

Design and Development of a Mixed Reality System for the Teaching-Learning of the Physics of Black Holes

Andrés Camilo Rodríguez Grimaldo¹, Edgar Miguel Vargas Chaparro, MSc¹

¹Universidad Nacional de Colombia, Colombia, ancrodriguezgr@unal.edu.co, emvargasc@unal.edu.co

Abstract -- In the study of courses with complex themes, such as the case of Black Hole Physics, students experience difficulty in their learning due to the abstract of these theories and the absence of experimental environments. Mixed Reality (MR) creates a bridge between the real and the virtual world, opening a gap to be able to experience such phenomena in the context of a real environment, allowing them to operate, measure and manipulate virtual and variable objects. However, despite the potential of the MR, there are no implementations that support these studies, which is why the objective of this project is to design and develop an MR system that supports the teaching-learning of black holes physics, identifying the most appropriate tools and software libraries for the development of it. In this way, this article describes the development of five learning modules oriented to the following topics: space-time, geodesic lines, birth of black holes, escape velocity and temperature of a black hole.

Keywords – Black holes, mixed reality, teaching, learning, general relativity.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.427>
ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

Diseño y Desarrollo de un Sistema de Realidad Mixta para la Enseñanza-Aprendizaje de la Física de Agujeros Negros

Andrés Camilo Rodríguez Grimaldo¹, Edgar Miguel Vargas Chaparro, MSc¹

¹Universidad Nacional de Colombia, Colombia, ancrodriguezgr@unal.edu.co, emvargasc@unal.edu.co

Abstract— En el estudio de cursos con temáticas complejas, como es el caso de la Física de Agujeros Negros, los estudiantes experimentan dificultad en su aprendizaje debido a lo abstracto de dichas teorías y la ausencia de ambientes experimentales. La Realidad Mixta (RM) crea un puente entre el mundo real y el virtual abriendo una brecha para poder experimentar tales fenómenos en el contexto de un ambiente real, permitiéndoles operar, medir y manipular objetos virtuales y variables. Sin embargo, a pesar del potencial de la RM, no se encuentran implementaciones que apoyen estos estudios, razón por la cual el objetivo de este proyecto es realizar el diseño y desarrollo de un sistema de RM que apoye la enseñanza-aprendizaje de la física de agujeros negros, identificando las herramientas y librerías de software más adecuadas para la elaboración del mismo. De esta manera, el presente artículo describe la elaboración de cinco módulos de aprendizaje orientados a las siguientes temáticas: espacio-tiempo, líneas geodésicas, nacimiento de agujeros negros, velocidad de escape y temperatura de un agujero negro.

Palabras Claves—Agujeros negros, realidad mixta, enseñanza, aprendizaje, relatividad general.

I. INTRODUCCIÓN

La enseñanza y estudio de la física de agujeros negros es un proceso que suele ser más teórico que práctico, debido a que para experimentar las diversas manifestaciones de los fenómenos involucrados se requeriría de la observación y estudio de objetos astrofísicos y las interacciones entre ellos. Pero las prácticas para llevar a cabo tales experimentos y observaciones implican elevados costos, o incluso laboratorios específicamente adecuados [1], por lo que dichos estudios se implementan tan solo a un nivel teórico y con la ayuda de simulaciones dentro de ambientes netamente virtuales, por lo tanto, no es posible realizar una experimentación de laboratorio que permita el afianzamiento de las teorías vistas. Este hecho se evidencia en los estudios realizados por Gousopoulos, Kapotis, y Kalkanis [2], donde determinan que los estudiantes tienen dificultades a la hora de entender los principios y consecuencias de la teoría de la relatividad de Einstein, la cual es un tema clave para el entendimiento de la física de agujeros negros.

Debido a esta situación se ve la necesidad de tener un ambiente cercano al experimental que permita una mayor adquisición de conocimiento por parte de los estudiantes. Por lo tanto, se propone implementar un sistema de realidad mixta (RM), ya que permite la integración de objetos virtuales con el mundo real haciendo uso de las tecnologías de la información y Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.427>

ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

la comunicación presentes en distintos dispositivos con cámara como un teléfono móvil, computador o tableta [3].

Y es gracias a esta característica de mezclar lo virtual con lo real que la RM es considerada como una herramienta potencial para la educación, dado que ayuda a los estudiantes a involucrarse en una auténtica exploración en el mundo real, permitiéndoles profundizar en sus investigaciones y adquirir mucho más de lo que logran solamente con los libros [1].

Entonces, al compenetrarse más con la experiencia se logra que el estudiante pueda autogenerarse planteamientos del tipo: “¿Qué pasa sí?”, y en el proceso obtener una mayor retroalimentación, abriéndose a posibles opciones y experiencias del mismo conocimiento, pudiendo operar, medir y manipular objetos virtuales 3D en el contexto de un ambiente real, con el fin de entender relaciones espaciales complejas de fenómenos que existen en el mundo real pero no son apreciables por medio de los sentidos [4]. De esta manera la RM propicia el aprendizaje experimental y mejora el entendimiento del material educativo [5].

Sin embargo, al realizar una revisión general de la literatura relacionada no se encuentran implementaciones de sistemas de RM orientados a la enseñanza de la física de agujeros negros, por lo que se propone desarrollar un sistema interactivo y didáctico de RM que modele y exponga los conceptos básicos de la física de agujeros negros aprovechando las ventajas de esta tecnología, de manera que sea posible observar este conjunto de fenómenos con suficiente profundidad, posibilitando la manipulación por parte del estudiante de las diversas variables involucradas y generando además un gusto por las prácticas y adquisición de estos conocimientos [4].

Por lo tanto, este artículo describe el diseño y desarrollo de un sistema de RM para la enseñanza-aprendizaje de la física de agujeros negros, compuesto por cinco módulos cuyos contenidos temáticos son: el espacio-tiempo, las líneas geodésicas, el nacimiento de los agujeros negros, la velocidad de escape y la temperatura de un agujero negro, los cuales constituyen los aspectos disciplinares de este proyecto.

