



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

[VIGILADA MINEDUCACIÓN Res. 12220 de 2016]

Prototipo de un instrumento musical basado en realidad virtual para terapia musical en el
instituto para Niños Ciegos y Sordos del Valle del Cauca

Laura Sofía Lozano Díaz

Código 8956232

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniera de Sistemas y Computación

Director

Andrés Adolfo Navarro Newball

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN

SANTIAGO DE CALI, DICIEMBRE 1 DE 2025

RESUMEN

Este proyecto aborda el estudio del uso de tecnologías de realidad virtual para simular un instrumento, el cual sirva como apoyo para realizar terapias musicales en el Instituto para Niños Ciegos y Sordos del Valle del Cauca.

El sistema fue realizado utilizando el motor gráfico Unity, y programado para su ejecución en las gafas de realidad virtual Meta Quest 2, las cuales cuentan con dos controles para cada mano, utilizados para tocar el instrumento y producir notas musicales.

Se decidió enfocar el sistema en la accesibilidad, permitiendo específicamente una accesibilidad visual al momento de personalizar los colores del instrumento y el entorno, y una accesibilidad auditiva al utilizar diferentes timbres de sonido y ofrecer un volumen adecuado, además de la riqueza auditiva ofrecida por el equipo de realidad virtual.

El sistema se evaluó con la ayuda del profesor de música del instituto, el cual pudo observar el sistema y ofrecer correcciones y sugerencias para trabajo futuro. Se observó un gran potencial en la herramienta y un claro ejemplo de las posibilidades que la realidad virtual ofrece en el campo de la terapia musical.

ABSTRACT

This project addresses the study of using virtual reality technologies to simulate an instrument, which can serve as support for music therapy at the Instituto para Niños Ciegos y Sordos del Valle del Cauca.

The system was developed using the Unity game engine and programmed to be executed on the Meta Quest 2 virtual reality headset, which features two controllers for each hand, useful for playing the instrument and producing musical notes.

The system was designed with a focus on accessibility, specifically allowing visual accessibility when customizing the colors of the instrument and the environment, and auditory accessibility by using different sound timbres and offering an appropriate volume, in addition to the rich auditory experience provided by the VR headset.

The system was evaluated with the help of the music teacher at the institute, who was able to observe the system and provide corrections and suggestions for future work. The tool showed great potential and served as a clear example of the possibilities that virtual reality offers in the field of music therapy.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION.....	7
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	7
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	8
1.3. OBJETIVOS.....	8
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	8
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
1.4. ALCANCE Y LIMITACIONES.....	9
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	10
1.5.1. UTILIDAD.....	10
1.5.2. IMPACTO.....	10
1.5.3. VIABILIDAD.....	11
2. MARCO DE REFERENCIA.....	12
2.1. MARCO TEÓRICO.....	12
2.1.1. TERAPIA.....	12
2.1.2. TERAPIA MUSICAL.....	12
2.1.3. MÚSICA.....	13
2.1.3.1. OCTAVA.....	13
2.1.3.2. ESCALA MUSICAL.....	14
2.1.4. INSTRUMENTO MUSICAL.....	16
2.1.4.1. IDIÓFONOS.....	16
2.1.4.2. MEMBRANÓFONOS.....	16

2.1.4.3. CORDÓFONOS.....	16
2.1.4.4. AERÓFONOS.....	17
2.1.4.5. ELECTRÓFONOS.....	17
2.1.5. REALIDAD VIRTUAL.....	17
2.1.6. ACCESIBILIDAD.....	18
2.1.6.1. ACCESIBILIDAD SENSORIAL.....	18
2.2. ANTECEDENTES.....	19
3. ANÁLISIS.....	21
3.1. REQUISITOS.....	22
3.1.1. REQUISITOS FUNCIONALES.....	22
3.1.2. REQUISITOS NO FUNCIONALES.....	22
3.1.3. DIAGRAMA DE ACTIVIDADES.....	23
3.1.4. DIAGRAMA DE CASOS DE USO.....	24
4. DISEÑO.....	25
4.1. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA.....	25
4.1.1. XILÓFONO.....	25
4.1.2. ENTORNO.....	26
4.1.3. USUARIO.....	26
4.2. DISEÑO DEL COMPORTAMIENTO.....	27
4.2.1. DISEÑO DE GENERACIÓN DE NOTA MUSICAL.....	27
4.2.2. DISEÑO DE CREACIÓN DE TECLA.....	28
4.3. DISEÑO DE LA INTERFAZ.....	29
4.4. DISEÑO DEL ENTORNO.....	30

