UNIVERSIDAD DE GRANADA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MASTER EN DESARROLLO DE SOFTWARE

Interfaz de programación para una API de rasterización moderna

Diseño y desarrollo de un motor de render ligero basado en Vulkan para aplicaciones interactivas 3D

Autor
Santiago Carbó García

Director/es
Carlos Ureña Almagro

Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación

—

Granada, 7 de septiembre de 2025

Interfaz de programación para una API de rasterización moderna

Diseño y desarrollo de un motor de render ligero basado en Vulkan para aplicaciones interactivas 3D

Autor
Santiago Carbó García

Director/es
Carlos Ureña Almagro

Interfaz de programación para una API de rasterización moderna: Diseño y desarrollo de un motor de render ligero basado en Vulkan para aplicaciones interactivas 3D

Santiago Carbó García

Palabras clave: Visualización 3D interactiva, Motor de renderizado, Vulkan, GPU, API de rasterización, Cauce gráfico, Aplicaciones multi-hebra, Paralelización de tareas, Alto rendimiento gráfico, Arquitectura software

Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo principal el análisis, diseño, desarrollo, implementación y validación de una componente de software orientada a facilitar la creación de aplicaciones interactivas de visualización 3D sobre unidades de procesamiento gráfico (GPUs) modernas, utilizando la API de rasterización Vulkan, desarrollada y mantenida por el consorcio Khronos. Vulkan se caracteriza por ofrecer un alto rendimiento y un control exhaustivo sobre los recursos gráficos, lo que la convierte en una herramienta idónea para la programación de motores de renderizado de última generación; sin embargo, esta misma flexibilidad implica una gran complejidad en la configuración y gestión correcta del cauce gráfico. Con el fin de abordar esta problemática, en este proyecto se ha desarrollado un motor de render ligero que proporciona una interfaz de programación compuesta por funciones y clases diseñadas para abstraer gran parte de la complejidad inherente a Vulkan, facilitando así la implementación de aplicaciones 3D interactivas. Para validar el diseño de esta interfaz se ha construido una aplicación de prueba capaz de cargar modelos tridimensionales complejos, gestionar parámetros de visualización en tiempo real y permitir la interacción directa con la escena. Además, como parte del estudio experimental, se ha evaluado el rendimiento de Vulkan en arquitecturas multi-core modernas, configurando el cauce gráfico para explotar aplicaciones multi-hebra y comparando su eficiencia frente a implementaciones de una única hebra, con el fin de cuantificar las mejoras potenciales en escenarios de ejecución concurrente. Este proyecto no solo sienta una base práctica para crear aplicaciones 3D con Vulkan, sino que también se convierte en una oportunidad real para entender mejor cómo se conectan el diseño de la arquitectura de software, la paralelización de tareas y el rendimiento gráfico. En otras palabras, más allá de ser un simple motor de renderizado, el trabajo funciona como un espacio de experimentación que ayuda a ver de forma clara el impacto de las decisiones técnicas en la eficiencia y en la calidad de la visualización en tiempo real.

Repositorio del código: `https://github.com/santiago-carbo/VulkanAPI`

Programming Interface for a Modern Rasterization API: Design and Development of a Lightweight Rendering Engine Based on Vulkan for Interactive 3D Applications

Santiago Carbó García

Keywords: Interactive 3D visualization, Rendering Engine, Vulkan, GPU, Rasterization API, Graphics pipeline, Multi-threaded applications, Task parallelization, High-performance graphics, Software architecture

Abstract

The main objective of this project is the analysis, design, development, implementation, and validation of a software component aimed at facilitating the creation of interactive 3D visualization applications on modern Graphics Processing Units (GPUs), using the Vulkan rasterization API developed and maintained by the Khronos consortium. Vulkan is characterized by delivering high performance and providing fine-grained control over graphical resources, making it an ideal tool for programming next-generation rendering engines. However, this same flexibility entails significant complexity in the correct configuration and management of the graphics pipeline. To address this challenge, a lightweight rendering engine has been developed in this project, providing a programming interface composed of functions and classes designed to abstract much of the inherent complexity of Vulkan, thereby simplifying the implementation of interactive 3D applications. To validate the design of this interface, a test application was built, capable of loading complex three-dimensional models, managing visualization parameters in real time, and enabling direct interaction with the scene. Furthermore, as part of the experimental study, the performance of Vulkan on modern multi-core architectures has been evaluated by configuring the graphics pipeline to exploit multi-threaded applications and comparing its efficiency against single-threaded implementations, in order to quantify potential improvements in concurrent execution scenarios. This project not only establishes a practical foundation for creating 3D applications with Vulkan, but also provides a real opportunity to better understand the interplay between software architecture design, task parallelization, and graphical performance. In other words, beyond being a simple rendering engine, this work serves as an experimental framework that clearly demonstrates the impact of technical decisions on both efficiency and the quality of real-time visualization.

Source code repository: `https://github.com/santiago-carbo/VulkanAPI`

Yo, **Santiago Carbó García**, alumno del **MÁSTER DE DESARROLLO DEL SOFTWARE**, con DNI **77561011C**, autorizo la ubicación de la siguiente copia de mi Trabajo Fin de Máster en la biblioteca del centro para que pueda ser consultada por las personas que lo deseen.

Fdo: *Santiago Carbó García*

Granada a 7 de septiembre de 2025.

D. **Carlos Ureña Almagro**, Profesor del Área de Lenguajes y Sistemas Informáticos del Departamento Lenguajes y Sistemas Informáticos de la Universidad de Granada.

Informa:

Que el presente trabajo, titulado ***Interfaz de programación para una API de rasterización moderna, Diseño y desarrollo de un motor de render ligero basado en Vulkan para aplicaciones interactivas 3D***, ha sido realizado bajo su supervisión por **Santiago Carbó García**, y autorizamos la defensa de dicho trabajo ante el tribunal que corresponda.

Y para que conste, expiden y firman el presente informe en Granada a 7 de septiembre de 2025.

El director:

Carlos Ureña Almagro

Yo, **Santiago Carbó García**, alumno del **MÁSTER DE DESARROLLO DEL SOFTWARE** de la **Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación de la Universidad de Granada**, con DNI **77561011C**, declaro explícitamente que el trabajo presentado es original, entendido en el sentido que no he utilizado ninguna fuente sin citarla debidamente.

Fdo: **Santiago Carbó García**

Granada, 7 de septiembre de 2025.

Agradecimientos

Es difícil escribir una sección de agradecimientos porque hay muchísimas personas que han aportado tanto a mi vida que resulta complicado priorizar y cuantificar el valor que cada una de ellas ha tenido. Por ello, quiero dejar claro desde el principio que las personas que menciono a continuación no se rigen por ningún tipo de escala: su valor es incalculable.

Quiero agradecer a mi abuela por todo el amor y apoyo que me dio siempre. Era una persona que irradiaba una luz capaz de alegrar a cualquiera y de hacerte sentir que no existía problema en el mundo. También quiero agradecer a mi hermana por ser el mayor apoyo de mi vida. Le doy gracias al cielo por la suerte de tener una hermana tan buena persona.

Agradezco a mi padre y a mi madre por haberme criado y haber sido mi apoyo fundamental desde el primer día en que nací. Mi vida no sería tan privilegiada si no fuera por ellos. También agradezco a mi abuelo Mateo, a mi abuelo Pepe y a mi tía María por haberme dado cariño y esperanza toda la vida.

Es un orgullo haber nacido rodeado de tantas buenas personas.

Índice general

Índice de figuras

Índice de tablas

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se contextualiza el trabajo realizado, estableciendo los fundamentos y la motivación que impulsan el desarrollo del proyecto. Se presentan los objetivos generales y específicos, así como la estructura global del documento, de manera que el lector disponga de una visión clara del propósito del TFM, del enfoque adoptado y de la relevancia de la programación gráfica moderna como marco de referencia. Además, se justifica la elección de Vulkan como API principal y se explica cómo este proyecto busca reducir la complejidad de su adopción, sentando las bases para los capítulos posteriores.

El desarrollo de aplicaciones de visualización 3D interactiva constituye actualmente uno de los ámbitos más relevantes dentro de la ingeniería del software, no sólo por su impacto en la industria del entretenimiento digital, sino también por su papel en campos como la simulación, el diseño asistido por ordenador, la ingeniería o la realidad virtual o aumentada. La capacidad de representar escenas tridimensionales en tiempo real con un alto nivel de fidelidad visual es clave para ofrecer experiencias inmersivas.

El avance de las unidades de procesamiento gráfico (GPUs) ha sido determinante en este contexto. Las arquitecturas modernas, caracterizadas por su gran capacidad de cómputo paralelo, permiten gestionar cargas de trabajo masivas, siempre que el software sea capaz de aprovechar de forma eficiente los múltiples hilos de ejecución. Esta tendencia ha impulsado la necesidad de motores de renderizado más flexibles y capaces de adaptarse a las exigencias del hardware.

En respuesta a esta evolución, la API Vulkan, desarrollada por el consorcio Khronos, se ha posicionado como una de las tecnologías clave para la programación gráfica a bajo nivel. Su diseño reduce la sobrecarga de abstracción y ofrece un control detallado sobre los recursos gráficos, permitiendo un rendimiento significativamente superior frente a APIs más tradicionales. Sin embargo, esta flexibilidad conlleva una cierta complejidad: la configuración inicial del cauce gráfico y la correcta gestión de los recursos suponen una tarea técnica que puede limitar su adopción en proyectos donde el tiempo de desarrollo es crítico.

Este proyecto se sitúa precisamente en ese punto de equilibrio entre el potencial de Vulkan y la necesidad de herramientas que reduzcan la barrera de entrada, ofreciendo un entorno más accesible para la creación de aplicaciones 3D interactivas de alto rendimiento.

1.1. Motivación

La realización de este proyecto surge de la convergencia entre mi interés personal en la programación gráfica y una necesidad real en el campo de la visualización 3D. Desde una perspectiva individual, trabajar en un motor de renderizado desde cero constituye una oportunidad para profundizar en áreas clave de la ingeniería del software como la gestión eficiente de hardware gráfico, la concurrencia y el diseño de interfaces que combinen rendimiento y facilidad de uso.

Este tipo de desarrollo implica un aprendizaje integral, donde teoría y práctica se combinan para crear un sistema funcional.

En el plano técnico, el proyecto responde a una problemática bien conocida en la comunidad de desarrollo gráfico: Vulkan, a pesar de ser una API muy potente, presenta una complejidad que frena su adopción en muchos entornos. La creación de una capa de abstracción que permita explotar sus capacidades sin obligar al desarrollador a gestionar cada detalle de bajo nivel puede tener un impacto directo en la forma en que se construyen motores de render en proyectos interactivos.

Asimismo, el trabajo se enmarca en un contexto en el que la explotación de arquitecturas multi-core y la paralelización de tareas son prioritarias para obtener un rendimiento óptimo. Explorar cómo la programación gráfica puede adaptarse mejor a estos sistemas no solo resulta relevante desde el punto de vista académico, sino que también ofrece información valiosa para el desarrollo de soluciones en la industria.

En conjunto, este proyecto combina una componente personal de superación técnica con una aportación práctica al campo del software gráfico, buscando reducir la complejidad de las herramientas actuales y facilitar la creación de aplicaciones 3D interactivas.

1.2. Objetivos

Los objetivos de este proyecto se establecen como una guía clara para orientar el desarrollo y servir como referencia en la evaluación de los resultados obtenidos. Se distinguen entre objetivos generales, que marcan la meta principal del trabajo, y objetivos específicos, que desglosan de forma concreta las tareas y resultados necesarios para alcanzar dicha meta. Su cumplimiento será revisado y contrastado en el Capítulo 8: Conclusiones.

