquitectura con capas desacopladas, mantenibles, extensibles y con inversión de dependencias.

Entre estas capas deberá existir una capa de independencia del sistema, para poder compilar el juego en cualquier sistema operativo.

## Estudio de la situación actual

### Evaluación de sistemas similares

#### Unity

##### ECS

Unity usa en su arquitectura pseudo ECS [1], solo que, en su caso, los datos están encapsulados en chunks, por lo que no aprovecha tan eficientemente la localidad. Pero es mucho más eficiente que hacerlo de forma OOP convencional.

Además, la arquitectura ECS de Unity no es pura, ya que, en este caso, los componentes pueden tener (y tienen) funcionalidad. Cosa que rompe uno de los beneficios de ECS que es la reusabilidad.

Un sistema básico en Unity tiene este ejemplo de código:

1. Entities.ForEach((ref Translation translation,

3. in Velocity velocity) =>

4. {

5. translation.Value += velocity.Value;

6. })

7. .Schedule();

Graphical user interface, diagram

Description automatically generated

Ilustración 1: Ejemplo de interacción entre entidades, componentes y sistemas en Unity

##### Tecnologías

Unity utiliza como base del motor grafico DirectX, Vulkan o OpenGL / OpenGL ES, se puede configurar a deseo del desarrollador.

Está por debajo escrito con C++.

Tiene lenguaje de scripting en C# que luego se traduce a C++, el cual permite crear “componentes” los cuales tienen funcionalidad y datos.

Permite uso de shaders personalizados.

Destaca por tener una amplia documentación, muy buena comunidad y una gran cantidad de assets.

#### Unreal Engine

##### ECS

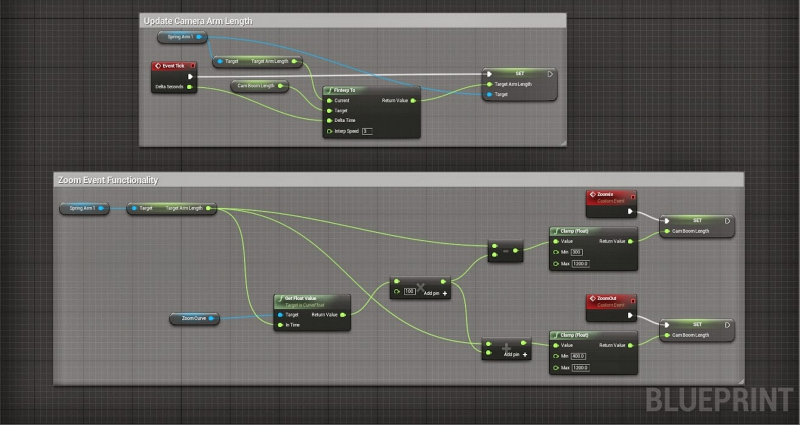
UE utiliza hoy en día Entity Component, no Entity Component System[2]. En esta arquitectura, los componentes aparte de contener los datos, contienen la funcionalidad. Se pierde parte de reusabilidad con esta arquitectura, pero es más fácil de entender para posibles desarrolladores y artistas.

Hay tecnologías de terceros que ayudan a implementar una arquitectura ECS pura como por ejemplo Apparatus ECS o EnTT.

##### Tecnologías

Unreal Engine utiliza como base de renderización APIs como DirectX 12, Vulkan, Metal, OpenGL y OpenGL ES.

UE utiliza visual scripting para el desarrollo de la lógica, llamado internamente Blueprints. Son nodos y uniones entre nodos para generar código.



Destaca por tener una de las mejores tecnologías de gráficos del mercado, incluyendo Nanite Virtualized Geometry y Lumen Global Illumination.

#### Godot

##### ECS

Godot no sigue una arquitectura ECS[3]. Godot utiliza una arquitectura más tradicional OOP, la que consta de nodos que contienen datos y lógica, y uso intenso de herencia. También usa composición, pero a más alto nivel.

Para mostrar el funcionamiento de un botón en Godot, se proporciona un ejemplo en su artículo hablando de este tema[3]

‘As an example of the difference, in typical ECS, a Button entity can have components like:

* Transform
* Renderer
* EventHandler
* Button
* Behavior

To make it simpler and avoid problems, some implementations force some components to exist when others are added.

In Godot, a Button has the full inheritance chain implicit:

Node -> CanvasItem -> Control -> Button -> Behavior Script’

(“Why isn't Godot an ECS-based game engine? - Godot Engine”)

¿Qué significa esto para Godot? Según su artículo, esto mejora la comprensión de una escena, la reusabilidad y no tiene impacto a la eficiencia. Esto último es porque su arquitectura de herencia es de más alto nivel, ya que por debajo sigue trabajando con una arquitectura enfocada a los datos “data driven”.

‘Godot uses plenty of data-oriented optimizations for physics, rendering, audio, etc. They are, however, separate systems and completely isolated.’ (“Why isn't Godot an ECS-based game engine? - Godot Engine”)

En conclusión, proporciona una interfaz OOP, pero por debajo trabaja con datos de forma eficiente casi como una arquitectura ECS.

##### Tecnologías

Godot soporta Vulkan por el momento, según su artículo hablando de este tema, OpenGL todavía no esta funcional, pero se tiene como plan de desarrollo para el futuro[4].

Godot utiliza un lenguaje de scripting propio, llamado GDScript.

Destaca por tener uno de los mejores motores de desarrollo 2D del mercado.

#### EnTT

EnTT es una librería de ECS de código abierto, escrita en C++ de solo cabeceras[5]. Esta librería es extensamente usada en grandes videojuegos como Minecraft.

#include <entt/entt.hpp>

struct position {

float x;

float y;

};

struct velocity {

float dx;

float dy;

};

void update(entt::registry registry) {

auto view = registry.view<const position, velocity>();

// use a callback

view.each([](const auto &pos, auto &vel) { /\* ... \*/ });

// use an extended callback

view.each([](const auto entity, const auto &pos, auto &vel) { /\* ... \*/ });

// use a range-for

for(auto [entity, pos, vel]: view.each()) {

// ...

}

// use forward iterators and get only the components of interest

for(auto entity: view) {

auto &vel = view.get<velocity>(entity);

// ...

}

}

int main() {

entt::registry registry;

for(auto i = 0u; i < 10u; ++i) {

const auto entity = registry.create();

registry.emplace<position>(entity, i \* 1.f, i \* 1.f);

if(i % 2 == 0) { registry.emplace<velocity>(entity, i \* .1f, i \* .1f); }

}

update(registry);

}

Se puede observar cómo, utilizando esta librería se pueden crear entidades, dotar de componentes y modificar estos componentes, gracias a la clase ‘registry’.

### Evaluación de alternativas de desarrollo

#### ECS e interfaz

##### Herencia combinada a la programación orientada a datos

Una posible alternativa sería utilizar herencia, como en el caso de Godot[3]. En lugar de usar componentes se usaría herencia, una entidad si se deseara que tuviera la capacidad de “transform”, se heredaría de la clase Transform. Y para gestionar las entidades se podrían usar distintos módulos que guardan las entidades con datos parecidos y las procesan.