5. IMPLEMENTACIÓN.....	31
5.1. USO DE HERRAMIENTA.....	31
5.2. SISTEMA DE REALIDAD VIRTUAL.....	31
5.3. CREACIÓN DEL ENTORNO.....	32
5.4. XILÓFONO.....	34
5.5. GENERADOR.....	35
5.6. SAMPLES.....	39
5.7. ENTORNO.....	39
5.8. INTERFAZ.....	41
5.9. RESULTADOS.....	43
5.10. CONSIDERACIONES TÉCNICAS.....	43
6. PRUEBAS.....	45
6.1. APROBACIÓN ÉTICA.....	47
7. CONCLUSIONES.....	48
8. TRABAJO FUTURO.....	49
9. REFERENCIAS.....	51

1. INTRODUCCIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En los tiempos actuales, la tecnología ha revolucionado la vida del ser humano permitiéndole apoyarse en ella como una herramienta útil para contribuir a la resolución de problemas y a satisfacer sus necesidades. Más específicamente, el campo de los sistemas de cómputo ha permitido avances significativos en el apoyo a aquellos grupos que poseen ciertas limitaciones, las cuales no les permiten acceder a los mismos servicios que a los demás. En este sentido, la accesibilidad y la inclusión ha sido un aspecto clave en la investigación y creación de diferentes aplicaciones y sistemas con el objetivo de permitir su uso al mayor número de personas posibles.

En ese sentido, en el ámbito de la diversidad sensorial existen diferentes métodos los cuales han permitido ayudar en su integración y comodidad en el uso de herramientas de una forma que resulte cómoda y accesible, y que logre reducir la brecha existente en relación con las personas que no cuentan con estas limitaciones. Entre estos métodos, se resalta el uso de terapias de diferente índole, las cuales tienen como objetivo principal ayudar con la rehabilitación en los funcionamientos físicos, sociales y mentales. Se estima que, en Colombia, alrededor de 29.905 personas por cada 100.000 poseen una prevalencia por situaciones de discapacidad y/o enfermedades, las cuales pueden ser aliviadas por medio de terapias [1], y que en ocasiones no pueden acceder a ellas por razones económicas o de accesibilidad.

Concretamente, la terapia musical o musicoterapia, es una herramienta que utiliza la música y sus diferentes componentes para apoyar en la mejora de habilidades motoras, auditivas, visuales, cognitivas, entre otras. Este tipo de terapias requiere la supervisión constante por parte de un experto, el cual se apoya en el uso de instrumentos, sistemas de apoyo, recursos educativos, entre otros. A pesar de sus beneficios, la terapia musical sufre de una falta de accesibilidad debido a que enfrenta retos como el elevado precio de los instrumentos y, en el caso de tenerlos, muchos de los ejercicios asumen que el paciente posee ciertas habilidades

motrices, auditivas y visuales, que le permiten interactuar con el instrumento cómodamente, lo cual no siempre es el caso.

Teniendo en cuenta lo anterior, es claro que la terapia musical podría beneficiarse del uso de tecnologías que permitan mejorar el componente de la accesibilidad. En el marco del proyecto colaborativo Colombia-Quebec se han desarrollado diversos sistemas de cómputo los cuales han ofrecido resultados favorables para la accesibilidad de las poblaciones que presentan diversidad sensorial. Específicamente, el uso de la realidad virtual (RV) ha permitido simular entornos que incentivan el desarrollo y mejora de habilidades para este tipo de población. Sin embargo, el tema de la terapia musical aún no ha sido abordado, por lo que resultaría interesante adentrarse en este campo utilizando estas tecnologías.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Con base en la descripción anterior, podemos formularnos la siguiente pregunta: ¿De qué manera se puede crear un sistema que simule un instrumento con Realidad Virtual y sea accesible para el apoyo en terapia musical en niños con diversidad sensorial?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un prototipo de un sistema accesible que simule, por medio de tecnologías de realidad virtual, un instrumento musical para servir de apoyo en terapias musicales para niños con diversidad sensorial