1.2.1. Objetivos Generales

1. Diseñar e implementar una aplicación software que simplifique el desarrollo de aplicaciones de visualización 3D interactivas mediante una interfaz de programación que actúe como capa de abstracción sobre una API de rasterización moderna.
2. Validar la utilidad y el rendimiento de la aplicación mediante el desarrollo de una aplicación práctica que permita evaluar sus capacidades en un entorno funcional.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Analizar los requerimientos técnicos y las características de la API Vulkan para establecer las bases de la interfaz a desarrollar.
2. Diseñar una arquitectura modular que permita integrar funciones y clases para la gestión eficiente del cauce gráfico y los recursos asociados.
3. Implementar un motor de render ligero que proporcione herramientas de alto nivel para la creación de aplicaciones interactivas en 3D.
4. Desarrollar una aplicación de prueba que utilice la interfaz creada, incorporando carga de modelos complejos y manipulación de parámetros de visualización.
5. Evaluar el comportamiento de la aplicación en entornos multi-core, comparando configuraciones de hebra única frente a multi-hebra para analizar diferencias de rendimiento.
6. Documentar el diseño, la implementación y los resultados obtenidos para garantizar la reproducibilidad y servir como base de trabajos futuros.

1.3. Estructura del trabajo

El contenido de este proyecto se organiza en los siguientes capítulos:

1. Introducción, donde se presenta el contexto general del proyecto e incluye la motivación, los objetivos generales y específicos, así como la descripción de la propia estructura del documento.

2. Estado del arte, capítulo éste destinado al análisis de las tecnologías y metodologías existentes en el ámbito de la visualización 3D interactiva, prestando especial atención a las APIs de rasterización modernas como Vulkan y a los motores de render ligeros.

3. Desarrollo del TFM. En este capítulo detallo el diseño de la arquitectura, la implementación de la interfaz de programación y las decisiones técnicas adoptadas para la construcción del motor de render.

4. Resultados y discusión. En este capítulo muestro los resultados obtenidos, incluyendo las pruebas realizadas con la aplicación de validación y el análisis de rendimiento en entornos multi-core, comparando configuraciones de hebra única y multi-hebra.

5. Planificación y gestión del proyecto. En este capítulo se documenta la planificación y gestión del proyecto: metodología y ciclo de vida, herramientas y plataformas empleadas, estimación de costes y sostenibilidad, así como la planificación temporal con su diagrama de Gantt y los criterios de validación utilizados.

6. Innovación. Capítulo dedicado al encaje potencial del proyecto en un contexto empresarial: estudio de mercado, segmentos de clientes, análisis de competidores, propuesta de valor, recursos y actividades clave, socios, alianzas, estructura de costes, vías de ingresos, canales de distribución, relación con clientes, definición del MVP, *roadmap* y consideraciones legales.

7. Manual de usuario. Capítulo orientado al uso de la aplicación: requisitos, despliegue, ejecución y controles de interacción, descripción de los paneles (Dear ImGui), parámetros configurables y una breve guía de resolución de problemas frecuentes.

8. Conclusiones. Por último, en el capítulo de conclusiones se sintetizan los resultados más relevantes, evaluando asimismo el grado de cumplimiento de los objetivos planteados y planteando posibles líneas de mejora y trabajos futuros.

Estos capítulos se complementan con los correspondientes índices:

- Índice de Figuras (pagina III)
- Índice de Tablas (página V)

Capítulo 2

Estado del arte y trabajos previos

2.1. Introducción

Este capítulo recoge el análisis de las tecnologías, metodologías y referencias académicas más relevantes en el ámbito de la visualización 3D interactiva. Se revisan las APIs gráficas modernas como Vulkan, DirectX 12 y Metal, comparándolas con soluciones tradicionales como OpenGL. Asimismo, se examinan motores de render ligeros y estudios sobre arquitecturas multi-hebra, identificando sus ventajas, limitaciones y tendencias actuales. Esta revisión proporciona el marco conceptual necesario para situar el proyecto dentro de la investigación y el desarrollo previos, sirviendo como base para las decisiones técnicas expuestas en capítulos posteriores.

El desarrollo de aplicaciones de visualización 3D interactiva ha experimentado en la última década una transición hacia modelos de programación cada vez más cercanos al hardware. Esta tendencia ha estado impulsada por la necesidad de aprovechar de forma más eficiente las arquitecturas *multi-core* y las capacidades paralelas de las *GPUs* modernas. En este contexto, el papel de las *APIs* gráficas de bajo nivel como Vulkan, DirectX 12 y Metal se ha vuelto central, ya que ofrecen a los desarrolladores un control explícito sobre el flujo de renderizado y la gestión de los recursos.

Si bien APIs tradicionales como OpenGL han sido durante años el estándar para la programación gráfica en tiempo real, su modelo de ejecución *single-threaded* y la abstracción de la gestión interna de recursos limitan el potencial de escalado en hardware más moderno. Las nuevas APIs como Vulkan han introducido un paradigma diferente, otorgando al desarrollador control detallado sobre la creación de *command buffers*, sincronización, asignación de memoria y distribución del trabajo entre hilos de CPU [1–4].

2.2. APIs gráficas modernas

La introducción de Vulkan por el consorcio Khronos supuso una evolución significativa frente a modelos anteriores como OpenGL. Vulkan está diseñado para minimizar la sobrecarga de la CPU, habilitar la ejecución multi-hilo real y proporcionar un modelo de programación más predecible para la GPU. Estas características resultan especialmente relevantes en entornos donde la latencia y el rendimiento son críticos, como videojuegos, simuladores interactivos o aplicaciones en tiempo real [5, 6].

En comparación con DirectX 12 y Metal, Vulkan ofrece la ventaja de ser una API multiplataforma y abierta, lo que facilita su adopción en proyectos que requieren compatibilidad con múltiples sistemas operativos [7, 8]. Sin embargo, esta flexibilidad viene acompañada de una mayor complejidad inicial, requiriendo que el desarrollador gestione manualmente aspectos como *descriptors*, *pipelines* y *swapchains*.

2.3. Comparativas y estudios de rendimiento

Diversos estudios han analizado el impacto de Vulkan frente a OpenGL y otras APIs en términos de rendimiento y eficiencia energética. Luján et al. [5] evaluaron ambas APIs en un servidor de renderizado, observando una reducción notable en la sobrecarga de CPU con Vulkan. Trabajos posteriores [6] confirman que la arquitectura *big.LITTLE* también se beneficia de esta reducción, aunque el aprovechamiento del potencial multi-core depende en gran medida del diseño del motor de render.

Duvanov y Churkin [7] realizaron una comparación amplia entre DirectX, OpenGL, Vulkan y Metal, resaltando que Vulkan tiende a ofrecer una utilización más equilibrada de CPU y GPU, especialmente en escenarios con alta carga gráfica. Otros estudios en el ámbito académico [8] documentan experiencias de migración completa a Vulkan en entornos universitarios, destacando tanto sus beneficios como la elevada curva de aprendizaje asociada.

2.4. Aplicaciones y guías técnicas

A nivel práctico, existen recursos técnicos clave para el aprendizaje y la implementación de Vulkan. El *Vulkan Programming Guide* [9] y *Mastering Graphics Programming with Vulkan* [10] constituyen referencias fundamentales para desarrolladores que buscan una comprensión exhaustiva de la API. En paralelo, obras más generales como *Real-Time Rendering* [**?**] proporcionan un marco teórico sobre iluminación, modelado y técnicas de renderizado que resultan aplicables independientemente de la API utilizada.

Además, se han documentado casos de uso de Vulkan en contextos no estrictamente de entretenimiento. Rossant y Rougier [12] desarrollaron una librería para visualización científica interactiva (*Datoviz*) aprovechando el bajo nivel de Vulkan, mientras que Ozvoldik et al. [13] lo aplicaron a la visualización de estructuras biomoleculares a gran escala, evidenciando la versatilidad de la API más allá del ámbito del entretenimiento.

2.5. Motores de render y *game engines* ligeros

En el ámbito de la ingeniería del software, los *game engines* constituyen entornos de desarrollo que integran componentes para la gestión de gráficos, física, entrada de usuario, sonido y lógica de juego. En particular, el desarrollo de motores ligeros, diseñados para ofrecer un conjunto reducido pero optimizado de funcionalidades, resulta especialmente relevante en aplicaciones que requieren alto rendimiento con un coste bajo en recursos [14, 15].

Ejemplos como *SelfEngine* [3] o propuestas de motores con soporte para redes neuronales profundas [2] muestran que es posible implementar arquitecturas modulares con bajo consumo de recursos manteniendo una flexibilidad suficiente para distintos dominios de aplicación. Zarrad [4] presenta un análisis comparativo de motores, destacando criterios como la portabilidad, escalabilidad y facilidad de integración con bibliotecas externas.

2.6. Estudios comparativos de arquitecturas

El diseño arquitectónico de un motor gráfico influye directamente en su capacidad de escalar en hardware multi-core. Anderson et al. [15] defienden la necesidad de investigación continua en arquitectura de motores, enfatizando la separación de responsabilidades entre módulos y la implementación de patrones que favorezcan la concurrencia. Obras de referencia como *3D Game Engine Design* [16], *Game Engine Architecture* [17] y *Foundations of Game Engine De-*

velopment [18] han establecido principios y patrones de diseño ampliamente adoptados en la industria.

Estudios recientes como el de Christopoulou y Xinogalos [19] o Politowski et al. [20] examinan los motores desde perspectivas académicas y de ingeniería de software, proponiendo marcos de análisis que consideran tanto aspectos técnicos como aspectos de mantenimiento y escalabilidad. Ullmann et al. [21] proponen SyDRA, un enfoque para comprender y documentar la arquitectura interna de motores, facilitando su evolución y mantenimiento.

2.7. Motores para *serious games* y visualización interactiva

En el ámbito de los *serious games* y aplicaciones de alta fidelidad, la selección del motor es crítica para cumplir con requisitos específicos de realismo y respuesta temporal. Pavkov et al. [15] comparan motores para este tipo de aplicaciones, mientras que Petridis et al. [22] proponen un marco de selección basado en criterios de fidelidad visual, extensibilidad y soporte multiplataforma. Pattrasitidecha [23] realiza una evaluación específica para motores móviles en 3D, evidenciando las limitaciones de los dispositivos móviles.

2.8. Vulkan en entornos multi-hebra

Uno de los puntos clave en el uso de Vulkan es su capacidad para distribuir la carga de trabajo gráfica en múltiples hilos de CPU, generando *command buffers* de forma concurrente. Ioannidis y Boutsi [24] demuestran esta capacidad en un sistema de visualización 3D multiplataforma, donde la separación de procesos de renderizado y lógica permite aprovechar de forma más completa las arquitecturas multi-core.

Xu [25] discute el papel de la paralelización en la industria del videojuego, resaltando cómo las APIs de bajo nivel facilitan la adopción de modelos concurrentes. Otros trabajos como el de Asaduzzaman y Lee [26] exploran la computación en GPU como medio para mejorar el rendimiento de los motores, mientras que Talha et al. [27] realizan un análisis comparativo del rendimiento de aplicaciones gráficas en arquitecturas multicore.

Maggiorini et al. [15] proponen SMASH, una arquitectura distribuida para motores de juego, que permite ejecutar diferentes subsistemas en nodos separados, incrementando la escalabilidad.

En conjunto, estos trabajos refuerzan la idea de que el diseño arquitectónico y la correcta explotación de la concurrencia son elementos esenciales para maximizar las ventajas que ofrece Vulkan en hardware moderno.