Class Entity : public Transformable, public Renderable{

…

}

Class Renderer{

public:

void update(){

for(Renderable entity: entitiesToRender){

entity.render();

}

}

}

##### Uso de programación estructurada en lugar de instanciación

La idea de este motor es poder crear clases mediante objetos.

Entity entity = Entity();

entity.addComponent<Transform>();

Pero se podría de igual forma utilizar una forma más estructural como en el caso de EnTT. .

Entity entity=Glesc::createEntity();

Glesc::attachComponent<Transform>(entity);

Transform& transform = Glesc::getComponent<Transform>(entity);

##### Arquitectura codificada vs arquitectura meta codificada

En numerosas ocasiones se ha utilizado interfaces y programación orientada a objetos para estructurar las capas de la arquitectura.

class GDIFactory {  
public:  
 enum class GraphicsAPI {  
 OPENGL,  
 VULKAN

};  
 static std::unique\_ptr<GraphicsInterface> createInterface(GraphicsAPI api) {  
 switch(api) {  
 case GraphicsAPI::OPENGL:  
 return std::make\_unique<OpenGLGDI>();  
 case GraphicsAPI::VULKAN:  
 return std::make\_unique<VulkanGDI>();  
 default:  
 throw std::invalid\_argument("Invalid GraphicsAPI type");  
 }  
 }  
};

De igual forma se podría utilizar las templates de c++ para generar en tiempo de compilación el código deseado.

template<typename GraphicAPI>

class Engine {

private:

GraphicAPI api;

public:

Engine() {

api.init();

api.setClearColor(0.0f, 0.0f, 0.0f, 1.0f);

//... other setup code

}

void draw() {

api.clear();

//... draw scene

api.swapBuffers();

}

};

// Usage

Engine<OpenGLGDI> engineWithOpenGL;

Engine<VulkanGDI> engineWithVulkan;

Esto conllevaría bastantes implicaciones en el producto final.

Desventajas:

Lo primero más destacable es que el tiempo de compilación aumentaría considerablemente, esto es porque el uso de templates conlleva reemplazo de código en todos los lugares que se utiliza, por lo que, en caso de un proyecto extenso, sería muy notable.

Tambien aumentaría la curva de aprendizaje, sobre todo a las personas que no están acostumbradas a la programación con templates, esto es porque la programación con templates es más difícil de entender a simple vista y generalmente no es muy intuitiva.

Ventajas:

Aumentaría el rendimiento ya que en lugar de hacer indirecciones para buscar en vtables simplemente se reemplaza el código mediante inlining. Pero con las nuevas tecnologías esto en general sería imperceptible porque los procesadores saben predecir de forma consistente las branches.

#### Tecnologías

##### Implementar Vulkan o DirectX en lugar de OpenGL como API gráfica.

La desventaja de esto es que no podrá ejecutarse en todos los sistemas ya que DirectX es solo para Windows y Vulkan es aun una API muy joven y no todos los sistemas la soportan.

La ventaja sería que son mas eficientes, dado que Vulkan es de mas bajo nivel y mas moderna que OpenGL y DirectX es especifica a Windows y está creado específicamente para funcionar de forma eficiente dentro del entorno Windows.

##### Uso de Visual Studio Code o Microsoft Visual Studio en lugar de CLion

Elegir esto tendría un impacto mas grande de lo que podría parecer. En primer lugar, utilizar Visual Studio Code permite utilizar tanto Make o CMake como herramientas de automatización de builds, Microsoft VS no permite utilizar ninguno ya que tiene el suyo propio en su entorno y CLion solo permite utilizar CMake ya que esta integrado dentro de él.

La decisión al final es por gusto personal, pero a mi gusto CLion es el mas moderno y cómodo. Microsoft VS tiene muchas ventajas al igual que VSC. Como por ejemplo MVSC tiene un profiler muy potente y VSC tiene plugins muy potentes y mucha customización.

##### Uso de Make en lugar de CMake

Make y CMake son herramientas de automatización de builds.

CMake es una herramienta de más alto nivel que Make que proporciona una forma más flexible y cross-platform de construcción de proyectos C++. CMake además funciona de forma sencilla con CLion, que es la IDE que se ha usado para este proyecto. CMake permite añadir de forma cómoda y, gracias a CLion, automática los ficheros para incluir, enlazar y de código fuente al comando de construcción final. También permite elegir versión de C++ de forma más abstraída entre otras capacidades.

Código de Makefile:

#---------------------------------------------  
# Builds the executable game  
build:  
 echo "Building..."  
 $(CXX) $(CXXFLAGS) $(INCFLAGS) $(LDFLAGS) $(LDLIBS) $(OBJFLAGS) $(SRC\_FILES)

Código de CMake:

cmake\_minimum\_required(VERSION 3.24)

project(TFG\_\_\_OpenGL\_Engine)

set(CMAKE\_CXX\_STANDARD 17)  
  
include\_directories(include)  
include\_directories(include/core)

…

add\_executable(TFG\_\_\_OpenGL\_Engine  
 include/ecs/components/CameraComponent.h  
 include/ecs/components/ComponentArray.h

…)

En este caso, elegir CMake fue una restricción autoimpuesta más que una decisión, dado que mi decisión fue utilizar CLion como IDE y CLion necesita del uso de CMake para poder depurar ya que CLion depende de CMake. Técnicamente se podría hacer con Make (que es lo que intente inicialmente) pero no permite de ninguna forma la depuración con el IDE. Podría utilizar herramientas externas de depuración a la vez que Make, pero decidí no hacerlo y seguir con CMake.

# Aspectos teóricos

### Conceptos

#### Matemáticas

##### Álgebra

###### Introducción

Para renderizar una escena en un dispositivo son necesarias una base matemática muy importante. Es necesario comprender las bases algebraicas qué es un vector, una matriz, de cómo funciona una base vectorial, una proyección, una transformación entre otras cosas. A continuación, se explicará de forma superficial estos conceptos. Para un conocimiento más detallado, se recomienda leer las fuentes [6], [7], [8], [9].

###### Vector

Un vector es una entidad matemática que tiene tanto magnitud (longitud) como dirección. En el contexto del álgebra lineal y la geometría, un vector se representa comúnmente como una secuencia ordenada de números, llamados componentes. Cada componente del vector corresponde a una dimensión del espacio en el cual el vector reside.