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las características principales de las terapias musicales, el funcionamiento de instrumentos musicales utilizados en las terapias y su importancia para estas.
- Diseñar un sistema de simulación de un instrumento en realidad virtual que sea accesible para el apoyo en terapias musicales.
- Implementar el sistema de simulación teniendo en cuenta la accesibilidad, disponibilidad y cumplimiento de los aspectos requeridos.
- Evaluar el correcto funcionamiento de la simulación para su integración en las terapias musicales.

1.4. ALCANCE Y LIMITACIONES

Se desarrolló un prototipo, en el que se simuló un instrumento musical en realidad virtual y se obtuvo una experiencia aproximada a la de un instrumento real. En el prototipo fue posible observar el instrumento, interactuar con él, producir las diferentes notas musicales y obtener como resultado el sonido esperado del uso de este. Este prototipo fue implementado utilizando el equipo disponible en el Instituto para Niños Ciegos y Sordos, el cual consiste en las gafas de realidad virtual Meta Quest 2.

Con ayuda del profesor de música del instituto y su apoyo, el instrumento seleccionado para simular fue un xilófono. El dispositivo se implementó únicamente de manera virtual, sin interactuar con un instrumento real, por lo que este estuvo limitado a las capacidades de las gafas Meta Quest 2. Como la diversidad sensorial maneja un amplio espectro de condiciones, este trabajo de grado se limitó a incorporar al menos dos formas de accesibilidad (visual y auditiva) que fueron identificadas con el apoyo de los profesionales del instituto.

El prototipo está destinado para niños de 5 a 12 años, pero este fue evaluado únicamente con el profesor de música del instituto, el cual tiene experiencia en el tema de la terapia musical.

Si bien esto nos permite un primer contacto con expertos en terapia musical, no es lo suficientemente cercano al público objetivo como para evaluar qué tan cómodo y fácil de usar es el sistema para su público objetivo.

El desarrollo no se verá limitado por el contexto ambiental ni político. Sin embargo, será únicamente presentado al personal del instituto.

1.5. JUSTIFICACIÓN

1.5.1. UTILIDAD

El desarrollo del prototipo de simulación de un instrumento tiene el potencial de servir como apoyo a la aplicación de terapias musicales en el Instituto. Además, su enfoque en la accesibilidad permitirá que niños con diversidad sensorial puedan utilizar el sistema.

El proyecto es de interés para el grupo Destino de la Javeriana Cali, pues encaja en el marco del proyecto colaborativo Colombia-Quebec, el cual no ha explorado la terapia musical en realidad virtual. La simulación de un instrumento en realidad virtual podría permitir capturar datos de manera objetiva, que los profesionales luego podrían analizar, marcando una diferencia con el uso de instrumentos tradicionales, en donde el progreso se logra medir únicamente a partir de la observación.

1.5.2. IMPACTO

Este proyecto tiene el potencial de producir un impacto futuro, si se logra brindar evidencia de sus beneficios en el mediano y largo plazo. Aunque la responsabilidad de su uso recae sobre el Instituto, de darse, el instrumento virtual podría ser una alternativa accesible a la terapia musical, más económica que un instrumento real.

1.5.3. VIABILIDAD

El desarrollo de un sistema de simulación de un instrumento para apoyar en terapias musicales es viable debido a que su tecnología base (realidad virtual) es de fácil acceso hoy en día, junto al impacto positivo que ya se ha visto en los últimos años. Además, el Instituto para Niños Ciegos y Sordos se consolida como un aliado importante para la Pontificia Universidad Javeriana Cali, en donde se cuenta con un laboratorio de realidad virtual y con dispositivos en los que se puede desarrollar y aplicar el sistema.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. TERAPIA

La terapia es un término que conlleva numerosos significados dependiendo del contexto en el que se hable. En un concepto general, la terapia son todos aquellos procedimientos que tienen el fin de tratar, atender y ayudar. La terapia, en sus distintas formas, se enfoca en fomentar o mejorar la salud en el individuo y sus elementos (cuerpo, mente y espíritu) [2].