Capítulo 3

Desarrollo del TFM

En este capítulo se detalla en profundidad el proceso de construcción del motor gráfico desarrollado. Se describe la arquitectura general, las decisiones de diseño adoptadas y la implementación de cada uno de los subsistemas que lo conforman. El objetivo no es únicamente documentar el código fuente, sino también justificar las elecciones técnicas realizadas en base a literatura académica y manuales de referencia en programación gráfica moderna.

3.1. Arquitectura general del motor

El motor se ha concebido como una aplicación modular organizada en capas, donde cada subsistema agrupa responsabilidades bien definidas y establece interfaces con el resto del sistema. Este enfoque, ampliamente recomendado en el diseño de motores de juego y renderizado en tiempo real, favorece la mantenibilidad, la extensibilidad y el desacoplamiento entre componentes [11, 16–18].

A alto nivel, la aplicación se estructura en los siguientes módulos principales:

- **Subsistema de inicialización**: prepara el entorno de ejecución, es decir, creación de ventana, captura de eventos y contexto de presentación, y establece la conexión con Vulkan. Para la capa de ventana e input se utiliza *GLFW*. Sobre esta base se crea la instancia de Vulkan, se selecciona el dispositivo físico y se construye el dispositivo lógico con las colas necesarias. Pertenece al *Engine* y a la *Aplicación*.

  El énfasis en una inicialización explícita y reproducible está en línea con las guías técnicas sobre Vulkan y con experiencias recientes de adopción académica de APIs de bajo nivel [8–10].

- **Subsistema de renderizado**: constituye el núcleo del motor. Configura la *swapchain*, define los *render passes*, crea y registra *command buffers* y envía el trabajo a la GPU. La estructura del *frame*, es decir, adquisición de imagen, registro de comandos, envío a cola y presentación, sigue el patrón recomendado en la bibliografía técnica específica de Vulkan [9, 10]. Pertenece al *Engine*.

- **Subsistema de recursos**: gestiona buffers (vértices, índices y uniformes), descriptores y, en su caso, texturas. En la versión actual se soporta carga de geometría en formato OBJ y un *UBO global* para parámetros de cámara e iluminación. La organización de datos y la separación entre recursos y ejecución están alineadas con prácticas usadas en diversos motores [16, 17]. Pertenece al *Engine*.

- **Subsistema de interfaz**: integra *Dear ImGui* para la edición interactiva de parámetros, es decir, cámara, transformaciones y luces, y la inspección de estados de render. Aunque ImGui

es una librería de *modo inmediato*, su uso como herramienta de depuración y configuración es habitual en motores por su baja fricción y rápida iteración [11, 17]. Pertenece a la *Aplicación*.

- **Subsistema de validación y depuración**: combina *Validation Layers* de Vulkan y otras herramienta (*RenderDoc*). Esta combinación ha sido clave para evitar errores sutiles de sincronización o descriptores, en línea con recomendaciones de manuales y casos de estudio [8–10]. Pertenece al *Engine*.

Una de las grandes ventajas de esta arquitectura es que permite escalar funcionalidades:

- Ampliar el cargador de recursos.
- Incorporar nuevos *pipelines*.
- Introducir técnicas de iluminación más avanzadas.

La literatura sobre motores y gráficos en tiempo real subraya precisamente esta separación de responsabilidades como base para el crecimiento ordenado del software [2–4, 11, 17].

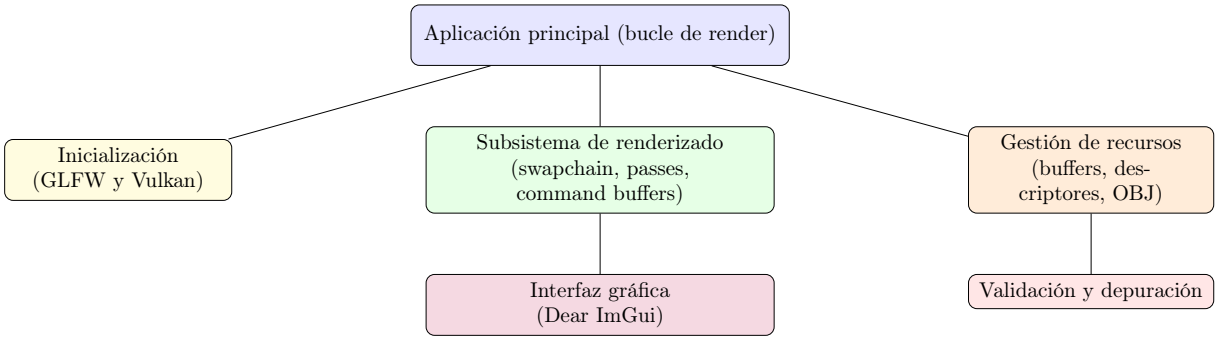


Figura 3.1: Arquitectura general del motor gráfico desarrollado.

El ciclo principal ejecuta en cada iteración:

(i) Procesamiento de eventos.

(ii) Actualización de parámetros y recursos.

(iii) Grabación de comandos (primarios y secundarios).

(iv) Envío a la cola de gráficos.

(v) Presentación en *swapchain*.

(vi) Presentación en render de la interfaz.

Este flujo refleja las buenas prácticas descritas en la bibliografía técnica y en experiencias de adopción de Vulkan [1, 8–10].

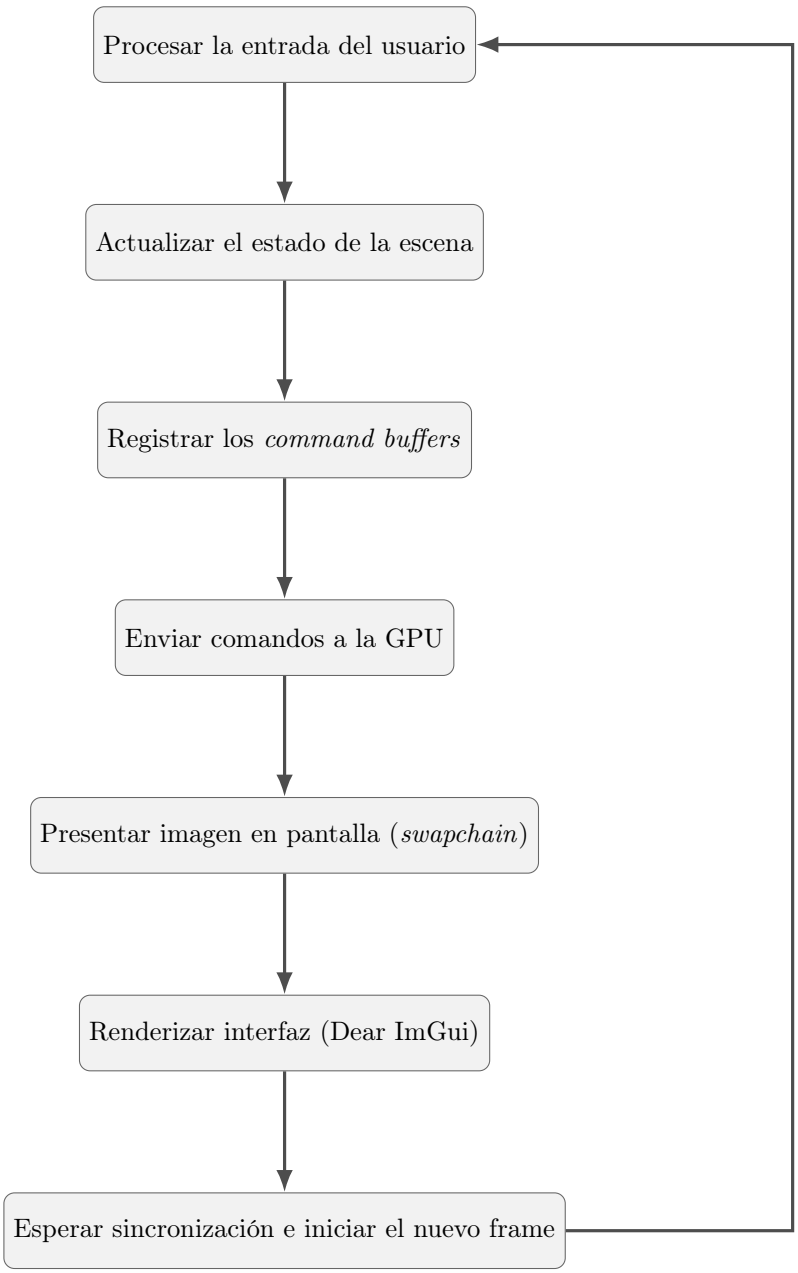
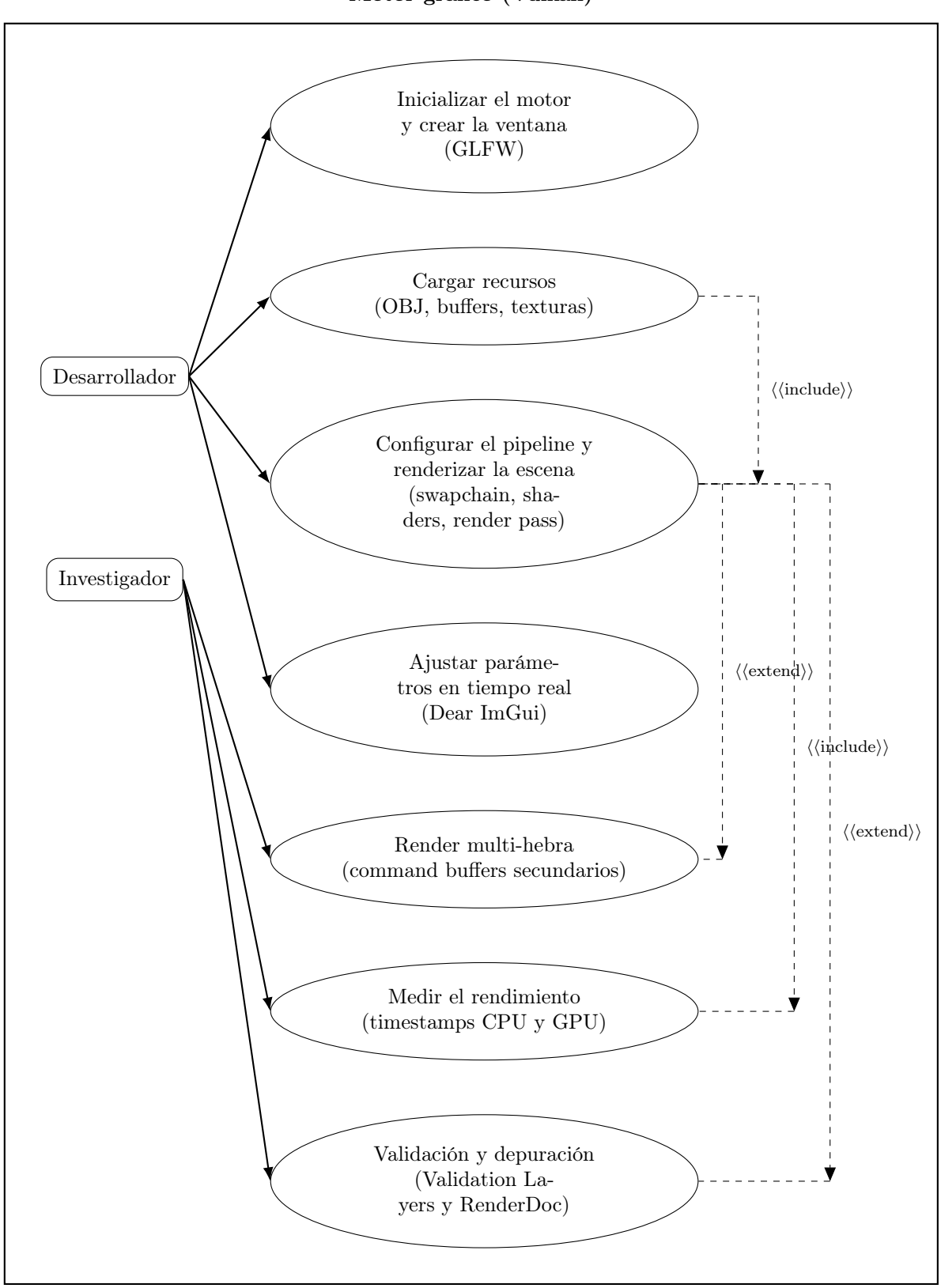


Figura 3.2: Flujo del ciclo de render en el motor gráfico desarrollado.