Para cumplir con estos objetivos se hace uso de una metodología inspirada en el modelo de diseño instruccional ADDIE, cuyo nombre es un acrónimo de los pasos clave que conforman este modelo, a saber [6]: Análisis, Diseño,

Desarrollo, Implementación y Evaluación. Dado el alcance de este artículo no se expondrán los pasos de Implementación y Evaluación.

Este artículo se organiza de la siguiente manera. En la sección II se exponen los aspectos disciplinares y en la sección III los aspectos didácticos del sistema de RM. En la sección IV se presenta la revisión de trabajos previos relacionados. En la sección V se describe el análisis del sistema de RM, y en la sección VI se presenta su diseño. La sección VII describe la selección de la plataforma de software para el desarrollo. En la sección VIII se exponen los resultados obtenidos. Finalmente, la sección IX presenta las conclusiones y el trabajo futuro que se deriva del presente trabajo.

II. ASPECTOS DISCIPLINARES

Los aspectos disciplinares están conformados por el cuerpo de estudios relacionados al estudio y enseñanza general de la física de agujeros negros, de esta manera, se hace énfasis en conceptos claves como: el espacio-tiempo y la relatividad general, las líneas geodésicas, el nacimiento de los agujeros negros, la velocidad de escape y la temperatura de un agujero negro.

A. Espacio-Tiempo y Relatividad General

El espacio-tiempo es un modelo matemático semejante a una malla tridimensional que combina el espacio y el tiempo en un único continuo como dos conceptos inseparablemente relacionados. De acuerdo con la teoría de la relatividad general en este continuo ocurren todos los sucesos físicos del universo y explica cómo la existencia de masa “deforma la geometría del espacio-tiempo”, de manera que no sólo se modifican las tres dimensiones espaciales, sino que también se altera la dimensión temporal y a su vez la atracción gravitacional [7]. Por lo tanto, si hay masa presente en una situación física entonces la realidad se describe mediante el siguiente comportamiento asociado, resumido por John Wheeler:

“La masa actúa sobre el espacio-tiempo diciéndole cómo curvarse, el espacio-tiempo actúa sobre la masa diciéndole como moverse.”

B. Líneas Geodésicas

La luz está compuesta de fotones, los cuales suelen viajar en línea recta, de esto se obtiene la noción de “rayo de luz”. Sin embargo, si un fotón atraviesa por un espacio-tiempo curvo este desviará un poco su trayectoria, siguiendo un camino conocido como una línea geodésica, es decir, una línea recta a través de un espacio-tiempo curvo [7].

C. Nacimiento de Agujeros Negros

En el interior de las estrellas ocurren diversos procesos atómicos que liberan gran cantidad de energía y dan como resultado el brillo y características de cada una. Ya que estos procesos se mantienen en un estado de equilibrio, conocido como “equilibrio hidrostático”, la masa de la estrella no se dispersa por el espacio, ni tampoco se comprime debido a su propia gravedad. Sin embargo, con el tiempo las reservas de energía al interior de la estrella se agotan y ocasionan un desbalance en el equilibrio hidrostático donde la gravedad de la estrella se hace mayor, lo cual ocasiona que la estrella empiece a colapsarse en sí misma, iniciando así su proceso de muerte y con ello el posible nacimiento de un agujero negro [7].

Si la estrella agonizante tiene una masa superior a 3 masas solares experimentará un colapso gravitacional completo, en donde el núcleo se contraerá en una esfera de dimensiones extremadamente minúsculas, infinitamente pequeña. Así mismo, esto hará que la gravedad sea infinita en dicha región del espacio causando que nada pueda escapar de su atracción, ni siquiera los fotones de luz, lo cual es la razón de por qué un agujero negro es negro o invisible [7].

D. Velocidad de Escape

Es la velocidad a la que se necesita lanzar algo desde la superficie de un objeto para que escape del campo gravitacional de este objeto. Por ejemplo, si se desea lanzar un cohete al espacio desde la Tierra, pero su velocidad de lanzamiento es demasiado baja, entonces el cohete no tendrá suficiente energía cinética para liberarse del campo gravitacional de la Tierra; por otro lado, si el cohete tiene justo la velocidad suficiente para escapar de la atracción gravitacional de la Tierra, se dice que ha alcanzado su velocidad de escape [7].

En el caso de los agujeros negros la velocidad de escape es igual a la velocidad de la luz, esto se debe a que producen una prolongada curvatura en el espacio tiempo [7].

E. Temperatura de un Agujero Negro

Los agujeros negros también cuentan con una temperatura asociada debido a su radiación, la cual es conocida como radiación de Hawking. Este valor de temperatura dependerá directamente de la cantidad de masa que componga al agujero negro. De esta manera, a mayor masa habrá menor temperatura, lo que indica una relación inversamente proporcional entre la masa de un agujero negro y su temperatura [7].

III. ASPECTOS DIDACTICOS

Los aspectos didácticos describen aquellas herramientas didácticas con las cuales se dará solución a la problemática expuesta. Para este caso se hace uso de la realidad mixta.

A. Realidad Mixta

La RM es una tecnología interactiva que combina la realidad con información digital en tiempo real y de acuerdo al punto de vista del usuario. Dicha mezcla de elementos reales y virtuales se realiza partiendo de una señal de video que es procesada de tal modo que permite generar imágenes compuestas que son visualizadas instantáneamente en una pantalla. De esta manera, la RM posibilita aumentar la percepción que el usuario tiene de la realidad, pues al implementar elementos virtuales en la misma, no la sustituye, sino que la sobreimprime con información adicional [8].

Ya que la RM es una tecnología emergente, cuenta con múltiples definiciones de lo que realmente es, pero dentro de las definiciones más citadas se encuentran: la de Paul Milgram y Fumio Kishino [8] y la de Ronald Azuma [9].

Por su parte, Paul Milgram y Fumio Kishino definieron el Reality-Virtuality Continuum (Continuo de Realidad-Virtualidad), el cual es una representación del continuo que va desde el "entorno real" hasta el "entorno virtual" (Fig. 1). De esta manera, un "entorno real" incluye únicamente objetos reales vistos directamente en la escena real o mediante una pantalla. Por otra parte, un "entorno virtual" está compuesto por objetos virtuales únicamente, como por ejemplo en una simulación gráfica computarizada convencional o en una experiencia inmersiva de realidad virtual. Finalmente está el área comprendida entre estos dos extremos, justo donde se combinan lo real y lo virtual, a esta área se le denomina: "Realidad Mixta" [8].