Representación

En un espacio n-dimensional, un vector v puede representarse como:

Donde son los componentes del vector

Propiedades Principales

1. **Magnitud**: La longitud del vector, calculada como:
2. **Dirección**: La orientación del vector en el espacio. En dos dimensiones, por ejemplo, la dirección puede describirse mediante un ángulo respecto a un eje de referencia.
3. **Operaciones con Vectores**:

* **Suma de Vectores**: Dados dos vectores y su suma es:

**Producto por un Escalar**: Dado un escalar y un vector el producto es:

* **Producto Escalar (Dot Product)**: Dados dos vectores , su producto escalar es:

**Producto Cruzado (Cross Product)**: En tres dimensiones, el producto cruzado de dos vectores **u** y **v** es otro vector perpendicular a ambos:

###### Base Vectorial

A diagram of a mathematical equation

Description automatically generatedUna base vectorial es un conjunto de vectores de igual número que dimensiones que son linealmente independientes entre sí. Estos vectores se denominan vectores base.

Las bases vectoriales son muy importantes a la hora de crear motores 3D ya que nos permiten crear cualquier vector a partir de operaciones entre sí.

###### Base Ortonormal

A diagram of a mathematical equation

Description automatically generatedUna base ortonormal, como indica el nombre, es una base cuyos vectores están a 90 grados entre sí y su longitud es ||**v**|| = 1 (como se puede observar en [Ilustración 3]). Esta base es especialmente útil en el contexto de la renderización gráfica, ya que nos ayuda a representar cualquier vector utilizando coordenadas cartesianas, es decir, dos números reales.

Ilustración 2: Dos vectores linealmente independientes pueden generar cualquier vector.

Ilustración 3: Base ortonormal formada por **y** y por **x** generando un vector **c**.

Cualquier vector se podría representar como: **.**

Donde e son números reales en coordenadas cartesianas y forman un vector bidimensional.

En motores 3D, la base ortonormal sería los vectores **.**

###### Sistema de coordenadas

Un sistema de coordenadas es un marco matemático que se utiliza para definir y describir la posición de puntos en un espacio. Los sistemas de coordenadas son fundamentales en gráficos por computadora y en la representación de objetos en el espacio tridimensional. Hay distintos tipos de sistemas de coordenadas, entre ellos los más importantes son:

* Coordenadas Cartesianas
* Coordenadas Polares
* Coordenadas Esféricas
* Coordenadas Cilíndricas

Pero por relevancia a este proyecto solo se explicará las coordenadas cartesianas.

Sistema de Coordenadas Cartesianas

El sistema de coordenadas cartesianas es uno de los más utilizados debido a su simplicidad y versatilidad. En este sistema, cada punto en el espacio se define mediante un conjunto de valores numéricos llamados coordenadas.

Ejes Coordenados

En tres dimensiones, el sistema de coordenadas cartesianas se basa en tres ejes perpendiculares entre sí:

* **Eje** : Representa la dimensión horizontal.
* **Eje** : Representa la dimensión vertical.
* **Eje** : Representa la dimensión de profundidad.

Estos ejes se cruzan en un punto denominado **origen**, cuyas coordenadas son

Representación de Puntos

Un punto en el espacio tridimensional se describe mediante un conjunto ordenado de tres números , donde:

* es la distancia a lo largo del eje .
* es la distancia a lo largo del eje .
* es la distancia a lo largo del eje .

Por ejemplo, el punto se encuentra a 3 unidades a lo largo del eje , 4 unidades a lo largo del eje y 5 unidades a lo largo del eje .

Distancia y Magnitud

La distancia entre dos puntos y en el espacio se calcula usando la fórmula:

La magnitud o longitud de un vector se calcula como:

Operaciones con Vectores

* **Suma de Vectores**: Dados dos vectores y , su suma es:
* **Producto por un Escalar**: Dado un escalar y un vector , el producto es:
* **Producto Escalar (Dot Product)**: Dados dos vectores u y v, su producto escalar es:
* **Producto Cruzado (Cross Product)**: En tres dimensiones, el producto cruzado de dos vectores y es otro vector perpendicular a ambos:

###### Matriz

Una matriz es una entidad matemática rectangular que organiza números, símbolos o expresiones en filas y columnas. Las matrices son una herramienta fundamental en álgebra lineal, utilizadas para representar transformaciones lineales, sistemas de ecuaciones lineales y más. Cada elemento de la matriz se denomina componente, y cada posición en la matriz se puede identificar mediante índices.

Representación

Una matriz A de dimensiones ( filas y columnas) se representa de la siguiente manera:

Donde ​ es el elemento en la fila y la columna .

Propiedades principales

1. Transposición: La transposición de una matriz se denota por y se obtiene intercambiando las filas y columnas de .
2. Determinante

Para el cálculo de determinantes requiere formulas mas complejas para distintas dimensiones. [Aquí](http://ceca.uaeh.edu.mx/algebra_lineal/tema2.html) hay una página que explica de forma detallada los distintos modos de hallar el determinante de una matriz.

1. Operaciones con Matrices
2. Suma de Matrices Dos matrices y de la misma dimensión se suman elemento a elemento
3. Producto por un Escalar: El producto de una matriz por un escalar se obtiene multiplicando cada elemento de por .
4. Producto de matrices: El producto de dos matrices (de dimensiones ) y (de dimensiones ) es otra matriz (de dimensiones ), donde cada elemento ​se calcula como:
5. Matriz identidad:

###### Matrices de Modelo, Vista y Proyección

Las matrices de modelo, vista y proyección son herramientas fundamentales en gráficos por computadora para transformar coordenadas de vértices desde su espacio local hasta el espacio de la pantalla. Estas matrices permiten aplicar transformaciones como traslaciones, rotaciones y escalados, así como definir la perspectiva desde la cual se observa la escena.

Matrix de Modelo

La matriz de modelo se utiliza para transformar las coordenadas de los vértices de un objeto desde su espacio local hasta el espacio del mundo. Esta matriz aplica transformaciones como traslaciones, rotaciones y escalados al objeto.

Se obtiene mediante la combinación de la matriz de translación, de rotación y de escalado, de la siguiente manera:

Donde T es la matriz de translación, R la de rotación y S la matriz de escalado.

Éstas se obtienen de la siguiente manera:

Matriz de Translación

La matriz de traslación para desplazar un objeto en el espacio se representa como:

Donde , y ​ son las distancias de traslación en los ejes , y respectivamente.

Matriz de Rotación

La rotación alrededor de los ejes , y se representa con las matrices de rotación ​, ​ y ​:

Donde es el ángulo de rotación.

Matriz de Escalado

La matriz de escalado se utiliza para cambiar el tamaño de un objeto:

Donde , y son los factores de escala en los ejes , y .

Matriz de Vista

La matriz de vista transforma las coordenadas desde el espacio del mundo al espacio de la cámara. Esta matriz se encarga de situar y orientar la cámara en la escena, definiendo desde dónde se observa la escena y en qué dirección.

Para calcular la matriz de vista, se pueden emplear varias formas. Una de ellas es utilizando la matriz LookAt (Mirar Hacia), que se define a partir de tres vectores: la posición de la cámara , el punto de referencia y el vector arriba up **.**

La matriz de vista V se construye entonces como:

Matriz de proyección

La matriz de proyección transforma las coordenadas desde el espacio de la cámara al espacio de proyección. Existen dos tipos principales de matrices de proyección: perspectiva y ortográfica. Por su relevancia al proyecto y complejidad, solo se explicará la de perspectiva.