3.1.1. Casos de uso del motor



3.1.2. Diseño multi-hebra frente a versión mono-hebra

La aplicación se diseñó inicialmente en una única hebra, donde el *renderer* grababa todos los *command buffers* primarios de manera secuencial. Esta aproximación es simple pero desaprovecha las capacidades de paralelización de las GPUs modernas, dado que la preparación de comandos en CPU puede escalar en núcleos disponibles.

En la versión multi-hebra, el ciclo principal (`VulkanApplication::run`) divide el trabajo de grabación de draw calls en varias hebras de usuario (`std::thread`), cada una asociada a su propio `VkCommandPool` y a un conjunto de *secondary command buffers*. Este diseño aprovecha el hecho de que Vulkan permite grabar comandos secundarios en paralelo, siempre que se encadenen posteriormente en un `command buffer` primario mediante `vkCmdExecuteCommands`.

- **Hebra principal**:
  - Controla el bucle de render.
  - Llama a `renderer->beginFrame()` y `renderer->endFrame()`.
  - Prepara la cámara, matrices de proyección y de vista y actualiza los UBOs globales.
  - Inicia el render pass (`beginSwapChainRenderPass`) y establece la herencia para los secundarios mediante:

```
VkCommandBufferInheritanceInfo inherit{
   VK_STRUCTURE_TYPE_COMMAND_BUFFER_INHERITANCE_INFO
};
inherit.renderPass = renderer->getSwapChainRenderPass();
inherit.subpass = 0;
inherit.framebuffer = renderer->getCurrentFrameBuffer();
```

- **Hebras de trabajo**:
  - Cada hebra graba un subconjunto de `GameObject`s en un `VkCommandBuffer` secundario.
  - El reparto se realiza dividiendo el vector `view` (pares `{id, GameObject*}`) en *chunks* según el número de hebras `M`.

```
threads.emplace_back([&, cbSec, begin, end]
{
   basicRenderer.recordRange(frameInfo, cbSec, begin, end);
   vkEndCommandBuffer(cbSec);
});
```

Los `secondary command buffers` generados en paralelo se encadenan en la hebra principal:

```
if (!execList.empty())
{
   vkCmdExecuteCommands(commandBuffer,
      (uint32_t)execList.size(),
      execList.data());
}
```

Datos compartidos vs locales

- **Compartidos**: estructuras inmutables durante la grabación, como `FrameInfo`, los descriptores globales y el estado de cámara (`GlobalUbo`).

- **Locales**: cada hebra gestiona su propio `VkCommandPool` y un vector de secundarios (`workers[t].sec[frameIn`) evitando conflictos en la asignación de memoria.

Sincronización

- Se utiliza únicamente `join()` para esperar la finalización de todas las hebras antes de ejecutar los secundarios en el primario.
- No es necesaria sincronización explícita entre hebras, ya que ninguna escribe sobre memoria compartida mutable: cada hebra trabaja con su propio rango de objetos y sus propios command buffers.

Ventajas frente a mono-hebra

- Se reduce el tiempo total de grabación de draw calls en CPU, especialmente en escenas con gran número de objetos.
- La GPU sigue viendo un único `command buffer` primario, lo que mantiene la lógica de render inalterada.

3.1.3. Librería de hebras utilizada

La aplicación multi-hebra se ha implementado con la librería estándar de C++17, utilizando `std::thread`, `std::vector` y `join()` para gestionar el ciclo de vida de las hebras. No se ha recurrido a bibliotecas externas (*Boost*, *TBB*, etc.), lo que simplifica la portabilidad y reduce dependencias. Cada hebra se asocia con su propio `VkCommandPool`, creado con el flag `VK_COMMAND_POOL_CREATE_RESET_COMMAND_BUFFER_BIT`, garantizando independencia entre hebras y permitiendo reutilización de secundarios entre frames.

3.2. Gestión de la GPU con Vulkan

Vulkan promueve un modelo explícito de control del hardware gráfico: el desarrollador es responsable de la administración de memoria, de la construcción de *command buffers* y de la sincronización entre CPU y GPU. Este incremento de complejidad se ve compensado por un comportamiento más predecible y por un mejor aprovechamiento de arquitecturas modernas [9, 10].

Creación y recreación de la *swapchain*

La *swapchain* es el mecanismo de intercambio de imágenes con la pantalla. Su configuración implica los siguientes pasos:

1. **Elección del formato de superficie compatible**, por ejemplo: RGBA con 8 bits por canal.
2. **Selección del modo de presentación**, en este proyecto se ha utilizado *FIFO* para garantizar la sincronización vertical (V-Sync).
3. **Número de imágenes en el búfer de intercambio**, ya sea doble o triple *buffering*, lo cual afecta directamente a la latencia y al rendimiento.

La recreación controlada de la *swapchain* ante eventos como *resize* o pérdida de dispositivo forma parte de su ciclo de vida y está documentada en guías de referencia [9, 10]. Estudios comparativos entre Vulkan y OpenGL resaltan cómo estas decisiones impactan en la sobrecarga de CPU y en la eficiencia de la presentación [5–7].

Command pools y command buffers

Las órdenes de dibujo se graban en *command buffers* que, a su vez, se gestionan desde *command pools*. En el motor se emplean:

- **Buffers primarios**, que estructuran el frame (inicio y fin del *render pass*, estados globales y ejecución de secundarios).
- **Buffers secundarios**, que encapsulan trabajo independiente (por ejemplo, lotes de mallas) y habilitan el registro en paralelo desde múltiples hilos de CPU [8, 24].

El uso de buffers secundarios, combinado con *frames in flight*, permite preparar el siguiente frame mientras la GPU procesa el actual, un patrón habitual en motores modernos [11, 17].

Colas de ejecución (*queues*)

El dispositivo lógico expone al menos una cola de gráficos. La arquitectura del motor asigna a esta cola el *submit* de los *command buffers* del frame. La separación futura en colas de transferencia o cómputo es compatible con el diseño actual, y es una extensión habitual cuando se incorporan cargas asíncronas de recursos [9, 10].

Sincronización explícita entre CPU y GPU

La sincronización se realiza con:

- **Semáforos**: garantizan el orden correcto entre etapas de GPU: en primer lugar, adquirir la imagen, después, renderizar, y finalmente, presentar la información.
- **Fences**: sincronizan la CPU con la finalización del trabajo en GPU antes de reusar recursos.

Estas primitivas, junto con el patrón de *frames in flight*, contribuyen a un flujo estable y reproducible [8–10]. Comparativas recientes entre APIs señalan la relevancia de la sincronización explícita en el uso eficiente de CPU y GPU [5–7].

Gestión de memoria

El motor implementa la selección explícita de tipos de memoria (local de GPU frente a visible por CPU), el mapeo para actualización de UBOs y la liberación segura durante la destrucción o recreación de recursos dependientes de *swapchain*. Este control detallado es esencial para evitar fragmentación y *memory leaks* [9, 10]. En diversas aplicaciones, este enfoque ha permitido crear visualizadores de alto rendimiento con Vulkan [12, 13].

Discusión técnica

La implementación adoptada hace uso de prácticas respaldadas tanto por manuales como por experiencias académicas: inicialización explícita, *swapchain* recreable, *frames in flight*, *command buffers* secundarios y sincronización [8–10]. La literatura compara este modelo con APIs tradicionales, destacando su potencial para reducir sobrecarga de CPU y mejorar la previsibilidad del pipeline [5–7]. Además, la capacidad de grabar comandos en paralelo sienta la base

para escalado en escenas con múltiples entidades [24] y conecta con la tendencia general de los motores hacia arquitecturas concurrentes [11, 17].

3.3. Pipeline gráfico y shaders

El *pipeline* gráfico en Vulkan es un objeto configurable que encapsula todos los estados necesarios para el renderizado. A diferencia de OpenGL, donde los estados del pipeline son mutables y pueden alterarse dinámicamente en tiempo de ejecución, en Vulkan la mayor parte de la configuración se define de manera estática y se compila en un objeto de pipeline inmutable [8–10].

Etapas configuradas del pipeline

- **Entrada de vértices**: definida a través de *vertex buffers* que contienen posiciones, normales y coordenadas de textura [11, 18].
- ***Vertex Shader***: aplica las transformaciones geométricas (modelo, vista y proyección) con *GLM* [16, 17].
- **Ensamblado de primitivas**: agrupa los vértices en triángulos indexados y configura el *back-face culling*.
- **Rasterización**: convierte las primitivas en fragmentos y aplica culling, modo de relleno y pruebas de profundidad.
- ***Fragment Shader***: calcula el color final con iluminación puntual difusa y especular.
- **Salida de color y profundidad**: los fragmentos resultantes se almacenan en el framebuffer asociado a la *swapchain* (un *color attachment* y un *depth attachment*).

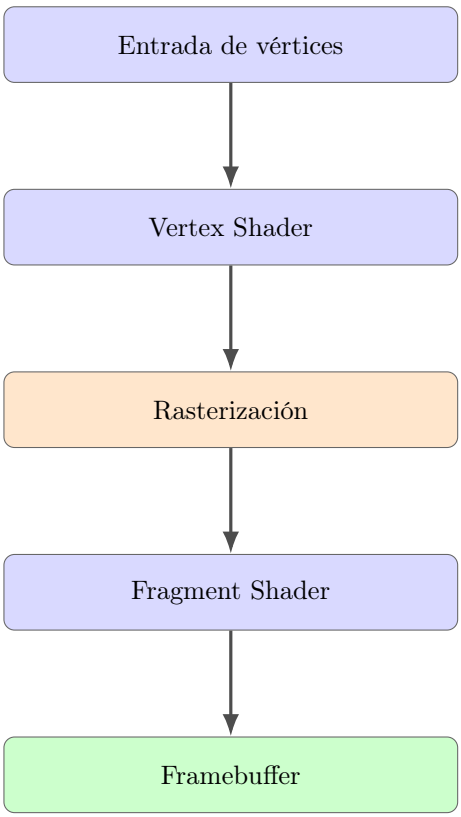


Figura 3.3: Etapas principales del pipeline gráfico en Vulkan.

Shaders en SPIR-V

Los shaders se desarrollaron en GLSL y se compilaron a SPIR-V mediante `glslc` [9, 10]. SPIR-V es un formato intermedio portable que facilita la validación estática y la compatibilidad entre plataformas [12, 13].

```
layout(location = 0) in vec3 inPosition;
layout(location = 1) in vec3 inNormal;

layout(binding = 0) uniform UBO {
    mat4 model;
    mat4 view;
    mat4 proj;
} ubo;

void main() {
    gl_Position = ubo.proj * ubo.view * ubo.model * vec4(inPosition, 1.0);
}
```

Este shader multiplica las posiciones de vértice por las matrices de modelo, vista y proyección, generando posiciones en el *clip space*. Su diseño minimalista ha sido suficiente para validar el flujo de datos y comprobar la correcta interacción entre CPU y GPU en Vulkan.