Fig. 1 Representación del continuo de Realidad-Virtualidad (Reality-Virtuality Continuum).

Por otra parte, está la definición de Ronald Azuma, quien afirma que un sistema de RM debe cumplir con los siguientes 3 requerimientos [9]:

1) Combina la realidad y lo virtual: Al mundo real, se le agregan objetos sintéticos que pueden ser visuales, como texto u objetos 3D, sonoros o táctiles.

2) Es interactivo en tiempo real: El usuario ve, en tiempo real, un mundo real con objetos sintéticos agregados que le ayudarán a interactuar con la escena (Azuma, 2001).

3) Debe registrar las imágenes en espacios 3D: La información virtual tiene que estar vinculada espacialmente y de manera coherente al mundo real. Se necesita saber, en todo momento, la posición del usuario con respecto al mundo real, y de esta manera, se podrá registrar adecuadamente la mezcla de información real y sintética.

B. Funcionamiento de un Sistema de Realidad Mixta

A continuación, se describe el flujo de funcionamiento de un sistema de RM (Fig. 2) una vez puesto en marcha [9]:

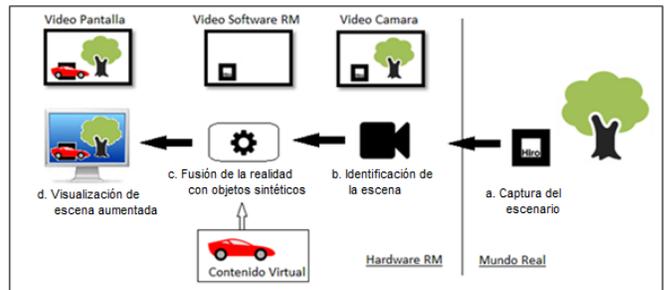


Fig. 2 Funcionamiento de un Sistema de Realidad Mixta. a. Captura del escenario, b. Identificación de la escena, c. Fusión de la realidad con objetos sintéticos, d. Visualización de escena aumentada.

a. Captura del escenario: Se debe parametrizar el software de RM para que este pueda identificar un marcador de RM en la escena. A continuación, se captura la escena en video mediante una cámara apuntando hacia el marcador.

b. Identificación de la escena: El programa procesador de RM recibe las imágenes de video obtenidas en el paso anterior y procede a identificar el marcador de RM en la escena. Si el marcador es identificado, se avanza al paso siguiente.

c. Fusión de la realidad con objetos sintéticos: Una vez es detectado el marcador, se inicia el proceso de mezclado de realidades, adicionando los componentes virtuales sobre la ubicación definida por el marcador en la escena real. Este proceso se efectúa de forma iterativa a gran velocidad. En caso de no identificarse el marcador se retorna al paso anterior.

d. Visualización de escena aumentada: Tan pronto como la señal de video es procesada y combinada con los elementos virtuales se procede a visualizar la escena en pantalla.

IV. REVISIÓN DE TRABAJOS PREVIOS

A. Problemática

Según los estudios realizados por Gousopoulos, Kapotis, y Kalkanis [2], se puede evidenciar que muchos estudiantes tienen bastantes dificultades a la hora de entender los principios y consecuencias de la teoría de la relatividad de Einstein. Esto se debe a que dicha teoría describe el comportamiento de fenómenos que son abstractos y por lo tanto no es posible realizar una experimentación de laboratorio que permita el afianzamiento de las teorías [2].

Con el fin de determinar exactamente qué temáticas del estudio de los principios de la teoría de la relatividad presentan el mayor grado de dificultad para los estudiantes, En Ref. [2] realizaron una investigación sobre una muestra de 45 estudiantes que estaban viendo el primer ciclo de física, a los cuales se les realizaron encuestas detalladas sobre distintos temas de la teoría de la relatividad, adicionalmente se hicieron entrevistas personalizadas a cada estudiante sobre las temáticas y sus respuestas. Determinando así las dificultades de los estudiantes de física en la comprensión de los principios básicos de la teoría de la relatividad y sus consecuencias después de la instrucción estándar.

Como resultado de la investigación se obtuvo que son precisamente los temas relacionados a: la dilatación del tiempo y la curvatura de la luz, en los que se presenta el mayor porcentaje de falencias [2].

Con respecto al principio de la dilatación del tiempo, en Ref. [2], observaron que hubo un punto de vista común en el 77% de los estudiantes, el cual fue considerar al tiempo como absoluto, es decir, que no se ve afectado por el observador inicial relativo a quien se mide. Por lo tanto, los estudiantes no logran distinguir que los comportamientos de dos eventos simultáneos dentro de un marco de referencia relativista pueden tener variaciones con respecto al momento exacto en el que ocurren, si el tiempo fuera absoluto, los dos eventos ocurrirían al mismo tiempo siempre, aunque el marco de referencia del observador cambie.

Para el caso de la curvatura de la luz, se vio que los estudiantes mantuvieron una fuerte relación con el comportamiento de la luz según la física clásica. De manera que el 57,7% consideraba que la luz no puede seguir un camino curvo, sino que siempre debe ser una línea recta y si en algún momento parecía curvarse debía ser gracias a la existencia de algún tipo de espejo no visible [2].

Este tipo de falencias parece ser muy común en cuanto al estudio de la teoría de la Relatividad, ya que esta se ocupa de fenómenos que se producen a velocidades relativistas (cerca a la velocidad de la luz) o debido a grandes cantidades de masa (como planetas y soles), lo cual condiciona el entendimiento de

los estudiantes con respecto a las fronteras entre la mecánica clásica y la relatividad, haciendo que sea difícil y costoso llegar a realizar prácticas experimentales que permitan aclarar los conceptos vistos en clase. Por tal razón, el aprendizaje y enseñanza de estos conocimientos abstractos requieren la implementación de nuevas formas de abordar las temáticas relativistas [2].