Matriz de perspectiva

La proyección en perspectiva hace que los objetos más alejados se vean más pequeños, emulando la forma en que el ojo humano percibe la profundidad.

Donde:

* es el ángulo de campo de visión.
* es la relación de aspecto ( de la visión de la cámara.
* y son las distancias al plano cercano y lejano de la cámara.

##### Geometría

En esta sección, exploraremos los conceptos fundamentales de la geometría euclidiana, la cual es una rama de la matemática que estudia las propiedades y relaciones de puntos, rectas y planos en el espacio. La geometría euclidiana se basa en los postulados establecidos por el matemático griego Euclides y es la base de la mayoría de las aplicaciones geométricas utilizadas en gráficos por computadora, modelado 3D, y muchos otros campos de la ciencia y la ingeniería.

###### Punto

Un punto es una entidad geométrica fundamental que no tiene dimensiones: ni longitud, ni área, ni volumen. En otras palabras, un punto define una posición específica en el espacio. En geometría, los puntos se utilizan como la base para definir otras figuras geométricas.

**Representación:**

* En una dimensión (línea), un punto se representa como .
* En dos dimensiones (plano), un punto se representa como .
* En tres dimensiones (espacio), un punto se representa como .

Por ejemplo, el punto en el plano bidimensional se encuentra en la coordenada y .

###### Recta

Una recta es una figura geométrica unidimensional que se extiende infinitamente en ambas direcciones. Se define por dos puntos y se caracteriza por su dirección. La recta se puede definir en cualquier cantidad de dimensiones, pero por relevancia al proyecto, solo se define en 3 dimensiones.

**Ecuación vectorial en tres dimensiones:**

* Una recta en el espacio tridimensional se puede representar mediante un punto y un vector director :

Donde es la posición de cualquier punto en la recta, es un punto conocido en la recta, y es un parámetro real.

###### Plano

Un plano es una figura geométrica bidimensional que se extiende infinitamente en todas las direcciones dentro de su dimensión. Se define por tres puntos no colineales o por un punto y un vector normal. Al igual que la recta, se puede definir en cualquier cantidad de dimensiones, pero solo es relevante en tres.

**Ecuación general del plano en tres dimensiones:**

Donde son los coeficientes que definen la orientación del plano y es una constante.

**Ecuación a partir de un punto y un vector normal:**

Dado un punto ​ en el plano y un vector normal , la ecuación del plano es:

###### Poliedro

Un poliedro es una figura geométrica tridimensional que está formada por un conjunto de polígonos planos, llamados caras, que se unen a lo largo de sus bordes. Los puntos donde se encuentran las caras se llaman vértices, y las líneas donde se unen las caras se llaman aristas. Los poliedros son fundamentales en la geometría euclidiana y se utilizan ampliamente en modelado 3D, gráficos por computadora y arquitectura.

Tipos de Poliedros

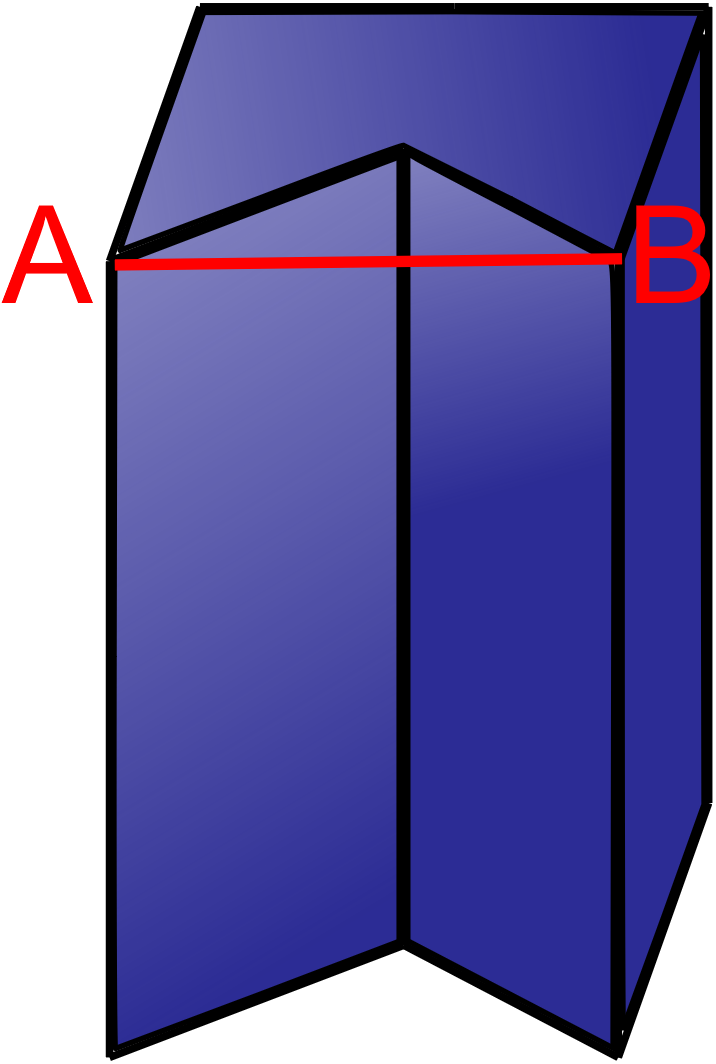
1. **Poliedros Convexos**: Un poliedro es convexo si cualquier segmento de línea que conecte dos puntos dentro del poliedro se encuentra completamente dentro del poliedro. Ejemplos incluyen cubos y tetraedros.

Ilustración 4: Poliedro cóncavo [9]