2.1.2. TERAPIA MUSICAL

La terapia musical, también conocida como musicoterapia o music therapy en inglés, es un proceso sistemático de intervención en el que un terapeuta ayuda a su paciente a fomentar su salud por medio de experiencias musicales y las relaciones desarrolladas por estas como fuerzas dinámicas del cambio. El uso de la música puede ayudar con diversos tipos de rehabilitación, tanto física, como auditiva, visual, entre otras, dada la versatilidad de los diferentes instrumentos y el estímulo que estos generan en los diversos sentidos de las personas [2].

La terapia musical es muy diversa, empleada en diferentes organizaciones como colegios, hospitales, institutos, entre otros. El tipo de pacientes para los que se emplea incluye a niños y adultos con diversidad sensorial, neurodivergencia, diversidad en el aprendizaje, enfermedades, víctimas de abuso y problemas de consumo. Es también utilizada para mejorar el estrés, dolor, autorrealización y el desarrollo espiritual [2].

Los objetivos y métodos varían dependiendo del terapeuta y paciente en cuestión. Los objetivos pueden ser de rehabilitación, educativos, preventivos, entre otros. Los métodos se

suelen enfocar en la escucha, improvisación, ejecución, composición, movimiento o palabra, además de poder combinarse con otras técnicas como pintura, artes plásticas, danzas, teatro y poesía [2]

2.1.3. MÚSICA

La música es un término muy general, el cual varía dependiendo de aspectos culturales y sociales. Se suele concretar que aquellos sonidos con vibraciones regulares y uniformes, distinguibles del simple ruido, es aquello que forma lo que llamamos “música”. Sonido es aquel efecto producido por ondas propagadas a través del aire, las cuales detecta el sentido del oído. Estos sonidos poseen cualidades definidas como “ritmo”, “melodía” y “armonía”, siendo el ritmo la distancia y separación entre cada sonido, melodía el producto de dos sonidos producidos uno detrás del otro, y armonía como la unión de dos o más sonidos simultáneos. [3]

La música es utilizada ampliamente en diversos campos como danzas, bailes, producciones televisivas, teatro y el internet, utilizada como un medio de representación de emociones humanas y situaciones diversas, además de su uso cada vez más amplio en temas de terapia y rehabilitación [3].

2.1.3.1. OCTAVA

Una octava se define como el intervalo que separa una nota de otra con el doble o la mitad de la frecuencia [4]. Si empezamos por la nota Do₄ que tiene una frecuencia de 262Hz, Do₅ debe de tener una frecuencia de 524Hz y Do₆ de 1048Hz, demostrando una tendencia exponencial al momento de calcular notas sucesivas.

2.1.3.2. ESCALA MUSICAL

Una escala musical se define como una sucesión de notas dentro de una octava. Entre cada octava existe un total de 12 notas o semitonos de acuerdo con el método de afinación de Temperamento Igual. Una escala diatónica contiene 7 notas, las cuales pueden ser definidas por su posición en relación con la escala cromática (la escala que contiene las 12 teclas):

$$escala_diatonica = [0, 2, 4, 5, 7, 9, 11]$$

Donde:

- 0 = Do
- 2 = Re
- 4 = Mi
- 5 = Fa
- 7 = Sol
- 9 = La
- 11 = Si

Considerando que cada octava consiste en una vuelta (12), la posición de Re4 resultaría de la ecuación:

$$posicion = octava * 12 + posicion_escala$$

Considerando Do4 como posición inicial y dado que Do4 y Re4 pertenecen a la misma octava, su valor es 0. Reemplazando:

$$posición = 0 * 12 + 2 = 2$$

Partiendo desde Do4 como posición inicial, si queremos calcular Re4 por ejemplo. La posición en el arreglo de escala diatónica es de 2, y entonces podemos aplicar la ecuación:

$$tono = \sqrt[12]{2^{posición}} * tono_posición_inicial$$

Reemplazando para Re4:

$$tono = \sqrt[12]{2^{50}} * 262Hz$$

$$tono \approx 1,1225 * 262Hz \approx 294Hz$$

Con esta ecuación, podemos asignar el tono a una tecla partiendo desde el sample elegido en Do4.