B. Revisión de la literatura

Para la realización del estado del arte se ha hecho una revisión de la literatura relacionada al desarrollo de recursos educativos digitales, considerando los siguientes tipos: Simuladores educativos, OVA (Objetos virtuales de aprendizaje), Ebooks (libros digitales) y Videojuegos educativos. Con base en los anteriores tipos de recursos educativos digitales se realiza un filtrado de la información considerando aquellos elementos cuyo objetivo haya sido el de abordar la enseñanza de: los principios de la teoría de la relatividad especial de Einstein, los principios de la teoría de la relatividad general y la física básica implícita en el estudio de agujeros negros. Dicha revisión se realizó en las siguientes bases de datos: Springer Journal, Science Direct, IEEE Xplore y Academic Google, mediante la implementación de la siguiente fórmula de consulta:

((“Mixed reality” OR “Augmented reality” OR “Virtual reality” OR “Video game” OR “Simulator” OR “OVA” OR “Ebook”) AND (teaching OR learning*) AND (“black holes” OR “special relativity” OR “general relativity”))*

Con base en la anterior fórmula de búsqueda se obtuvieron como resultado 45 publicaciones, de las fuentes de bases de datos ya mencionadas, que respondieron a los filtros de búsqueda aplicados y cuyos contenidos respondían a la temática y contexto del estado del arte para el presente trabajo (Fig. 3).

Como criterios de inclusión se tuvieron en cuenta: Publicaciones escritas en inglés y español, y publicaciones realizadas desde el año 2007 hasta el 2019. Los cuales redujeron la muestra de artículos relevantes a 7 publicaciones (Fig. 3).



Fig. 3 Recolección de información: Aplicación de la fórmula de búsqueda y criterios de inclusión y exclusión de búsqueda.

C. Trabajos Previos

En la Fig. 4 se muestra un esquema con la clasificación realizada a los siete proyectos obtenidos como resultado de la recolección de información. De modo que se clasificaron según el tipo de recurso educativo digital, el área temática cubierta y el sector del continuo realidad-virtualidad al cual pertenecen.



Fig. 4 Clasificación de los proyectos encontrados de acuerdo con los tipos de recurso educativo digital, las áreas temáticas y el continuo realidad-virtualidad.

A continuación, se realiza la descripción general de cada proyecto:

1) *Proyecto EVEILS, Espacios Virtuales para la Educación e Ilustración de la Ciencia* [10]: Es un simulador de un juego de billar que implementa un motor de física relativista y hace uso de un entorno inmersivo de realidad virtual. Estudia la velocidad de la luz y los conceptos de “marco de referencia” y “evento” en la física.

2) *VIGOR, Virtual Interaction with Gravitational Waves to Observe Relativity* [11]: Es un simulador de realidad virtual donde se expone el comportamiento y recorrido de las ondas gravitacionales, los efectos que producen en los cuerpos y la colisión entre agujeros negros.

3) *Video Juego y librería OpenRelativity* [12]: Expone algunos fenómenos de la física relativista especial a través de un ambiente de fantasía diseñado para que se pueda explorar en tercera persona y observar los efectos de desplazarse a velocidades cercanas a la luz.

4) *Video Juego NOVA Black Holes App* [13]: Es un videojuego donde se lanzan objetos masivos como estrellas gigantes a través del espacio-tiempo con el fin de aprovechar las curvaturas que existan en escena para dirigir el rumbo de los objetos lanzados y no caer en un agujero negro.

5) *Simulador Real Time Relativity* [14]: Se trata de un videojuego que permite realizar un recorrido por un mundo virtual relativista usando una nave espacial. Contiene planetas, relojes de referencia y edificios que experimenten fenómenos como: la contracción de la longitud, el efecto Doppler y la aberración óptica relativista.

6) *Video Juego Relativistic Asteroids* [15]: Esta basado en el juego clásico de Asteroides salvo que funciona con un motor de física relativista. Se abordan temáticas como la contracción de la longitud, la dilatación del tiempo, la dilatación de la masa y el cambio de color del efecto Doppler.

7) *Objeto Virtual de Aprendizaje (OVA) para agujeros negros* [16]: Es un sitio web interactivo en donde se exponen teorías y cuestionarios, con imágenes sobre los agujeros negros, el desarrollo histórico del concepto de agujero negro y los agujeros negros y su interacción con el universo.

En la Tabla I se resumen los resultados obtenidos por cada uno de los trabajos previos, de modo que las filas describen el área temática y las columnas el tipo de recurso educativo digital:

TABLA I
PROYECTOS POR TIPO DE RECURSO EDUCATIVO DIGITAL Y ÁREA TEMÁTICA.

	Simulador	OVA	Videojuego
Relatividad Especial	EVEILS (Ambiente Virtual) Real Time Relativity (Ambiente Virtual)		OpenRelativity (Ambiente Virtual) Relativistic Asteroids (Ambiente Virtual)
Relatividad General	VIGOR (Ambiente Virtual)	NOVA Black Holes App (Ambiente Virtual)	
Agujeros Negros	VIGOR (Ambiente Virtual)	NOVA Black Holes App (Ambiente Virtual) OVA para Agujeros negros (Ambiente Virtual)	

V. ANÁLISIS DEL SISTEMA DE RM

En esta sección se presenta el análisis del sistema de RM que consiste en la caracterización del público objetivo, la determinación de los objetivos del aplicativo y de los objetivos de aprendizaje, la descripción general del sistema de RM y la selección del hardware de RM.

A. Público Objetivo

Este proyecto tuvo como público objetivo a estudiantes de pregrado y/o posgrado de la Universidad Nacional de Colombia que cursaban la materia de “Agujeros negros y máquinas del tiempo”. Ya que el contenido de la materia es de carácter divulgativo, los estudiantes podían pertenecer a cualquiera de las carreras disponibles en la universidad sin importar el semestre que estén cursando, razón por la cual no requerían de conocimientos previos en contenidos como física, matemáticas o astrofísica.

La gran mayoría de los estudiantes contaba con dispositivos móviles de gama media capaces de usar la video cámara, audio y permitir la instalación de aplicaciones. En su mayoría los estudiantes tenían móviles con sistema operativo Android.

B. Objetivos del Aplicativo

- Mejorar la experiencia y aprendizaje de la física de agujeros negros en los estudiantes.
- Exponer temáticas relacionadas al origen de los agujeros negros y sus propiedades físicas.
- Permitir experimentar con los conceptos de: Espacio-tiempo, líneas geodésicas, nacimiento de agujeros negros, horizonte de eventos, velocidad de escape y temperatura en un agujero negro.