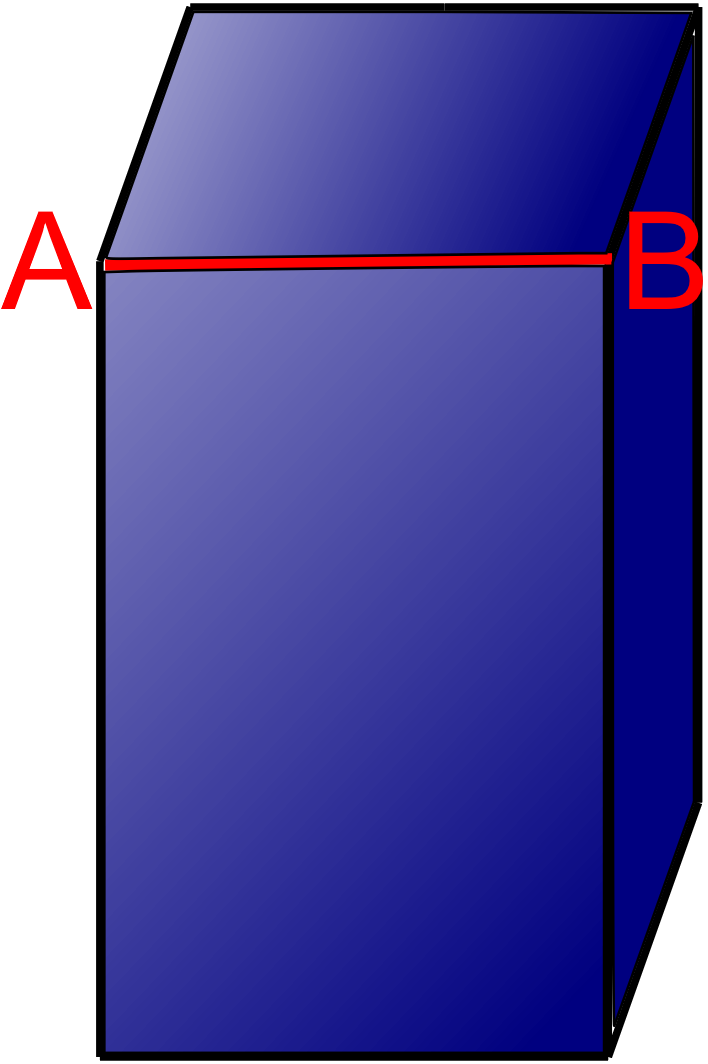
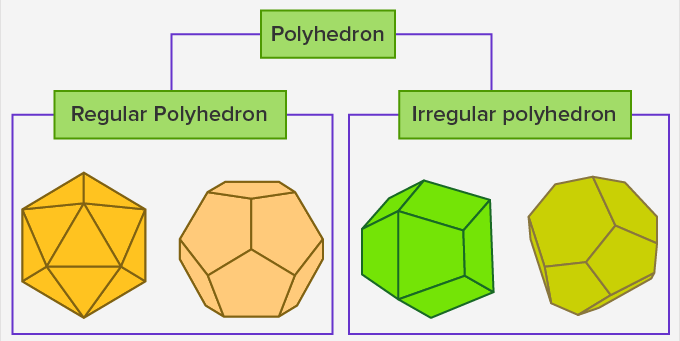
1. **Poliedros Cóncavos**: Un poliedro es cóncavo si existe al menos un segmento de línea que conecte dos puntos dentro del poliedro que pase fuera del poliedro. Estos poliedros tienen "huecos" o indentaciones.
2. **Poliedros Regulares**: Un poliedro es regular si todas sus caras son polígonos regulares idénticos y todos sus ángulos sólidos son iguales. Los cinco sólidos platónicos (tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro, e icosaedro) son ejemplos de poliedros regulares.

Ilustración 5: Poliedro convexo [9]

1. **Poliedros Irregulares**: Los poliedros que no cumplen las condiciones de los poliedros regulares se llaman irregulares. Estos pueden tener caras y ángulos de diferentes tamaños y formas.

Elementos de un Poliedro

1. **Vértices**: Los puntos donde se encuentran tres o más aristas.
2. **Aristas**: Las líneas donde se encuentran dos caras.
3. **Caras**: Los polígonos planos que forman la superficie del poliedro.

#### Físicas

A continuación, explicaré las físicas relevantes para el proyecto. No son conceptos complejos los que se necesitan, pero es muy importante que estén definidos correctamente de forma teórica para que haya una concordancia entre la simulación y la realidad.

Ilustración 6: Poliedros regulares e irregulares

#### Data Oriented Programming y principio de localidad

Principio de Localidad

### Tecnologías

##### Shaders

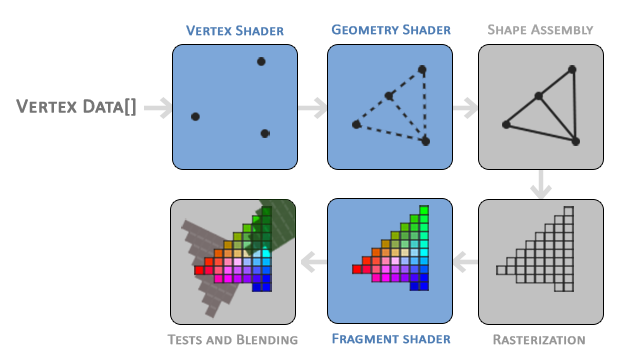


Ilustración 7: Visualización del flujo de los Shaders [6]

###### Introducción

Los shaders son programas especializados utilizados en el pipeline de gráficos de una aplicación para manipular cómo se procesan los gráficos. Específicamente, se utilizan para determinar cómo se dibujan los vértices y los fragmentos (píxeles potenciales) en la pantalla. GLSL (OpenGL Shading Language) es un lenguaje de programación diseñado para escribir estos programas. La ilustración proporcionada visualiza el flujo de datos a través de varios tipos de shaders en el pipeline gráfico.

###### Pipeline Gráfico y Tipos de Shaders

Datos de Vértices (Vertex Data)

El proceso comienza con la entrada de datos de vértices [Ilustración 2], que contienen información sobre las posiciones y atributos (como color y coordenadas de textura) de cada vértice en un objeto 3D.

Vertex Shader

El vertex shader es el primer paso en el pipeline [Ilustración 2]. Este shader procesa cada vértice individualmente y puede transformar las posiciones de los vértices, calcular normales, y realizar otras operaciones básicas. La salida del vertex shader se utiliza para ensamblar primitivas geométricas (como triángulos).

Geometry Shader

El geometry shader (opcional) toma como entrada las primitivas ensambladas [Ilustración 2] (por ejemplo, puntos, líneas, triángulos) y puede generar nuevas primitivas o modificar las existentes. Este shader es útil para efectos avanzados como el tessellation o la creación de sombras volumétricas.

Assembly (Shape Assembly)

Después de los shaders de vértices y geometría, el sistema [Ilustración 2] ensambla las primitivas en figuras completas. Estas figuras son definidas por una serie de vértices conectados en estructuras específicas (triángulos en este caso).

Rasterización (Rasterization)

La rasterización convierte las primitivas geométricas en fragmentos (píxeles potenciales) [Ilustración 2]. Cada fragmento representa un píxel en la pantalla y contiene información de color y profundidad que se procesará posteriormente.

Fragment Shader

El fragment shader procesa cada fragmento generado por la rasterización. Aquí se determinan los colores finales de los píxeles, se aplican texturas y se calculan efectos de iluminación. Este shader tiene un control detallado sobre el color y otros atributos de cada fragmento.

Pruebas y Mezcla (Tests and Blending)

Finalmente, se realizan varias pruebas (como pruebas de profundidad y de stencil) y se aplican operaciones de mezcla para combinar el color de los fragmentos con los colores existentes en el buffer de imagen. Esto es crucial para efectos de transparencia y anti-aliasing.