Iluminación puntual

El *fragment shader* implementa un modelo de iluminación puntual con términos difusos y especulares. Aunque básico, permite validar la transferencia de parámetros mediante UBOs, la coherencia de normales y la extensibilidad hacia técnicas más avanzadas [17**?**].

3.4. Gestión de recursos

La gestión eficiente de recursos (buffers, descriptores y texturas) es uno de los retos más significativos en Vulkan [9, 10].

Buffers de vértices e índices

Se implementaron funciones para crear buffers de vértices e índices. El uso de geometría indexada reduce redundancia y mejora la eficiencia de la caché de vértices [18**?**]. La memoria se reserva explícitamente en regiones locales de GPU.

Uniform Buffer Objects (UBOs)

Se emplea un UBO global con matrices de cámara y parámetros de iluminación (posición, color e intensidad). La actualización se realiza mediante mapeo persistente por frame, evitando copias redundantes [9, 10, 12].

Descriptores y layouts

Se usa un *descriptor set layout* minimalista (UBO global y, opcionalmente, textura), fácil de extender a múltiples texturas [17, 20, 21].

Carga de modelos en formato OBJ

Se soporta el formato OBJ por su simplicidad y adopción educativa [22**?**]. Se procesan posiciones, normales y coordenadas de textura generando buffers en GPU.

Discusión técnica

La combinación de buffers indexados, UBOs globales, descriptores y carga OBJ equilibra simplicidad y eficiencia [2–4, 20]. El control explícito de memoria y descriptores alinea el motor con prácticas modernas y comparativas entre APIs [5–7].

3.5. Estructura de clases del motor (UML)

Esta sección presenta la estructura de clases del motor y detalla: (i) la responsabilidad de cada clase, (ii) sus principales métodos y atributos, (iii) las dependencias y (iv) diagramas UML.

3.5.1. Diagrama de paquetes

La Figura 3.4 sintetiza la organización por paquetes y sus relaciones.

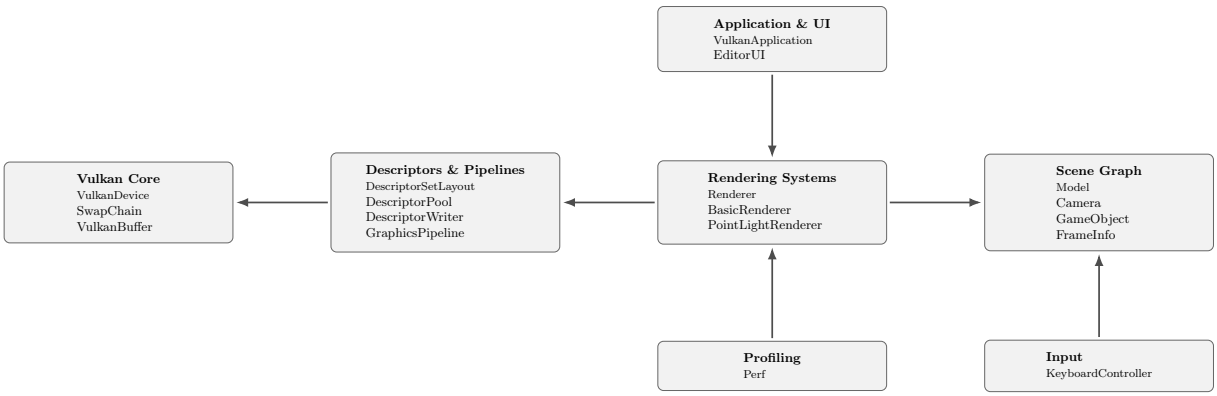


Figura 3.4: Diagrama de paquetes UML.

3.5.2. Diagrama de clases

3.5.3. Diagrama de secuencia

3.5.4. Resumen de las clases

A continuación se presenta un resumen por clase. Para cada una se indica su responsabilidad principal, la interfaz y sus dependencias.

1. **Window**
   - *Responsabilidad*: creación y gestión de la ventana GLFW y su superficie de presentación.
   - *Interfaz*: `getExtent()`, `shouldClose()`, `createWindowSurface()`. Atributos: `width`, `height`, `framebufferResized`, `windowName`, `GLFWwindow* window`.
   - *Dependencias*: usa GLFW y Vulkan surface. Es usada por `VulkanDevice`, `Renderer`, `EditorUI`.
2. **VulkanDevice**
   - *Responsabilidad*: instanciación de Vulkan, selección del dispositivo físico y creación del dispositivo lógico, colas y `VkCommandPool`.
   - *Interfaz*: `getInstance()`, `getDevice()`, `getSurface()`, `getGraphicsQueue()`, `createBuffer()`, `copyBuffer()`, `beginSingleUseCommands()`, `endSingleUseCommands()`. Atributos: `VkInstance`, `VkDevice logicalDevice`, `VkPhysicalDevice`, `VkQueue`, `VkCommandPool`.
   - *Dependencias*: usa `Window`. Es usada por `SwapChain`, `Renderer`, `GraphicsPipeline`, `VulkanBuffer`, `Descriptor*`, `Model`.
3. **SwapChain**
   - *Responsabilidad*: gestión de los *swap buffers*, `VkRenderPass`, `VkFramebuffer`s y recursos de profundidad.
   - *Interfaz*: `acquireNextImage()`, `submitCommandBuffers()`, `getRenderPass()`, `imageCount()`. Atributos: `VkSwapchainKHR`, imágenes, `VkImageView`s, `VkFramebuffer`s, `VkExtent2D`.
   - *Dependencias*: usa `VulkanDevice`. Es usada por `Renderer`.
4. **Renderer**

- *Responsabilidad*: coordinar el ciclo de renderizado del frame, gestión del render pass y de los comandos.
- *Interfaz*: `beginFrame()`, `endFrame()`, `beginSwapChainRenderPass()`, `endSwapChainRenderPass()`, `getPerf()`. Atributos: `SwapChain`, *command buffers*, índices de imagen y de frame, `Perf`.
- *Dependencias*: usa `SwapChain`, `VulkanDevice`, `Perf`. Es usada por `VulkanApplication`.

5. **GraphicsPipeline**
   - *Responsabilidad*: creación de la `VkPipeline` (shaders SPIR-V y configuración de estados).
   - *Interfaz*: `bind()`, `defaultConfig()`, `enableAlphaBlending()`. Atributos: `VkPipeline`, `VkShaderModule`s.
   - *Dependencias*: usa `VulkanDevice`. Es usada por `BasicRenderer` y `PointLightSystem`.
6. **VulkanBuffer**
   - *Responsabilidad*: encapsular buffers de GPU (vértices, índices, UBOs) con mapeo y *flush*.
   - *Interfaz*: `map()`, `unmap()`, `writeToBuffer()`, `flush()`, `descriptorInfo()`. Atributos: `VkBuffer`, `VkDeviceMemory`, tamaños y alineamiento, *flags*.
   - *Dependencias*: usa `VulkanDevice`. Es usada por `Model`.
7. **Model**
   - *Responsabilidad*: gestión de la geometría (carga de OBJ y buffers de vértices e índices).
   - *Interfaz*: `bind()`, `draw()`, `fromFile()`. Atributos: `VulkanBuffer` y contadores.
   - *Dependencias*: usa `VulkanBuffer`, `VulkanDevice`. Es usada por `GameObject` y `BasicRenderer`.
8. **Camera**
   - *Responsabilidad*: cálculo de matrices de proyección, vista e inversa, utilidades tipo `lookAt`.
   - *Interfaz*: `setPerspectiveProjection()`, `setOrthographicProjection()`, `setViewYXZ()`, `lookAtTarget()`. Atributos: `glm::mat4 projection, view, inverseView`.
   - *Dependencias*: es utilizada por `FrameInfo` y por los shaders vía UBO.
9. **DescriptorPool, DescriptorSetLayout, DescriptorWriter**
   - *Responsabilidad*: gestión de descriptores.
   - *Interfaz*: `DescriptorPool::allocate(),free(),reset()`, `DescriptorSetLayout::get()`, `DescriptorWriter::writeBuffer()/,writeImage(),build()`.
   - *Dependencias*: usan `VulkanDevice`. Son utilizados en la inicialización de UBOs globales y por los sistemas de renderizado.
10. **BasicRenderer**
    - *Responsabilidad*: renderizado de mallas opacas.
    - *Interfaz*: `render(FrameInfo&)`, creación de `VkPipelineLayout` y `GraphicsPipeline`. Atributos: `GraphicsPipeline`, `VkPipelineLayout`.

- *Dependencias*: usa `GraphicsPipeline`, `DescriptorSetLayout`, `VulkanDevice`. Es usado por `VulkanApplication` en el bucle de renderizado.

11. **PointLightSystem**
    - *Responsabilidad*: actualizar las luces puntuales en el UBO global y dibujar sus representaciones en pantalla.
    - *Interfaz*: `update(FrameInfo&, GlobalUbo&)`, `render(FrameInfo&)`.
      Atributos: `GraphicsPipeline` de iluminación y `VkPipelineLayout`.
    - *Dependencias*: usa `GraphicsPipeline`, `DescriptorSetLayout`, `VulkanDevice`. Es utilizado en el ciclo de frame de la aplicación.
12. **GameObject**
    - *Responsabilidad*: entidad de escena con `Transform`, `Model` y, en este caso, `PointLight`.
    - *Interfaz*: Atributos: `transform`, `color`, `model`, `light`, `id`.
    - *Dependencias*: es utilizado por `FrameInfo`, `BasicRenderer` y `PointLightSystem`.
13. **Perf (GpuTimer, CpuUsageMonitor)**
    - *Responsabilidad*: métricas por frame en CPU y GPU e integración con ImGui.
    - *Dependencias*: es utilizado por `Renderer` y `EditorUI`.
14. **EditorUI**
    - *Responsabilidad*: integración con Dear ImGui.
    - *Dependencias*: usa `Window` y `Perf`. Es utilizado por `VulkanApplication`.
15. **FrameInfo, GlobalUbo, GpuPointLight**
    - *Responsabilidad*: contenedor de datos por frame.
    - *Interfaz/atributos*: `frameIndex`, `frameTime`, `VkCommandBuffer`, `Camera&`, `VkDescriptorSet`, `std::unordered_map<id,GameObject>&`.
16. **VulkanApplication**
    - *Responsabilidad*: capa de orquestación de la aplicación.
    - *Dependencias*: usa `Renderer`, `VulkanDevice`, `DescriptorPool`, `EditorUI`, `KeyboardMovementController`.