C. Objetivos de Aprendizaje

- Reconocer y experimentar conceptos de la física de agujeros negros, tales como espacio-tiempo, líneas geodésicas, agujero negro, velocidad de escape y temperatura de un agujero negro.
- Experimentar la interacción entre el espacio-tiempo y objetos masivos de diferentes masas.
- Describir la trayectoria de una línea geodésica a través de un espacio-tiempo curvo.
- Experimentar el proceso de muerte de una estrella con el fin de entender el nacimiento de los agujeros negros.
- Identificar la velocidad de escape de un agujero negro según la distancia entre este y un observador.
- Comprender la Relación entre masa y temperatura de un agujero negro.

D. Descripción General del Sistema de RM

El estudiante puede ver desde su celular el contenido de RM al identificar un marcador en la escena real, adicionalmente, debe ver indicadores de tiempo, distancia y temperatura sobre la interfaz para así obtener mediciones en la escena de RM, según sea apropiado al módulo.

Una vez detectado el marcador este debe proyectar un plano cuadrulado que representa a las líneas geodésicas en el espacio-tiempo.

Todas las interacciones y animaciones en la escena de RM deben contar efectos de sonido relacionados y además sonidos de ambientación.

Los objetos virtuales asociados a los marcadores y que componen las escenas de RM se presentan mediante 5 módulos de la siguiente manera:

- **Módulo 1: Espacio-tiempo.**

El plano espacio-tiempo se deforma mostrando la gravedad que produce el objeto en escena. A mayor tamaño del objeto la deformación es mayor en área y profundidad.

- **Módulo 2: Geodésicas.**

Un rayo de luz proyectado desde una estrella lejana pasa cerca del Sol, por lo que su trayectoria se ve alterada debido a la curvatura del espacio-tiempo generada por el Sol. El rayo de luz viaja desde la estrella a la Tierra.

- **Módulo 3: Nacimiento de los agujeros negros.**

Una estrella pequeña en el centro de la proyección a la cual se le podrá alterar el valor de masa para luego generar un colapso gravitacional en la estrella, obteniendo así tres resultados posibles luego del colapso: una estrella enana blanca, una estrella de neutrones o un agujero negro.

- **Módulo 4: Velocidad de escape.**

Se aprecia un agujero negro y sus características principales: horizonte de eventos, malla espacio-tiempo y singularidad. Calcula y muestra la velocidad necesaria para escapar de la atracción gravitacional de un agujero negro según la cercanía al mismo. Se observa la fórmula de velocidad de escape calculada en tiempo real.

- **Módulo 5: Temperatura de un agujero negro.**

Se observa el cálculo de la fórmula de temperatura para un agujero negro en tiempo real. Se pueden alterar las características de área y cantidad de masa del agujero negro arrojando estrellas al interior del mismo. Se observa la fórmula de temperatura de un agujero negro calculada en tiempo real.

E. Selección del Hardware de RM

Con el fin de determinar el dispositivo de hardware más adecuado para la implementación del sistema de RM se plantearon los siguientes criterios (Tabla II), a los cuales se les asignaron porcentajes de peso según las necesidades del presente proyecto.

TABLA II
PORCENTAJE DE PESOS PARA LOS CRITERIOS DE IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE DE RM

Criterios	Peso
Modelado del Mundo Real	7%
Calidad Visual	21%
Inmersión Virtual	14%
Portabilidad	29%
Asequibilidad	29%
Total	100%

De esta manera, al evaluar mediante una matriz comparativa las opciones de hardware disponibles entre: pantallas, casco de

realidad virtual, carcasas de realidad virtual con móvil, gafas óptico transparentes, gafas con pantalla de realidad virtual y dispositivos móviles, se obtuvo que el dispositivo de hardware más adecuado para la implementación de este proyecto es: el Dispositivo Móvil; ya que logra ser bastante asequible por sus bajos costos, es altamente portable y casi todos los estudiantes disponen de uno.

VI. DISEÑO DEL SISTEMA DE RM

Con base en la información y requerimientos obtenidos en la etapa de análisis se procede a especificar las características de diseño que formaran parte del aplicativo a desarrollar, las cuales son: interacción con el usuario, apariencia de la herramienta y arquitectura y diseño de alto nivel.

A. Interacción con el Usuario

Se diseñó una interfaz sencilla compuesta por 5 elementos claves procurando dar mayor espacio y protagonismo a la recepción de la imagen de video. Esta interfaz estará presente de manera similar en cada uno de los cinco módulos del aplicativo.

De esta manera se distribuye la interfaz de usuario tal cual como se muestra en la Fig. 5, encontrando: un panel de información teórica el cual expondrá los conceptos básicos de la física de agujeros negros (según el módulo); un panel ubicado en la parte superior con información relacionada al cálculo de fórmulas, valores de variables y magnitudes; un panel de botones y acciones en la parte inferior donde el usuario podrá accionar interacciones que afecten la escena de RM; un botón para regresar al menú principal saliendo del módulo actual; y finalmente, gran parte del espacio para que se proyecte la imagen de video obtenida por la cámara.

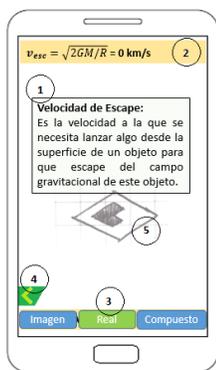


Fig. 5 Interfaz de interacción para el usuario. 1) Panel de información teórica, 2) Panel de fórmulas y datos, 3) Panel de botones y acciones, 4) Botón regresar, 5) Captura de video desde la cámara.

B. Apariencia de los Módulos del Sistema de RM

Se diseñaron las interfaces para la experiencia de RM según los cinco módulos descritos en la etapa de análisis. Para

lo cual, cada módulo cuenta con objetos específicos de RM que se proyectaran en cada escena y cuyos bocetos se observan en la Fig. 6, donde también se especifica una interfaz de interacción según el contexto de cada módulo haciendo uso de botones, barras de desplazamiento y acciones de RM con el movimiento del dispositivo móvil.