Coordenadas Normalizadas de Dispositivo (NDC)

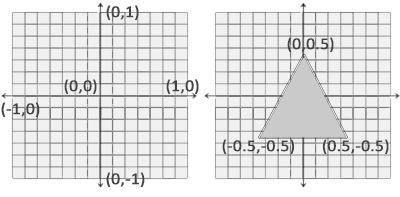


Ilustración 8: Visualización de las coordenadas normalizadas de dispositivo [7]

Una vez que las coordenadas de vértice han sido procesadas en el vertex shader, se transforman a coordenadas normalizadas de dispositivo (NDC). Este es un espacio donde los valores de x, y y z varían de -1.0 a 1.0. Cualquier coordenada fuera de este rango será descartada/clipeada y no será visible en la pantalla. La ilustración [Ilustración 3] muestra un triángulo especificado dentro de las coordenadas normalizadas de dispositivo en 2D (ignorando el eje z).

# Planificación y presupuesto del proyecto

## Planificación

La planificación de este proyecto fue comenzada al principio del proyecto, y se fue adaptando a lo largo de la vida del proyecto y su evolución. Con cambios de horarios, de planificación, de tareas, etc.

### Arranque del proyecto

### Desarrollo software

#### Fase de análisis

#### Fase de diseño

#### Fase de implementación

#### Fase de pruebas

### Documentación

### Formación

### Planificación completa y diagrama de Gantt

## Resumen del presupuesto

### Presupuesto costes

### Presupuesto de clientes

//No hay cliente, preguntar

## Detalles del presupuesto

### Presupuesto costes

#### Arranque del proyecto

#### Desarrollo software

#### Documentación

#### Otros costes

##### Equipo

##### Formación

### Resumen de costes

### Presupuesto del cliente

//No hay cliente, preguntar

# Análisis del sistema

En este capítulo de detallarán los análisis del sistema previos a su implementación. Contendrá los actores interesados, los requisitos, la arquitectura y la descripción de las clases del sistema. Este apartado tiene una gran importancia y es critico para el desarrollo correcto del motor dado que una buena arquitectura e investigación previa es crucial para el éxito de éste.

## Requisitos del sistema

### Identificación de actores del sistema

En este apartado se describen los tipos de usuario que podrán interactuar en el sistema, definiendo de qué manera podrá hacerlo cada uno de ellos.

Se identifican los siguientes actores del sistema:

1. Usuarios finales del motor
   1. Desarrolladores
   2. Artistas
2. Usuario final del videojuego desarrollado (jugadores)
3. Equipo de desarrollo del motor

Como interactúa cada uno de estos actores

Desarrolladores: Los desarrolladores utilizarán directamente con el sistema, por lo que son el principal público interesado en el sistema. El proyecto deberá enfocarse en satisfacer este público en la mayor extensión posible.

Artistas: El sistema deberá proporcionar facilidad para que las tecnologías utilizadas por los artistas para crear sus obras ya sean diseñadores gráficos con formatos de diseños como OBJ u otros o diseñadores de sonido con distintos formatos de sonido como WAV, MP3, etc.

Usuario final de videojuego: Los jugadores finales del motor están interesados en la tecnología utilizada en los videojuegos. Puede ser por distintas razones, ya sean pura curiosidad o búsqueda de aprovechamiento de distintos bugs por la comunidad de speedruns.

Equipo de desarrollo del motor: Este equipo también está interesado en el óptimo desarrollo del motor, ya que su arquitectura, técnicas, patrones, análisis, etc servirá para optimizar y reducir el tiempo de desarrollo futuro.

### Obtención de los requisitos del sistema

A continuación, se detallarán los requisitos del sistema siguiendo el estándar IEEE 830-1998[10] que seguirán las siguientes características para asegurar su calidad:

* Completa. Todos los requerimientos deben estar reflejados en ella y todas las referencias deben estar definidas.
* Consistente. Debe ser coherente con los propios requerimientos y también con otros documentos de especificación.
* Inequívoca. La redacción debe ser clara de modo que no se pueda mal interpretar.
* Correcta. El software debe cumplir con los requisitos de la especificación.
* Trazable. Se refiere a la posibilidad de verificar la historia, ubicación o aplicación de un ítem a través de su identificación almacenada y documentada.
* Priorizable. Los requisitos deben poder organizarse jerárquicamente según su relevancia para el negocio y clasificándolos en esenciales, condicionales y opcionales.
* Modificable. "Aunque todo requerimiento es modificable, se refiere a que debe ser fácilmente modificable."
* Verificable. Debe existir un método finito sin costo para poder probarlo.
* Clara. Debe estar en un lenguaje claro y entendible para quien lo va a atender.

(“Especificación de requisitos de software - Wikipedia, la enciclopedia libre”)

#### Requisitos funcionales

#### Requisitos no funcionales

### Descripción de la arquitectura

//La arquitectura debe ir con el diseño, pero es un requisito también. ¿Como manejarlo? Preguntar

### Diagrama de clases y descripción preliminar

Modelos de dominio…

### Descripción de las clases

## Especificación de plan de pruebas

### Pruebas unitarias

### Pruebas gráficas

### Pruebas de usabilidad

### Pruebas de benchmarking

# Diseño del sistema

## Arquitectura del sistema

### ECS

### Game loop

…

## Diagrama de componentes

## Diseño de clases

//Ya implementadas? No creo

## Diseño de estilo de código

Para este proyecto he decidido crear mi propio estilo de código para C++. Aun existiendo numerosas convenciones como la de [Google](https://google.github.io/styleguide/cppguide.html) o la de [Microsoft](https://learn.microsoft.com/en-us/style-guide/a-z-word-list-term-collections/c/c-cplusplus-csharp).

Esta decisión viene justificada por el hecho de que para mi gusto ninguno de los estilos me parece elegante del todo. Preferí crear el mío propio, aunque seguramente acabe incompleto ya que crear algo así conlleva buscar cada posible rincón que se pueda estandarizar, y especificarlo. Pero intentaré simplemente dejar claras a grandes rasgos las cosas más importantes que más se ven a simple vista en el código.

También seguramente en el propio proyecto habrá inconsistencias de estilo en la codificación que no está especificada en este apartado dado que no hay estándar especificado asi que quedará libre para desarrollador de decidir.

### CMake

### CMake

### C++

#### Definición de clases

##### Separación entre definición e implementación

Las definiciones de las clases deberán hacerse en las cabeceras (ficheros con extensión “.h”) y la implementación se deberá hacer en los ficheros (con extensión “.cpp”).

Ejemplo:

// In Example.h

class Example{

private:

void doSomething();

};

// In Example.cpp

void Example::doSomething(){

std::cout<<"I’m doing stuff! "<<std::endl;  
}

Razón: Esto, aparte de ser un estándar ampliamente reconocido por la comunidad de C++, tiene grandes beneficios. Los beneficios son:

A excepción de los métodos que utilicen templates. Los cuales se implementarán en el mismo fichero “.h”, pero se hará a continuación de la definición de la clase.

Ejemplo:

// In Example.h

class Example{

private:

template <typename T>

void doSomething();

};

// In the same Example.h

template <typename T>

void Example::doSomething(){

std::cout<<"I’m doing stuff with a template" + typeid(T).name <<std::endl;  
}

Razón: Para que las templates se puedan instanciar necesita conocer el código en tiempo de compilación y las cabeceras no conocen de sus ficheros de implementación “cpp” hasta tiempo de enlace, el cual ocurre después [11]. La razón de por que se hará a continuación de la definición de la clase en lugar de definir e implementar dentro de la propia clase es por preferencia, ya que de esta forma simulamos esta separación y queda mas compacto.