3.5.5. Fragmentos breves de código

Información por frame (`FrameInfo`) En el siguiente código se define el contexto mínimo que se pasa a los sistemas en cada iteración del bucle de renderizado. Reúne la referencia a la cámara activa, el `VkCommandBuffer` del frame, el descriptor global y la colección de objetos de escena.

```
// Estructura de contexto por frame.
struct FrameInfo {
  int frameIndex = 0;
  float frameTime = 0.0f;
  VkCommandBuffer commandBuffer = VK_NULL_HANDLE;
  Camera& camera;
  VkDescriptorSet globalDescriptorSet = VK_NULL_HANDLE;
  std::unordered_map<unsigned int, GameObject>& gameObjects;
};
```

Renderizado básico de mallas (`BasicRenderer::render`) En este caso es la implementación del bucle para el dibujo de mallas opacas. Enlaza la `GraphicsPipeline` y el descriptor global, prepara *push constants* por objeto y emite las llamadas `draw` para cada `GameObject` con un modelo válido.

```
// Enlaza pipeline y descriptor global, itera objetos y emite llamadas draw
void BasicRenderer::render(FrameInfo& frameInfo) {
  pipeline->bind(frameInfo.commandBuffer);
  vkCmdBindDescriptorSets(
    frameInfo.commandBuffer, VK_PIPELINE_BIND_POINT_GRAPHICS,
    pipelineLayout, 0, 1, &frameInfo.globalDescriptorSet, 0, nullptr);

  for (auto& entry : frameInfo.gameObjects) {
    GameObject& obj = entry.second;
    if (!obj.model) continue;

    PushConstantData push{};
    push.modelMatrix = obj.transform.matrix();
    push.normalMatrix = obj.transform.normalMatrix();

    vkCmdPushConstants(
      frameInfo.commandBuffer, pipelineLayout,
      VK_SHADER_STAGE_VERTEX_BIT | VK_SHADER_STAGE_FRAGMENT_BIT,
      0, sizeof(PushConstantData), &push);

    obj.model->bind(frameInfo.commandBuffer);
    obj.model->draw(frameInfo.commandBuffer);
  }
}
```

Datos globales de iluminación (`GlobalUbo`) Finalmente, se muestra la estructura de datos residente en un UBO global con las matrices de cámara, la luz ambiental y un conjunto acotado de luces puntuales para el frame.

```
struct GpuPointLight { glm::vec4 position{}, color{}; };
struct GlobalUbo {
  glm::mat4 projection{1.0f}, view{1.0f}, inverseView{1.0f};
  glm::vec4 ambientLightColor{1.0f, 1.0f, 1.0f, 0.05f};
  GpuPointLight pointLights[10];
  uint32_t numLights = 0;
  alignas(16) int _padding[3]{};
};
```

Capítulo 4

Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos tras la implementación del motor gráfico y la ejecución de una serie de pruebas orientadas a evaluar su rendimiento y comportamiento en distintos escenarios. El análisis se centra en métricas clave de bajo nivel: número de *frames por segundo* (FPS), tiempo de procesamiento por fotograma en CPU y GPU, así como el uso porcentual de CPU a nivel de sistema y de proceso. Estas medidas permiten obtener una visión precisa de la eficiencia del motor, en línea con metodologías utilizadas en la literatura [2, 5, 8, 12].

Las pruebas se llevaron a cabo en un equipo de gama media-alta, con procesador Intel Core i7-11800H, tarjeta gráfica NVIDIA RTX 3070 con 16GB, 16GB de RAM DDR4 y sistema operativo Windows 11. Este tipo de configuración es representativa del hardware doméstico común utilizado tanto para videojuegos independientes como para prototipos de motores gráficos académicos [4, 19, 22].

4.1. Evaluación del rendimiento

Con el fin de validar el rendimiento del motor, se diseñaron tres escenas de complejidad creciente:

- Un cubo rotando en el centro de la pantalla,
- Una cuadrícula tridimensional de 100 cubos.
- Un modelo en formato OBJ.

Cada una de estas escenas se ejecutó bajo dos configuraciones: en modo **mono-hebra** y en modo **multi-hebra**. Esto permite analizar el impacto de la paralelización en la tasa de FPS, los tiempos de CPU y GPU por fotograma, y el uso de CPU a nivel de sistema y de proceso.

Tabla 4.1: FPS promedio comparando ejecución mono-hebra y multi-hebra.

Escenario	**Mono-hebra**	**Multi-hebra**
Escena simple (1 cubo)	580	600
Escena intermedia (100 cubos)	280	420
Escena compleja (modelo OBJ)	190	322

Tabla 4.2: Tiempos promedio por fotograma en CPU y GPU comparando ejecución mono-hebra y multi-hebra.

Escenario	Configuración	CPU frame (ms)	GPU frame (ms)
Escena simple (1 cubo)	Mono-hebra	1.7	≈0.01
	Multi-hebra	1.6	≈0.01
Escena intermedia (100 cubos)	Mono-hebra	3.5	≈0.02
	Multi-hebra	2.4	≈0.02
Escena compleja (modelo OBJ)	Mono-hebra	5.2	≈0.05
	Multi-hebra	3.1	≈0.05

Tabla 4.3: Uso promedio de CPU comparando ejecución mono-hebra y multi-hebra.

Escenario	Configuración	CPU system (%)	CPU process (%)
Escena simple (1 cubo)	Mono-hebra	4.1	0.5
	Multi-hebra	3.2	0.3
Escena intermedia (100 cubos)	Mono-hebra	6.3	0.9
	Multi-hebra	4.5	0.5
Escena compleja (modelo OBJ)	Mono-hebra	8.5	1.4
	Multi-hebra	5.6	0.7

4.2. Discusión técnica

Los resultados muestran la influencia de la paralelización en el rendimiento del motor. Teniendo esto en cuenta, se puede destacar lo siguiente:

- **Coherencia entre FPS y CPU frame.** La relación entre FPS y tiempo de CPU por fotograma es consistente. En estas pruebas de rendimiento se obtuvo una tasa de 322 FPS en la escena OBJ, lo que equivalen a un tiempo por forograma aproximado de 3.1 ms. Este hecho valida la fiabilidad de las medidas. En la configuración mono-hebra, la caída a 190 FPS corresponde a un incremento del tiempo por fotograma hasta 5.2 ms, evidenciando la mayor carga por no distribuir las tareas en varios hebras.

- **La GPU no es un recurso limitante.** En todas las configuraciones, el tiempo de GPU por fotograma aparece cercano a cero. Esto indica que la GPU no constituye un cuello de botella en los escenarios probados, ya que las escenas diseñadas son relativamente simples en términos de complejidad gráfica. No obstante, también debe considerarse que esta métrica depende de la precisión de los *timestamps*, que pueden infraestimar valores muy pequeños.

- **Uso de CPU a nivel de sistema y proceso.** Aunque los FPS y los tiempos por fotograma permiten medir el rendimiento inmediato, el uso de CPU ofrece una perspectiva sobre la eficiencia global del motor. En modo mono-hebra, el uso del proceso se incrementa significativamente, hasta 1.4 % en la escena OBJ, lo que refleja que una única hebra tiende a saturarse más fácilmente. En cambio, en multi-hebra, la carga se reparte, reduciendo tanto el uso del proceso como el del sistema en general.

- **Escalabilidad real con Vulkan.** La diferencia entre mono-hebra y multi-hebra es mínima en la escena simple (menos de un 5 % de variación en FPS), pero se amplifica a medida que la carga geométrica aumenta. En la escena intermedia, la ganancia en FPS es del 50 %, y en la escena compleja, la mejora supera el 65 %. Esto confirma que la arquitectura del motor aprovecha correctamente la capacidad de Vulkan para distribuir la construcción de *command buffers* entre múltiples hebras.

En conjunto, estos resultados confirman que la paralelización es un factor clave en motores gráficos modernos. Mientras que en casos simples la diferencia es marginal, en escenarios de mayor complejidad la ejecución multi-hebra no solo incrementa el rendimiento, sino que también mejora la eficiencia en el uso de los recursos del sistema. Este hallazgo es consistente con los estudios previos que destacan la superioridad de Vulkan frente a APIs más tradicionales cuando se trata de aprovechar arquitecturas multinúcleo [6, 9, 24].

Capítulo 5

Planificación y gestión del proyecto

En la siguiente sección se aborda tanto la planificación estratégica y la gestión eficiente del proyecto como el análisis de la viabilidad de los criterios de sostenibilidad aplicados. Además, se detallan las metodologías empleadas y los hitos alcanzados, proporcionando así una visión integral que pueda ser una referencia útil para extensiones futuras de este trabajo. El desarrollo comenzó en **febrero de 2025** con una dedicación sostenida de **2 horas diarias de lunes a viernes** hasta el **9 de septiembre de 2025**. La organización temporal y técnica se orientó a la entrega incremental de una funcionalidad verificable y a la obtención temprana de resultados que puedan ser cuantificados.

5.1. Metodología y ciclo de vida

Se adoptó un ciclo de vida **incremental e iterativo**, con iteraciones cortas y objetivos claramente definidos. En cada iteración se llevaron a cabo las siguientes actividades:

1. **Análisis y diseño**: concreción de requisitos técnicos y decisiones arquitectónicas.
2. **Implementación y pruebas**: desarrollo de la funcionalidad prevista y elaboración de pruebas unitarias y funcionales.
3. **Integración y validación**: integración con el código existente, verificación funcional y medición de rendimiento.
4. **Revisión y refactorización**: limpieza del código, mejora de interfaces y documentación interna.

Este enfoque permitió ajustar el alcance en función de los resultados y priorizar tareas con mayor impacto en rendimiento y mantenibilidad.

5.2. Herramientas y plataformas utilizadas para el desarrollo del proyecto

El proyecto se desarrolló esencialmente sobre **Microsoft Visual Studio** y el **conjunto de herramientas MSVC**, apoyándose en el **Vulkan SDK** y en bibliotecas ampliamente utilizadas en gráficos en tiempo real. De forma detallada:

- **Entorno de desarrollo y compilación**: *Microsoft Visual Studio* (Windows), con *MSVC* como *toolset* principal. Los proyectos se gestionaron mediante soluciones `.sln` y proyectos `.vcxproj`.

- **API gráfica**: *Vulkan* (SDK instalado en el sistema), aprovechando su modelo explícito de recursos, la grabación de *command buffers* y la sincronización.
- **Bibliotecas de apoyo**: *GLFW* (gestión de ventana e input), *GLM* (matemáticas 3D) y *Dear ImGui* (interfaz gráfica).
- **Depuración y diagnóstico**: *Vulkan Validation Layers* y *RenderDoc* para el análisis de estados de la *pipeline*.
- **Control de versiones**: *Git* para el versionado del código fuente.
- **Asistencia mediante IA**: uso continuado de **ChatGPT** como apoyo en la redacción técnica, revisión de código, propuestas de optimización y contrastación de conceptos. No se emplearon otras herramientas de IA.

5.3. Costes en tiempo y recursos

Dedicación real

Se mantuvo una dedicación de 2 horas por día laborable (lunes a viernes). El cómputo por mes es el siguiente:

Tabla 5.1: Dedicación por mes (desde febrero al 9 de septiembre de 2025).

Mes	Días laborables	Horas (2 horas por día)
Febrero 2025	20	40
Marzo 2025	21	42
Abril 2025	22	44
Mayo 2025	22	44
Junio 2025	21	42
Julio 2025	23	46
Agosto 2025	21	42
Septiembre 2025 (del 1 al 9)	7	14
Total	**157**	**314**

En caso de estimar un coste de mano de obra, puede calcularse como:

$$\text{Coste estimado} \;=\; 314 \text{ horas} \;\times\; (\text{correspondiente } € \text{ por hora}).$$

El software utilizado es de uso libre o académico, el consumo energético y de red es reducido y asumible en el marco del TFM.

5.4. Gestión del proyecto. Planificación temporal. Diagrama de Gantt

La Figura 5.2 recoge la planificación desde febrero hasta el 15 de agosto de 2025, estructurada en cinco bloques:

- Análisis y diseño.
- Núcleo del motor.
- Módulos y sistemas.
- Optimización y soporte multi-hebra.
- Validación y documentación.

Figura 5.1: Planificación temporal del proyecto (desde febrero al 30 de junio de 2025).