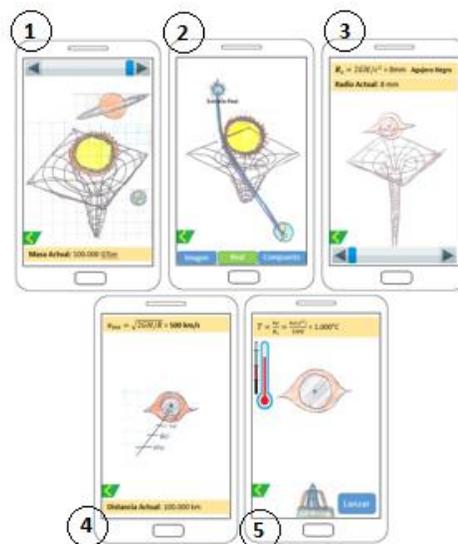


Fig. 6 Boceto de diseños preliminares para cada uno de los 5 módulos. Respectivamente 1) Espacio-tiempo, 2) Líneas Geodésicas, 3) Nacimiento de Agujeros Negros, 4) Velocidad de escape, 5) Temperatura de un agujero negro.

C. Arquitectura y Diseño de Alto Nivel

La arquitectura que corresponde al aplicativo de RM, considerando el uso de un dispositivo móvil como plataforma de ejecución, se puede apreciar en la Fig. 7. De este modo se tiene como elemento central al dispositivo móvil el cual se encargará de obtener la señal de video del mundo real y llevarla al aplicativo para ser procesada por el motor de RM, donde posteriormente se hará la fusión de las partes reales y virtuales para así generar una escena de RM que se reproducirá en la pantalla del dispositivo móvil.

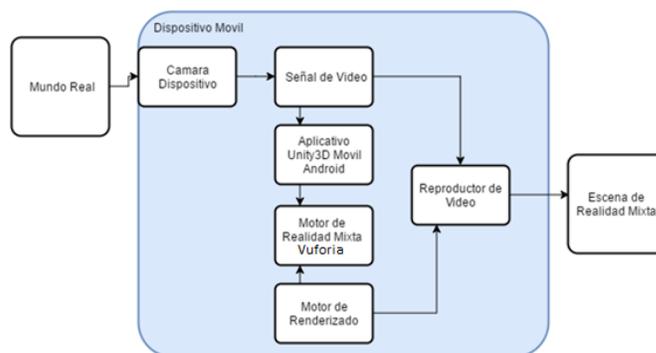


Fig. 7 Arquitectura de RM para plataforma de ejecución sobre un dispositivo móvil.

Por otra parte, con respecto a la relación de objetos que se requerirán para la programación de la lógica del aplicativo de RM se propone el siguiente diagrama (Fig. 8) a modo de diseño de alto nivel, donde se describen una serie de objetos manejadores (*managers*) que se encargaran de articular el despliegue de la información del aplicativo de manera general y por módulo, orquestando así cada una de las escenas de RM.

Para esto se tienen objetos principales tales como: el *SceneManager* que controla los objetos en escena; el *UIManager* que administra los objetos que se muestran en la interfaz de usuario; el *InputManager* que se encarga de manejar los eventos provenientes de la acción del usuario; el *DBManager* que suministra los recursos de textos a los módulos; el *RMMManager* que contiene el manejo del motor de RM; y finalmente, el *SoundManager* y *BuzzManager* que controlan temas de sonido y vibración del dispositivo móvil.

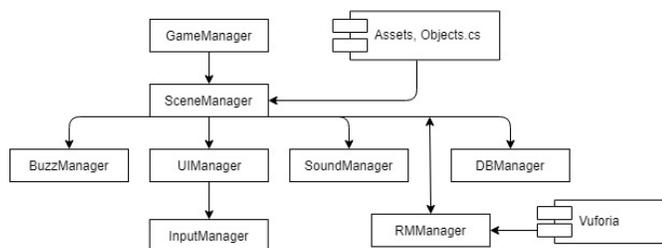


Fig. 8 Diagrama relacional de objetos para diseño de alto nivel.

VII. DESARROLLO

Con base en las interfaces diseñadas en la sección anterior, se procede a identificar las herramientas de software (plataforma de desarrollo, motor 3D y librería de RM) que son más adecuadas para comenzar la elaboración del aplicativo de RM.

A. Plataforma de desarrollo y Motor 3D

Para el desarrollo del aplicativo de RM se buscaron herramientas de software que cumplieran con requisitos tales como: facilidad de implementación, capacidad de integración con motor 3D, disponibilidad para implementar motores de RM y posibilidad de exportación como aplicativo Android. Ante esto se encontraron 4 alternativas de software que permiten realizar el desarrollo del aplicativo: Unreal Engine 4 AR, Android Studio, Java Eclipse y Unity 3D.

De las anteriores opciones se escoge finalmente a Unity 3D como la plataforma principal de desarrollo y, además, motor 3D. Esto debido a las siguientes razones:

- Es uno de los motores para la creación de video juegos en 3D y 2D más populares, el cual incluye una plataforma de desarrollo basada en Script C#. De esta manera permite crear

escenas virtuales que son controladas fácilmente mediante librerías asociadas a un proyecto.

- La gran mayoría de librerías para RM cuentan con soporte para Unity 3D, proporcionando así una gran versatilidad para la selección de herramientas de RM.
- Permite publicar las aplicaciones desarrolladas sobre una gran variedad de plataformas, por ejemplo: Windows, IOS, Android, Xbox, entre otras, lo cual facilita la implementación y distribución del aplicativo.
- Cuenta con una licencia libre para uso no comercial, brindando acceso a la gran mayoría de las funcionalidades del aplicativo.

C. Librería de Realidad Mixta

Las librerías de RM son aquellas que pueden ser integradas a una plataforma de desarrollo, como Unity 3D, de modo que pueda ser posible crear y programar aplicaciones de RM. Como se vio en la sección III, el funcionamiento de un sistema de RM consta de cuatro tareas: captura del escenario, identificación de la escena, fusión de la realidad con objetos sintéticos y visualización de la escena aumentada. Para que estas tareas puedan ser llevadas a cabo se requiere ejecutar componentes de software que gestionen y otorguen la lógica necesaria para que junto con el dispositivo de hardware sea posible implementar una experiencia de RM. Dichos elementos de software son las librerías que contienen las herramientas necesarias para poder construir software de RM.