##### Orden de restricción de acceso

Las clases seguirán un estilo clásico, también recomendadas por el Google C++ Style Guide, el cual implica ordenar la definición de miembros de menos a más restricción de acceso.

Ejemplo:

class Example{

public:

// Declarations

protected:

// Declarations

private:

// Declarations

};

##### Friend classes y friend methods

La definición de “clases y métodos amigos” se hará justo debajo de la definición del nombre de la clase en la cabecera.

Ejemplo:

class Example{

friend class FriendClassExample;

friend void ExampleClass::exampleMethodInClass(int exampleParam);

friend void exampleMethod(int exampleParam);

public:

// Declarations

protected:

// Declarations

private:

// Declarations

};

##### Forward Declarations

Evitar usar forward declaration.

Las razones de los inconvenientes, según Google C++ Style Guide [12]:

1. Las declaraciones anticipadas (forward declarations) pueden ocultar una dependencia: si cambias el código en un archivo de cabecera (.h), no necesariamente tendrás que recompilar los archivos que utilizan declaraciones anticipadas de ese encabezado. Esto puede parecer ventajoso, pero puede llevar a problemas si se realizan cambios importantes en el archivo de cabecera.
2. Dificultan el trabajo de las herramientas automáticas: las herramientas que analizan tu código pueden tener dificultades para encontrar la definición de un símbolo si solo usaste una declaración anticipada.
3. Las declaraciones anticipadas pueden romperse con cambios en la biblioteca: por ejemplo, si una función en la biblioteca cambia para aceptar un argumento de un tipo más amplio, las declaraciones anticipadas de esa función en tu código podrían dejar de funcionar
4. Las declaraciones anticipadas del espacio de nombres std:: no están permitidas y darán lugar a un comportamiento indefinido.
5. Puede ser difícil decidir si se necesita una declaración anticipada o un #include completo: cambiar un #include por una declaración anticipada puede cambiar silenciosamente el comportamiento del código. En el ejemplo proporcionado, la función que se llama cambia dependiendo de si se incluye el archivo de cabecera completo o solo se utilizan declaraciones anticipadas.
6. Usar varias declaraciones anticipadas puede ser más verboso que simplemente incluir el archivo de cabecera.
7. Tener que estructurar el código para permitir declaraciones anticipadas (por ejemplo, usando miembros punteros en lugar de miembros de objeto) puede hacer que el código sea más lento y complejo.

#### Comentarios

1. No tener errores gramaticales.
2. En las cabeceras, usar comentarios en bloque estilo doxygen, incluyendo etiquetas.

Ejemplo:

*/\*\**

*\* @brief description*

*\**

*\* @return return description*

*\* @param parameter description*

*\*/*

1. Dentro de los métodos utilizar comentarios de línea, encima del código deseado.

Ejemplo:

*// Core functions of OpenGL a.k.a. full modern OpenGL functionality.*

*// More info: https://wiki.libsdl.org/SDL\_GLprofile*

setGlAttribute(SDL\_GL\_CONTEXT\_PROFILE\_MASK, SDL\_GL\_CONTEXT\_PROFILE\_CORE);

1. Seguir reglas de buenas prácticas[13]:

* Regla 1: Los comentarios no deben duplicar el código.
* Regla 2: Los buenos comentarios no excusan un código confuso.
* Regla 3: Si no puedes escribir un comentario claro, puede haber un problema con el código.
* Regla 4: Los comentarios deben disipar la confusión, no causarla.
* Regla 5: Explica el código poco idiomático en los comentarios.
* Regla 6: Proporciona enlaces a la fuente original del código copiado.
* Regla 7: Incluye enlaces a referencias externas donde sean más útiles.
* Regla 8: Agrega comentarios al arreglar errores.
* Regla 9: Usa comentarios para marcar implementaciones incompletas.

#### Inicialización de variables

1. Inicializar variables en la lista inicializadora del constructor de la clase, salvo necesidad explícita.
2. Preferir inicialización de variables mediante ‘{}’ en lugar de ‘=’, salvo otra razón de peso.

#### Ámbitos

Para la definición de ámbitos grandes (classes, namespaces, structs) se deberá indicar mediante un comentario el nombre del ámbito junto a su tipo.

Ejemplo:

namespace GLESC{

struct Point{

}; // struct Point

class Mesh{

}; // class Mesh

} // namespace GLESC

Motivación:

#### Directivas

##### Include

Uso de <> para librerías y “” para cabeceras propias. Esto ayuda al preprocesador a encontrar más rápidamente lo que se incluye. [14].

Para seguir un estilo consistente, se seguirá el siguiente orden de inclusión según los ficheros:

* Ficheros fuente (.cpp)
  + La cabecera que se está implementando, con “”
  + Las cabeceras de librerías externas necesarias para la implementación, con <>
  + Las cabeceras propias necesarias para la implementación, con “”
* Ficheros cabecera (.h)
  + Las cabeceras de librerías externas necesarias para la definición de la cabecera, con <>
  + Las cabeceras propias necesarias para la definición de la cabecera, con “”

##### Define

Para funciones definidas, se utilizará el mismo estilo que las funciones definidas dentro de las clases.

##### Pragma

Uso de pragma once en lugar de ifdef

Usar pragma en todos los ficheros cabecera, muy importante para evitar repetición de inclusión de cabeceras. Esto reduce considerablemente el tiempo de compilación.

Se utiliza pragma en lugar de ifdef NOMBRE\_DEL\_FICHERO, lo cual suele ser más estándar, porque es más sencillo, requiere menos código y es utilizado muy comúnmente. Además, la gran mayoría de compiladores lo permite, por lo que es conveniente.

#### Nombramiento

1. Código en general: camelCase
2. Macros: SCREAMING\_SNAKE\_CASE [15]
3. A excepción de macros de funciones, las cuales deberán seguir el mismo estilo que el código normal.
4. Clases, namespaces, enums, structs: PascalCase

Se tendrá como excepción palabras que sean más fáciles de leer o de entender en mayúsculas. Como “componentID” o “GLESC”.

1. No comenzar ningún símbolo con \_ y no tener ningún símbolo que contenga doble \_\_. Posible colisión con nombres y signaturas de funciones.[16]

#### Indentación

1. Uso de estilo de indentación K&R recomendado por C++ Core Guidelines [15]

while (x == y) {

something();

somethingelse();

}

1. Se usarán espacios como carácter de indentación, en concreto 4 por cada nivel de indentación.

#### Ficheros

1. Uso de extensión “.cpp” para implementación y “.h” para cabeceras.
2. Uso de kebab-case para nombramiento de ficheros.