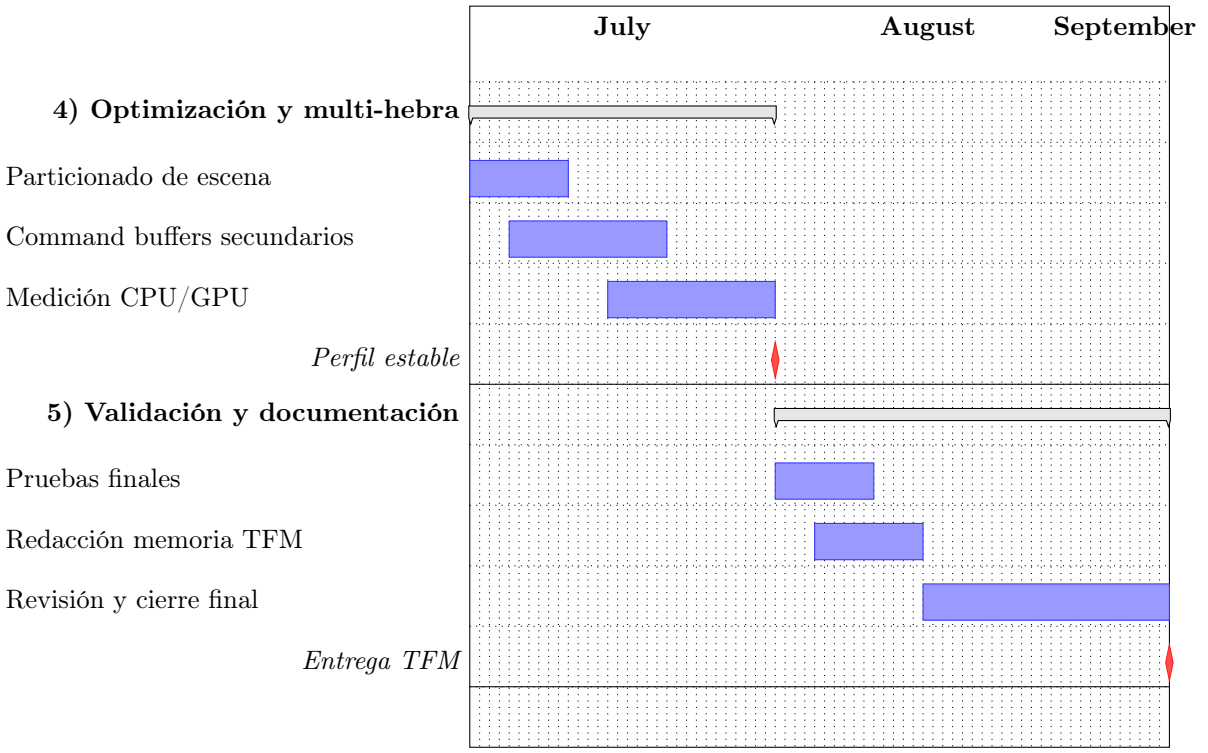


Figura 5.2: Planificación temporal del proyecto (desde el 1 de julio al 9 de septiembre de 2025).

Capítulo 6

Innovación

Este capítulo analiza la innovación potencial del proyecto en el contexto de su aplicación en entornos empresariales, tanto en el sector del desarrollo de motores gráficos como en el de aplicaciones de visualización interactiva. El motor desarrollado combina tecnologías de bajo nivel (*Vulkan*) con un diseño modular y optimizado para sistemas multi-hebra, ofreciendo un rendimiento elevado en hardware estándar, lo que abre oportunidades en ámbitos más allá del entretenimiento.

6.1. Estudio del mercado

El mercado de motores gráficos está dominado por aplicaciones comerciales consolidadas (por ejemplo Unity, Unreal Engine) y un número reducido de motores de código abierto ampliamente utilizados. Sin embargo, la mayoría de estas opciones son de propósito general, con requisitos de hardware elevados y arquitecturas que no siempre permiten un control del rendimiento o de la gestión de recursos.

En este contexto, existe un nicho para motores gráficos ligeros y especializados, con control explícito de la GPU y capacidad de integración en aplicaciones de visualización científica, simulación o *serious games*.

6.1.1. Segmentos de clientes

- Empresas de simulación que requieren visualización 3D en tiempo real.
- Centros de investigación y universidades que desarrollen aplicaciones interactivas.
- Estudios independientes de videojuegos interesados en un motor optimizado y de bajo consumo de recursos.
- Fabricantes de hardware que necesiten herramientas internas de prueba y validación.

6.1.2. Competidores

Los principales competidores directos serían otros motores ligeros como *bgfx*, *Ogre3D* o *Magnum*, y, en menor medida, motores comerciales con licencias flexibles. La ventaja competitiva del presente desarrollo radica en:

- Implementación optimizada para Vulkan desde su núcleo, sin capas de compatibilidad heredadas.
- Arquitectura modular que permite añadir o sustituir subsistemas de forma controlada.

- Soporte multi-hebra desde el diseño inicial, aprovechando CPU multi-core.

6.2. Propuesta de valor

Ofrecer un motor gráfico modular, eficiente y multiplataforma basado en Vulkan, con un núcleo optimizado para entornos multi-hebra y adaptado a las necesidades de proyectos que prioricen control, rendimiento y bajo consumo de recursos.

6.3. Recursos clave

- Conocimiento técnico en programación gráfica de bajo nivel.
- Base de código en C++17 con arquitectura documentada.
- Herramientas de depuración y validación (RenderDoc, Validation Layers).
- Repositorio Git estructurado con control de versiones.

6.4. Actividades clave

- Desarrollo y optimización de módulos gráficos.
- Mantenimiento de la compatibilidad con Vulkan en versiones futuras.
- Creación de documentación y ejemplos de uso.
- Soporte a integradores y desarrolladores externos.

6.5. Socios y alianzas clave

Potenciales alianzas con:

- Instituciones académicas para proyectos conjuntos.
- Empresas de simulación para casos de uso reales.
- Comunidades de software libres.

6.6. Estructura de costes prevista

- Desarrollo inicial: 314 horas (véase capítulo de planificación).
- Coste de infraestructura: bajo, dado que se utilizan herramientas gratuitas o académicas.
- Mantenimiento: estimado entre 5 y 10 horas mensuales.

6.7. Vías de ingresos

- Licencias comerciales con soporte técnico.
- Servicios de integración y personalización.
- Consultoría en optimización gráfica.

Proyección hipotética a 3 años:

1. Año 1: ingresos reducidos, centrados en proyectos piloto.
2. Año 2: crecimiento por consolidación de clientes iniciales.
3. Año 3: diversificación hacia nuevos sectores.

6.8. Canales de distribución

- Repositorios en línea (GitHub, GitLab).
- Distribución empaquetada.
- Documentación y ejemplos accesibles en una posible web oficial.

6.9. Relación con los clientes

- Soporte directo vía correo electrónico o plataformas de gestión de incidencias.
- Foros o canales comunitarios para intercambio de experiencias.
- Publicación regular de actualizaciones y hojas de ruta.

6.10. Descripción del Producto Mínimo Viable

Un motor gráfico funcional capaz de:

- Renderizar modelos 3D con iluminación básica.
- Gestionar múltiples *command buffers* en paralelo.
- Proporcionar interfaz gráfica de depuración mediante Dear ImGui.

6.11. Roadmap de desarrollo

1. Extensión del sistema de materiales y texturas.
2. Implementación de sombras dinámicas y *deferred shading*.
3. Soporte para animaciones esqueléticas.
4. Mejora del sistema de carga de escenas.

6.12. Aspectos legales

- Licencia de código abierta para uso académico y no comercial (por ejemplo MIT o Apache 2.0).
- Respeto a las licencias de bibliotecas utilizadas (GLFW, GLM, Dear ImGui, Vulkan SDK).
- Sin uso de código protegido por patentes.

Capítulo 7

Manual de usuario

A continuación se proporciona una guía detallada paso a paso para la instalación, configuración y ejecución del motor de renderizado desarrollado, asegurando su correcto funcionamiento en diferentes entornos. Incluye especificaciones técnicas sobre los requisitos del sistema (hardware, software y dependencias), parámetros de configuración optimizados, así como ejemplos prácticos de uso y posibles soluciones a errores comunes. Además, se describen protocolos de validación para verificar el rendimiento y la estabilidad del sistema, facilitando así su implementación en escenarios reales tanto para desarrolladores como para usuarios finales. La información se basa exclusivamente en las funcionalidades efectivamente implementadas en el código fuente del proyecto.

7.1. Requisitos del sistema

Hardware mínimo recomendado

- CPU multinúcleo (4 hilos o más).
- GPU compatible con *Vulkan 1.3* y controladores actualizados.
- 8 GB de memoria RAM.
- Al menos 200 MB de almacenamiento libre.

Software necesario

- **Sistema operativo**: Windows 10/11 (64 bits).
- **Entorno de desarrollo**: Microsoft Visual Studio (2019 o posterior) con el compilador MSVC.
- **Vulkan SDK**: versión 1.3 o superior (descargable desde `https://vulkan.lunarg.com/sdk/home`).
- Git para obtener el código fuente.

7.2. Instalación

1. Clonar el repositorio desde el control de versiones:

```
git clone <URL-del-repositorio>
```

2. Instalar el Vulkan SDK y configurar las rutas necesarias en las variables de entorno.
3. Abrir el archivo de solución `.sln` con Microsoft Visual Studio.
4. Compilar el proyecto seleccionando la configuración deseada (`Debug` o `Release`).

7.3. Ejecución

- El motor se ejecuta iniciando el binario compilado (`motor.exe`) directamente desde Visual Studio o desde el explorador de archivos.
- No se requieren argumentos de línea de comandos para su funcionamiento. Al iniciarse, el programa carga la escena de demostración incluida en el proyecto.
- El motor crea una ventana de render donde se muestra el modelo 3D y se permite la interacción en tiempo real.

7.4. Interacción con la aplicación

Durante la ejecución:

- Se renderiza un modelo de prueba contenido en los recursos internos del proyecto.
- La cámara permite rotación y zoom mediante controles implementados en el código.
- La interfaz gráfica, desarrollada con *Dear ImGui*, ofrece ajustes para:
  - Parámetros de iluminación puntual.
  - Transformaciones básicas del modelo (traslación, rotación, escala).
  - Visualización de estadísticas de rendimiento.

Controles de teclado y ratón

El control de la cámara implementado es de tipo *fly camera*. La rotación (yaw y pitch) y el movimiento se realizan únicamente con teclado. El ratón se reserva para la interfaz *Dear ImGui*.

Tabla 7.1: Mapa de teclas para la cámara.

Acción	**Tecla**
(Yaw) Girar a la izquierda	Flecha izquierda (`Left`)
(Yaw) Girar a la derecha	Flecha derecha (`Right`)
(Pitch) Mirar arriba	Flecha arriba (`Up`)
(Pitch) Mirar abajo	Flecha abajo (`Down`)
Avanzar	`W`
Retroceder	`S`
Desplazamiento lateral izquierda	`A`
Desplazamiento lateral derecha	`D`
Ascender	`E`
Descender	`Q`

7.5. Solución de problemas

- **La aplicación no se inicia**: comprobar que la GPU soporta Vulkan 1.3 y que los controladores están actualizados.
- **Error en compilación**: verificar que el Vulkan SDK está instalado y correctamente configurado en Visual Studio.
- **Fallos gráficos o artefactos**: ejecutar con las *Validation Layers* habilitadas para identificar posibles errores de uso de la API.

7.6. Extensiones futuras

El motor está diseñado de forma modular, permitiendo incorporar en el futuro:

- Carga de modelos externos en tiempo de ejecución.
- Sombras dinámicas y sistemas de iluminación avanzada.
- Soporte multiplataforma.