Para identificar la librería que mejor se adecuó al proyecto, se realizó un proceso de selección mediante una matriz comparativa entre las siguientes opciones de librerías disponibles: ARToolKit, DroidAR, ARLab, Vuforia, Wikitude, EasyAR y Kudan. Esto haciendo uso de los criterios de selección descritos en la Tabla III con sus respectivos pesos.

TABLA III
PORCENTAJE DE PESOS PARA LOS CRITERIOS DE IMPLEMENTACIÓN DE LAS LIBRERÍAS DE RM

Criterios	Peso
Uso libre de características	20
Detección del marcador	35
Documentación disponible	45
Total	100%

Una vez realizada la comparación se obtuvo que la librería más adecuada para la implementación de este proyecto es: Vuforia, dadas las siguientes razones:

- La licencia es paga, pero tiene una versión gratuita orientada a desarrolladores y fines no comerciales, la cual incluye todas las funcionalidades disponibles.

- Puede ser integrada con Unity 3D.
- Permite la implementación de diferentes tipos de RM, usando marcador o identificando superficies o visión artificial.
- El marcador tiene un alto grado de detección, además mantiene la imagen incluso cuando el marcador está siendo tapado en más de la mitad, lo cual le da mayor estabilidad y realismo a la experiencia.
- Cuenta con bastante documentación disponible, a través de manuales, páginas web y video tutoriales que facilitan la adquisición del conocimiento y desarrollo ágil de los proyectos.

VIII. RESULTADOS

En total se desarrollaron 5 módulos con diferentes experiencias de RM, focalizadas en los siguientes temas: espacio-tiempo, líneas geodésicas, nacimiento de agujeros negros, velocidad de escape y temperatura de un agujero negro.

A continuación, se exponen las interfaces implementadas para dos de los módulos desarrollados (Módulo 1 y Módulo 4):

- *Módulo 1: Espacio-tiempo:*

Se aprecia una interfaz donde al mover el icono de desplazamiento superior (Fig. 9) se proyecta un objeto masivo. Existiendo tres posibles opciones: la Tierra, Saturno y el Sol. Una vez seleccionada una opción es posible observar como la masa curva la malla del espacio-tiempo, mientras el panel inferior proporciona información sobre la escena.

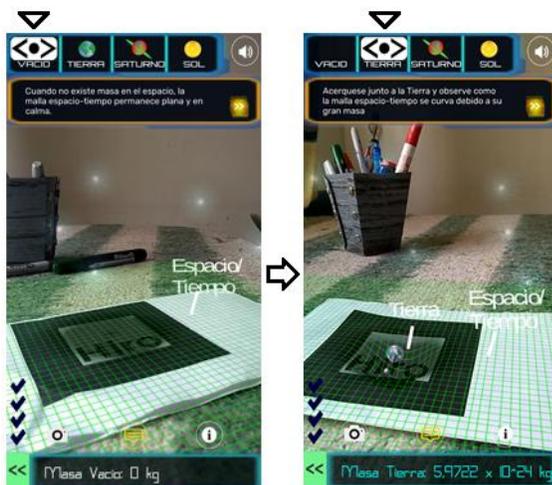


Fig. 9 Aplicativo de RM para agujeros negros - modulo 1: Se observa una composición de escena de RM, mostrando de izquierda a derecha el paso de un espacio-tiempo vacío y sin curvatura a uno curvado debido a un objeto (la Tierra).

En la parte inferior de la interfaz vista en Fig. 9 se aprecia un panel con información directa del objeto actual, en este caso muestra la masa que posee la Tierra (Fig. 10).

Masa Tierra: $5,9722 \times 10^{24}$ kg

Fig. 10 Panel de información de la escena calculando la masa de la Tierra.

Continuando con las opciones restantes de objetos masivos (Fig. 11), se aprecia a Saturno, cuya deformación del espacio-tiempo se ve más evidente que en el caso de la Tierra. Y al mover el cursor a la casilla del Sol, se aprecia una curvatura aun mayor, manteniendo una escala menor para poder apreciar el movimiento de los planetas a su alrededor debido a la curvatura espacio-tiempo que este produce.

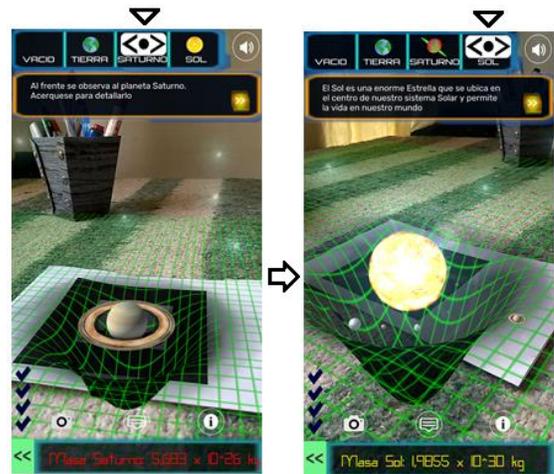


Fig. 11 Aplicativo de RM para agujeros negros - modulo 1: Se observa una composición de escena de RM, mostrando de izquierda a derecha la curvatura producida por Saturno y luego la del Sol.

- *Módulo 4: Velocidad de escape:*

En la Fig. 12 se aprecia una escena en la cual se ve una prolongada curvatura del espacio-tiempo, esto debido a la enorme fuerza gravitacional que genera un agujero negro. Adicionalmente, aparece una regla azul en el centro de la proyección identificando gráficamente la distancia que hay entre el usuario y el agujero negro. El valor de dicha distancia es calculado y presentado en el panel inferior de información. También se realiza el cálculo de la velocidad de escape con base a la distancia actual del usuario. Dicho valor es presentado con su respectiva fórmula en el panel superior de la pantalla.