Para cada escala, las posiciones son:

$$\text{diatonica} = [0, 2, 4, 5, 7, 9, 11]$$

$$\text{pentatonica} = [0, 2, 4, 7, 9]$$

$$\text{cromatica} = [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]$$

2.1.4. INSTRUMENTO MUSICAL

Para producir sonidos musicales, se utiliza aquello que llamamos un “instrumento musical”. Existe una gran variedad de instrumentos musicales, los cuales son clasificados de distintas formas, siendo una de ellas el sistema Sachs-Hornbostel. Esta clasificación separa los instrumentos en 4 tipos marcados con los números del 1 al 5, y sus respectivos subtipos [5].

2.1.4.1. IDIÓFONOS

Los idiófonos son aquellos instrumentos en los que la vibración es producida por la sustancia del instrumento mismo. Es su cuerpo, su solidez y elasticidad la que ocasiona las vibraciones. En esta categoría se suelen encontrar subtipos como los instrumentos idiófonos de percusión (111.2), aquellos que se golpean con o contra un objeto no sonoro (como baquetas), en donde encontramos instrumentos como los xilófonos (111.212) [5].

2.1.4.2. MEMBRANÓFONOS

Instrumentos que generan sonido a través de la vibración de una membrana extendida. Un ejemplo clásico son los tambores que se golpean directamente con la mano o un elemento de apoyo como baquetas (211), o aquellos que son raspados en vez de golpeados (23) [5].

2.1.4.3. CORDÓFONOS

Los cordófonos son aquellos instrumentos musicales que generan sonido a través de la vibración de una o varias cuerdas tendidas en dos puntos fijos, la cual ocasiona, a su vez, una vibración en el aire. En esta categoría podemos encontrar a los cordófonos simples (31), los

cuales suenan sin necesidad de un resonador (aunque la pueden incluir, cordófonos compuestos (32), los cuales dependen del resonador para producir el sonido. En los cordófonos se encuentra un instrumento muy conocido, el piano [5].

2.1.4.4. AERÓFONOS

El aire en sí mismo es el que produce la vibración. En estos instrumentos encontramos los aerófonos libres (41), en los cuales el aire no se encuentra dentro del instrumento; los instrumentos de viento verdaderos (42), en donde el aire está contenido dentro del instrumento y el cual incluye a las flautas y a los instrumentos de caña como el clarinete [5].

2.1.4.5. ELECTRÓFONOS

Estos instrumentos generan sonido a través de impulsos eléctricos. En este grupo se encuentran los diferentes sintetizadores e instrumentos como el theremín [5].

2.1.5. REALIDAD VIRTUAL

La Realidad Virtual (RV) o Virtual Reality (VR) en inglés es una tecnología que consiste en una simulación o réplica de un ambiente determinado en donde se le da al usuario la sensación de estar inmerso en el ambiente, tomando control e interactuando con ese ambiente usando su propio cuerpo. Esta tecnología puede abarcar desde un sistema simple de simulación en un computador personal hasta un sistema sofisticado el cual utiliza equipo avanzado para acercarse lo más posible al mundo real, como gafas de visión, controles de mano, sensores de movimiento, etc. [6].

A pesar de ser conceptos similares, no debe ser confundida con el término “Realidad Aumentada” o “Augmented Reality” en inglés, la cual mejora la percepción y suplementa el conocimiento acerca de entidades o procesos existentes. Para un efecto más inmersivo en realidad virtual, se suelen utilizar técnicas de realidad aumentada y otros conceptos como la telepresencia, la cual es una recreación remota de una situación real [7] [8].