#### Cast

1. Se deberá hacer uso de static cast para hacer casteo.

float x=static\_cast<float>(var)

El uso de C-style cast no se recomienda al ser menos seguro.

float x=(float) var;

## Diagrama de interacción

## Especificación del plan de pruebas

### Pruebas unitarias

### Pruebas gráficas

### Pruebas de usabilidad

### Pruebas de benchmarking

# Implementación del sistema

## Lenguajes de programación

## Bibliotecas

## Herramientas y programas usados

## Ciclo del uso de las herramientas

//Dudo de la necesidad de este apartado…

### Arranque del proyecto

### Desarrollo Software

#### Fase de análisis

#### Fase de diseño

#### Fase de implementación

## Creación del sistema

### Problemas encontrados

### Descripción de las clases

// Todo el código? Dudo de la necesidad

# Desarrollo de pruebas

## Pruebas unitarias

## Pruebas gráficas

## Pruebas de usabilidad

## Pruebas de benchmarking

# Manual del sistema

|  |
| --- |
| Manual del usuarioManual del programadorManual de instalación |

# Conclusiones y ampliaciones

## Conclusiones técnicas

## Conclusiones personales

## Ampliaciones

Las posibles ampliaciones de este proyecto sin prácticamente infinitas dada la naturaleza de este proyecto. La implementación actual es muy simple e ingenua en ciertos aspectos incluso. A continuación, explicaré las posibles ampliaciones que mas beneficiarían al proyecto actual.

### Renderizado

#### Modelos

El sistema actual solo permite generar simples meshes en una entidad. Esto es muy poco flexible, no permite mover partes de la mesh con coordenadas relativas, no permite “trocear” la mesh, no permite agrupar meshes, entre otros problemas.

La implementación de la interfaz, de forma simplificada, podría verse de la siguiente forma:

1. entity.getComponent<RenderComponent>().model=newModel;

La clase modelo podría guardar una lista de meshes con sus posiciones relativas

1. Class Model{

2. std::vector<Mesh\*> meshes;  
3. std::vector<Transform::position\*> position

4. }

5.

Esto tiene grandes beneficios que ya se han mencionado, pero hay uno en especial que aportaría un gran cambio al proyecto, el cual es poder importar modelos 3D en forma de assets como OBJ.

#### Assimp

Una vez finalizada la implementación de modelos mencionada en el apartado de ampliaciones “Modelos” nos permite desbloquear otra extensión importante, llamada importación de assets. Utilizando la herramienta Assimp (abstrayéndola en una clase ModelLoader) podríamos cargar modelos creados por otras herramientas. Assimp permite cargar 57 distintos tipos de formatos incluyendo COLLADA (.dae), 3DS, DirectX X, Wavefront OBJ and Blender 3D (.blend)[17].

#### Ampliación de shaders y materiales

Actualmente los shaders y materiales son bastante simples (e incompletos). La terea sería finalizar los shaders, mejorar la calidad, y añadir otros efectos interesantes. Sobre todo, sería muy importante permitir las sombras y su customización en el motor.

También sería un gran avance añadir mapas de normales (normal map o bump map) a los materiales. Esto permitiría dar textura a las superficies, mejorando notablemente las meshes.

Y después de esto culminaría en estandarizar este material para poder importar materiales y poder aplicarlos a las meshes directamente.

#### Texturas

Las texturas eran parte del proyecto inicialmente, pero se decidió descartar por la restricción temporal del proyecto. Añadir las texturas

# Referencias

[1] «Unity: Entity Component System». Accedido: 29 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.entities@0.17/manual/index.html

[2] «ECS Unreal Engine Forum», Accedido: 30 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://forums.unrealengine.com/t/entity-component-system-ecs-for-ue4/106058

[3] J. Linietsky, «Why isn’t Godot an ECS-based game engine?» Accedido: 30 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://godotengine.org/article/why-isnt-godot-ecs-based-game-engine/

[4] I. Cislaghi, «About Godot 4, Vulkan, GLES3 and GLES2», jul. 2021, Accedido: 30 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://godotengine.org/article/about-godot4-vulkan-gles3-and-gles2/

[5] «EnTT documentation». Accedido: 30 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://skypjack.github.io/entt/index.html

[6] Jason Gregory, «Game Engine Architecture», 2018. [En línea]. Disponible en: http://taylorandfrancis.com

[7] J. De Vries, *Learn OpenGL*. 2020. Accedido: 8 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: https://learnopengl.com/

[8] E. Lengyel, *Foundations of game engine development: mathematics*, vol. 1. 2021. Accedido: 8 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: https://foundationsofgameenginedev.com/

[9] «Math.com - Polyhedron». Accedido: 20 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.math.net/polyhedron

[10] «IEEE-STD-830-1998 : ESPECIFICACIONES DE LOS REQUISITOS DEL SOFTWARE 1. Definiciones». Accedido: 31 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.ctr.unican.es/asignaturas/is1/IEEE830\_esp.pdf

[11] ISO, «ISO CPP Templates FAQ», Accedido: 18 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: https://isocpp.org/wiki/faq/templates

[12] Google, «Google C++ Style Guide». Accedido: 13 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: https://google.github.io/styleguide/cppguide.html

[13] E. Spertus, «Best practices for writing code comments». Accedido: 13 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: https://stackoverflow.blog/2021/12/23/best-practices-for-writing-code-comments/

[14] «Include Syntax Cpp». Accedido: 27 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: https://gcc.gnu.org/onlinedocs/cpp/Include-Syntax.html

[15] B. Stroustrup y H. Sutter, «C++ Core Guidelines». Accedido: 13 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: https://isocpp.github.io/CppCoreGuidelines/CppCoreGuidelines

[16] P. Becker, «C++ International Standard», 2011. Accedido: 14 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.open-std.org/jtc1/sc22/wg21/docs/papers/2011/n3242.pdf

[17] «Assimp docs». Accedido: 20 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://assimp-docs.readthedocs.io/en/v5.1.0/about/introduction.html

[18] Nystrom y Robert, *Game Programming Patterns*. 2014.

# Anexos

## Doxygen

## Codigo

## Bitácora

|  |  |
| --- | --- |
| Fecha | Detalles |
| 01/07/2022 | Comienzo de lectura de [7].  A la par con el inicio de programación y aprendizaje de las herramientas C++, SDL, OpenGL y Make. |
| 01/08/2022 | Fin de lectura del primer capítulo inicial de [7]. Sentadas las bases de lo que será el motor. |
| 01/12/2022 | Reestructuración de carpetas del proyecto. |
| 26/01/2023 | Comienzo de lectura de [18] |
| 11/02/2023 | Fin de lectura de [18]. La lectura fue parcial pero casi total, parte del contenido no tenía utilidad para el ámbito del proyecto. |
| 12/02/2023 | Inicio de estructuración del proyecto. Creación de interfaces para que el motor pueda ser usado. |
| 27/02/2023 | Reestructuración del Makefile, |
| 19/03/2023 | Finalización plantilla de documentación. |
| 23/03/2023 | Finalización de |