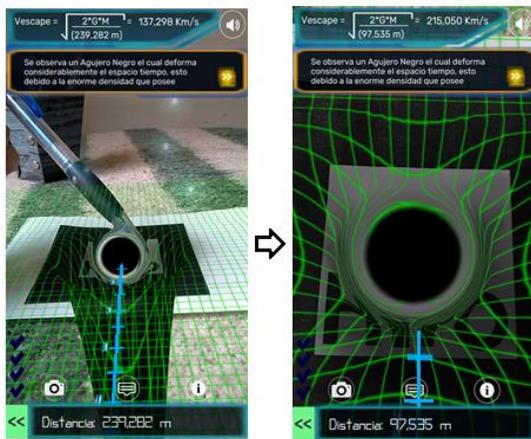


Fig. 12 Aplicativo de RM para agujeros negros - modulo 4: Se observa una escena de RM, mostrando de izquierda a derecha los efectos producidos por la cercanía a un agujero negro y el cálculo de la velocidad de escape.

Al observar la interfaz presentada en la Fig. 12 se puede apreciar la fórmula de velocidad de escape en la parte superior de la pantalla con sus respectivas variables y constantes, en este caso se expresa la variación de la distancia actual con respecto a un agujero negro de masa constante, obteniendo como resultado el valor de la velocidad de escape del agujero negro. Esta fórmula se aprecia con mayor detalle en la Fig. 13, observando un valor muy cercano a la velocidad de la luz ya que el usuario se encontraba a una corta distancia del agujero negro.

$$\text{Vescape} = \sqrt{\frac{2 * G * M}{(97,535 \text{ m})}} = 215,050 \text{ Km/s}$$

Fig. 13 Panel de información de la escena calculando la velocidad de escape de un agujero negro con masa constante.

Para mayor profundización en las distintas experiencias de RM desarrolladas, el aplicativo para la enseñanza-aprendizaje de RM y el marcador impreso estarán disponibles para su utilización temporal en los siguientes sitios habilitados para su descarga:

- <https://www.dropbox.com/s/hpmtuxbgnj143sa/AppAgujerosNegrosRM.apk?dl=0>
- https://www.dropbox.com/s/i7468o8d30flgke/RM_MARKER.jpg?dl=0

IX. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

La enseñanza y estudio de la física de agujeros negros es un proceso que suele ser más teórico que práctico, debido a que para experimentar las diversas manifestaciones de los fenómenos involucrados se requeriría de la observación y estudio de objetos astrofísicos y las interacciones entre ellos.

Además, se identificó mediante una revisión sistemática de la literatura, que en el área de la física de agujeros negros y la relatividad general y especial no existen implementaciones de

aplicativos de RM que apoyen el proceso de enseñanza-aprendizaje.

Por lo anterior, en el presente trabajo se realizó el análisis, diseño y desarrollo de un sistema de RM funcional para apoyar el proceso de enseñanza-aprendizaje de la física de agujeros negros.

Finalmente, ya que la RM es una tecnología emergente que está en crecimiento hacia su maduración, se considera que es un buen momento para investigar sobre sus aplicaciones y aportes en la educación. Por lo tanto, como trabajo futuro se propone llevar a cabo la implementación y evaluación del sistema de RM con estudiantes de asignaturas relacionadas a la física de agujeros negros o materias afines. Esto con el fin de poder evaluar la capacidad de la herramienta para llevar a cabo la acción formativa y mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje de dichos temas.

REFERENCIAS

- [1] F. Pengcheng, Z. Mingquan and W. Xuesong, "The significance and effectiveness of Augmented Reality in experimental education," Int. Conf. E-bus. E-Government ICEE2011, 2011, pp.895–898.
- [2] D. Gousopoulos, E. Kapotis and G. Kalkanis, "Students' Difficulties in Understanding the Basic Principles of Relativity After Standard Instruction", Eur. Sci. Educ. Res. Assoc., 2015, pp.169–175.
- [3] P. Milgram and C. Herman, "Taxonomy of Real and Virtual World Display Integration", Mix. Real. Merging real virtual worlds, 1999, pp.5–30.
- [4] H. Wu, S. Lee, H. Chang and J. Liang, "Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education.", Comput. Educ. 62, 2013, pp.41–49.
- [5] M. Akçayir, G. Akçayir, H. Pektaş and Ocak M. "Augmented reality in science laboratories: The effects of augmented reality on university students' laboratory skills and attitudes toward science laboratories", Comput. Human Behav. 57, 2016, pp. 334–342.
- [6] W. Allen, "Overview and Evolution of the ADDIE Training System", Adv. Dev. Hum. Resour. 8, 2006, pp.430–441.
- [7] K. Blundell, "Black holes: A very short introduction", Oxford University Press 1Ed, 2015.
- [8] P. Milgram and F. Kishino, "A taxonomy of mixed reality visual displays", IEICE Transactions on Information Systems, 2003, pp.1–15.
- [9] R. Azuma, "A Survey of Augmented Reality", Teleoperators and Virtual Environments 6, 1997, pp.355–385.
- [10] C. Hosson et al., "Learning Scenarios for a 3D Virtual Environment: The Case of Special Relativity", in Springer Proceedings in Physics 145, 2014, pp.377–383.
- [11] M. Kitagawa, M. Kesden, N. Tran and T. Sivampillai, "VIGOR: Virtual Interaction with Gravitational Waves to Observe Relativity", In Lecture Notes in Computer Science, 2017, pp.404–416.
- [12] Z. Sherin, R. Cheu, P. Tan and G. Kortemeyer, "Visualizing relativity: The OpenRelativity project", American Journal of Physics, 2016, pp.369–374.
- [13] NOVA black holes app educator guide, WGBH Educational Foundation, <https://gpb.pbslearningmedia.org/resource/nvbh-sci-blackholesguide/wgbh-nova-black-holes-app-educator-guide>
- [14] C. Savage, A. Searle and L. McCalman, "Real Time Relativity: Exploratory learning of special relativity", American Journal of Physics, 2007, pp.791–798.
- [15] D. Carr, "Visual computer game features for teaching Relativity", Proceedings - 2010 7th International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization, 2010, pp.35–40.
- [16] J. Sánchez, "Propuesta didáctica para implementar el concepto de agujero negro en estudiantes de educación media", Universidad Nacional de Colombia, 2012, <http://www.bdigital.unal.edu.co/8736/>