Capítulo 8

Conclusiones

El desarrollo de este Trabajo Fin de Máster ha tenido como propósito principal la implementación de un motor gráfico ligero basado en la API Vulkan, con énfasis en la exploración de técnicas de renderizado en tiempo real y el análisis de su rendimiento bajo distintos escenarios de complejidad.

A lo largo del proyecto se han afrontado tanto retos técnicos como metodológicos, lo que ha permitido alcanzar una comprensión más profunda del ciclo de vida del desarrollo de software gráfico y de los beneficios que ofrecen las APIs modernas de bajo nivel.

En primer lugar, en relación con los **objetivos planteados en la Sección 1.2**, se puede concluir que estos han sido satisfactoriamente cumplidos:

- Se ha logrado implementar un motor gráfico funcional con soporte para la creación de ventanas, inicialización de Vulkan, gestión de buffers y carga de modelos en formato OBJ. Este logro cubre los objetivos fundamentales de construir una base modular sobre la cual extender futuras funcionalidades.
- Se ha incorporado un sistema básico de renderizado en tiempo real, capaz de gestionar escenas con diferente nivel de complejidad, desde un cubo simple hasta modelos más pesados. La validación de este componente ha permitido confirmar la estabilidad y escalabilidad del motor.
- Se han explorado características específicas de Vulkan, como el uso de *command buffers* secundarios y la ejecución multi-hilo, comprobando de manera experimental la reducción de la latencia y el mejor aprovechamiento de la CPU. Esto responde al objetivo de evaluar la eficiencia de Vulkan frente a arquitecturas de renderizado más tradicionales.
- Se ha realizado un análisis de rendimiento que incluye métricas de FPS, uso de CPU, GPU y consumo energético. De esta manera, el proyecto es más que una mera implementación y se alinea con trabajos académicos que priorizan la evaluación empírica de motores gráficos y APIs [2, 5, 8, 12].
- Se ha utilizado software de depuración y validación (Validation Layers, RenderDoc) para garantizar la robustez de la implementación, cumpliendo con los objetivos relacionados con la calidad del software.

En cuanto a las **conclusiones generales**, cabe destacar que el uso de Vulkan se ha mostrado particularmente adecuado para explotar arquitecturas multi-core y maximizar la escalabilidad del motor.

La implementación desarrollada constituye una base sólida y extensible sobre la cual es posible incorporar futuras mejoras. Del mismo modo, los experimentos realizados han demostrado

que incluso un motor ligero puede alcanzar rendimientos elevados en hardware de gama media, en línea con lo señalado por estudios recientes sobre motores ligeros y frameworks gráficos [1, 3, 16].

Asimismo, la estructura modular adoptada, junto con el uso de bibliotecas de apoyo como GLFW, GLM y Dear ImGui, ha permitido crear un entorno flexible para experimentación, lo que constituye un valor añadido tanto en el plano académico como en posibles aplicaciones prácticas.

Finalmente, respecto a los **trabajos futuros**, el presente proyecto abre varias líneas de continuidad:

- Ampliar el soporte del motor hacia técnicas avanzadas de renderizado, como *deferred shading*, *physically based rendering* o (*ray tracing*) a través de las extensiones de Vulkan.
- Implementar un sistema de materiales y texturas más completo, que permita explorar escenarios más cercanos al desarrollo de videojuegos o simulaciones.
- Incluir un gestor de escenas con soporte para entidades y componentes, orientando el motor hacia un paradigma ECS (Entity Component System), tal como se emplea en motores modernos [17, 21].
- Optimizar la portabilidad, con vistas a ejecutar el motor en diferentes plataformas (Linux, dispositivos móviles) y evaluar comparativamente el rendimiento frente a otras APIs como DirectX12 o Metal [6, 7].
- Profundizar en herramientas de perfilado energético y térmico, dado el creciente interés por la sostenibilidad del software gráfico [12, 24].

En síntesis, el trabajo realizado ha cumplido sus objetivos y ha aportado una base sólida para la investigación y el desarrollo en el campo de los motores gráficos ligeros.

El aprendizaje adquirido y los resultados obtenidos no sólo consolidan las competencias técnicas alcanzadas durante el máster, sino que también sientan las bases para futuras contribuciones tanto académicas como profesionales.

Bibliografía

[1] C. J. Allison, H. Zhou, A. Munawar, P. Kazanzides, and J. A. Barragan, "Fire-3dv: Framework-independent rendering engine for 3d graphics using vulkan," in *2024 Eighth IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*. IEEE, 2024, pp. 104–111. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/IRC63610.2024.00053

[2] H. Park and N. Baek, "Developing an open-source lightweight game engine with dnn support," *Electronics*, vol. 9, no. 9, p. 1421, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/electronics9091421

[3] H. C. Park and N. Baek, "Design of selfengine: a lightweight game engine," in *Information Science and Applications: ICISA 2019*. Springer, 2019, pp. 223–227. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-981-15-1465-4_23

[4] A. Zarrad, "Game engine solutions," *Simulation and Gaming*, pp. 75–87, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.5772/intechopen.71429

[5] M. Lujan, M. Baum, D. Chen, and Z. Zong, "Evaluating the performance and energy efficiency of opengl and vulkan on a graphics rendering server," in *2019 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*. IEEE, 2019, pp. 777–781. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8685588?casa_token=wiKc2lbHAPMAAAAA:G8tWmZugVy6kz-BR2hnwjyZ4V8ZRfq-xp9rmcWypFf4APh0COiRnRdsKTIWe0Uwu43Mx0qwnEg

[6] M. Lujan, M. McCrary, B. W. Ford, and Z. Zong, "Vulkan vs opengl es: Performance and energy efficiency comparison on the big. little architecture," in *2021 IEEE International Conference on Networking, Architecture and Storage (NAS)*. IEEE, 2021, pp. 1–8. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/NAS51552.2021.9605447

[7] E. DUVANOV and D. CHURKIN, "Comparison of directx, opengl, vulkan, metal," *Vestnik LSTU*, pp. 43–50, 01 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/391966144_COMPARISON_OF_DIRECTX_OPENGL_VULKAN_METAL

[8] J. Unterguggenberger, B. Kerbl, and M. Wimmer, "Vulkan all the way: Transitioning to a modern low-level graphics api in academia," *Computers & Graphics*, vol. 111, pp. 155–165, 2023. [Online]. Available: https://dl.acm.org/doi/abs/10.1016/j.cag.2023.02.001

[9] G. Sellers and J. Kessenich, *Vulkan programming guide: The official guide to learning vulkan*. Addison-Wesley Professional, 2016. [Online]. Available: https://www.informit.com/store/vulkan-programming-guide-the-official-guide-to-learning-9780134464541

[10] M. Castorina and G. Sassone, *Mastering Graphics Programming with Vulkan*. Packt Publishing, 2023. [Online]. Available: https://www.packtpub.com/en-be/product/mastering-graphics-programming-with-vulkan-9781803244792

[11] T. ller, E. Haines, and N. Hoffman, *Real-Time Rendering, Fourth Edition.* CRC Press, 2018. [Online]. Available: https://books.google.es/books?id=0g1mDwAAQBAJ

[12] C. Rossant and N. P. Rougier, "High-performance interactive scientific visualization with datoviz via the vulkan low-level gpu api," *Computing in Science & Engineering*, vol. 23, no. 4, pp. 85–90, 2021. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9500108?casa_token=CYNPRy9eHqwAAAAA:RqOOCui2M7Y6n7lyekNOoY8eANtZxFuLDrVzH_rgoEdjXxDo0YZtrv4Zunc0Umfwb9HxPlJbLg

[13] K. Ozvoldik, T. Stockner, B. Rammner, and E. Krieger, "Assembly of biomolecular gigastructures and visualization with the vulkan graphics api," *Journal of Chemical Information and Modeling*, vol. 61, no. 10, pp. 5293–5303, 2021. [Online]. Available: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jcim.1c00743

[14] S. Marks, J. Windsor, and B. Wünsche, "Evaluation of game engines for simulated surgical training," in *Proceedings of the 5th international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australia and Southeast Asia*, 2007, pp. 273–280. [Online]. Available: https://dl.acm.org/doi/10.1145/1321261.1321311

[15] E. Anderson, S. Engel, P. Comninos, and L. McLoughlin, "The case for research in game engine architecture," 11 2008, pp. 228–231. [Online]. Available: https://doi.org/10.1145/1496984.1497031

[16] D. Eberly, *3D game engine design: a practical approach to real-time computer graphics.* CRC Press, 2006. [Online]. Available: https://www.amazon.com/Game-Engine-Design-Interactive-Technology/dp/1558605932

[17] J. Gregory, *Game engine architecture.* AK Peters/CRC Press, 2018. [Online]. Available: https://www.routledge.com/Game-Engine-Architecture/Gregory/p/book/9781138035454

[18] E. Lengyel, *Foundations of Game Engine Development: Mathematics.* Terathon Software LLC, 2016. [Online]. Available: https://foundationsofgameenginedev.com/

[19] E. Christopoulou and S. Xinogalos, "Overview and comparative analysis of game engines for desktop and mobile devices," *International Journal of Serious Games*, 2017. [Online]. Available: https://ruomoplus.lib.uom.gr/handle/8000/1120

[20] C. Politowski, F. Petrillo, J. E. Montandon, M. T. Valente, and Y.-G. Guéhéneuc, "Are game engines software frameworks? a three-perspective study," *Journal of Systems and Software*, vol. 171, p. 110846, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.jss.2020.110846

[21] G. C. Ullmann, Y.-G. Guéhéneuc, F. Petrillo, N. Anquetil, and C. Politowski, "Sydra: An approach to understand game engine architecture," *Entertainment Computing*, vol. 52, p. 100832, 2025. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875952124002003

[22] P. Petridis, I. Dunwell, D. Panzoli, S. Arnab, A. Protopsaltis, M. Hendrix, and S. de Freitas, "Game engines selection framework for high-fidelity serious applications," *International Journal of Interactive Worlds*, 2012. [Online]. Available: https://pureportal.coventry.ac.uk/files/3934163/Games%20engines%20selection%20framework.pdf

[23] A. Pattrasitidecha, "Comparison and evaluation of 3d mobile game engines," Master's thesis, Chalmers University of Technology, Department of Computer Science and Engineering, Gothenburg, Sweden, 2014, master's Thesis. [Online]. Available: https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/193979/193979.pdf

[24] C. Ioannidis and A.-M. Boutsi, "Multithreaded rendering for cross-platform 3d visualization based on vulkan api," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 44, pp. 57–62, 2020. [Online]. Available: https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLIV-4-W1-2020/57/2020/

[25] Z. Xu, "Parallel technology and development in the gaming industry," in *Proceedings of the 2nd International Conference on Data Analysis and Machine Learning - Volume 1: DAML*, INSTICC. SciTePress, 2024, pp. 232–238. [Online]. Available: https://doi.org/10.5220/0013514900004619

[26] A. Asaduzzaman and H. Y. Lee, *GPU computing to improve game engine performance.* Bandung Institute of Technology, 2014. [Online]. Available: https://soar.wichita.edu/bitstreams/7d194192-ade2-495c-9a93-cd3d9290f28d/download

[27] N. M. Talha, M. R. Babu, and M. Khalid, "Performance analysis of gaming application on multicore architecture." *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, vol. 2, no. 3, 2011. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/M-Babu-2/publication/286932629_Performance_Analysis_of_Gaming_Application_on_Multicore_Architecture/links/567117ef08ae0d8b0cc2bdd1/Performance-Analysis-of-Gaming-Application-on-Multicore-Architecture.pdf