2.1.6. ACCESIBILIDAD

La accesibilidad es el conjunto de herramientas y técnicas utilizadas para que aquellas personas que posean algún tipo de discapacidad puedan realizar actividades en igualdad de condiciones respecto a las que no las posean [9].

2.1.6.1. ACCESIBILIDAD SENSORIAL

La accesibilidad sensorial comprende todo el rango de técnicas y estrategias utilizadas para apoyar a las personas con diversidad sensorial. Entiéndase la gran variedad en la percepción humana en ambientes naturales y construidos [10]. La accesibilidad sensorial busca ayudar a reducir o eliminar barreras para aquellas personas que cuenten con situaciones particulares en su percepción y sentidos, como lo pueden ser la neurodivergencia, limitaciones en movilidad, visión, escucha y tacto. Este tipo de accesibilidad ha estado ganando cada vez más terreno conforme las investigaciones avanzan y se tiene un mejor entendimiento del bienestar social y ambiental [10].

2.2. ANTECEDENTES

Entre el 2021 y 2024, se realizó un proyecto colaborativo entre Colombia y Quebec, en alianza con el Instituto para Niños Ciegos y Sordos del Valle del Cauca, en donde se analizó el uso de realidades extendidas para el aprendizaje de niños con diversidad sensorial. Se utilizaron varias herramientas como filtros de Snapchat, libros táctiles y juegos de laberinto, las cuales se implementaron a través de técnicas de realidad aumentada, realidad mixta y realidad virtual, junto con el uso de las gafas de realidad virtual Meta Quest 2, sensores Kinect 2, gafas de realidad mixta Hololens 2 y tablets con sistema operativo Android. Se encontró un potencial en el uso de este tipo de tecnologías para la educación de niños con diversidad sensorial [11]. Esto sirve como ejemplo del impacto positivo que la realidad virtual puede lograr en cuanto a la diversidad sensorial y ofrece un primer acercamiento sobre cómo utilizarla de manera accesible.

Un estudio analizó el efecto que tenían la realidad virtual y la terapia musical por separado en pacientes que presentaban ansiedad y dolor perioperatorio al ser sometidos a cirugías de extracción de terceras molares. Se encontró una reducción mayor en la ansiedad, junto con reducciones menores en el dolor perioperatorio, la presión sanguínea y el pulso cardiaco en comparación con el grupo de control [12]. Esto nos demuestra la efectividad de ambas técnicas por separado como formas de terapia / herramientas para el apoyo de esta.

Una investigación en la que se exploró el impacto de la realidad virtual en la mejora en las habilidades motoras de los niños en general. Se investigaron bases de datos relacionadas con el tema en bases de datos como PubMed y ScienceDirect. Los resultados muestran una respuesta positiva con el uso de RV [13]. La investigación nos ofrece más evidencia sobre el impacto positivo de la realidad virtual en cuanto a terapias que ayuden a mejorar las habilidades motoras de los niños.

Un estudio evaluó el impacto que tenía la música sobre la ansiedad en niños a los que se les realizaría un procedimiento dental. Se separaron los niños en 2 grupos: un grupo control, en donde no se les proporcionó terapia musical, y un grupo experimental, donde si les proporcionaba la terapia. Los resultados concluyeron que el grupo experimental presentó reducciones en su frecuencia cardiaca, pero no en su nivel de oxigenación ni puntajes de dolor; el grupo control se mantuvo estable en los 3 parámetros [14]. Este estudio nos muestra que la terapia musical tiene un efecto positivo en niños, lo cual nos da una pista sobre el impacto que pueden llegar a producir estas estrategias.

Los trabajos anteriormente citados nos dan una vista de las ventajas que poseen tanto la realidad virtual como la terapia musical en su misión por contribuir al bienestar de aquellos con dificultades en su salud y habilidades. Este trabajo, de igual manera, decide abordar estos dos conceptos y con objetivos similares a estos. Este trabajo de grado busca ir un paso más allá combinando los dos conceptos y creando un sistema que pueda ofrecer estas ventajas con un alto enfoque en la accesibilidad, apoyándonos en el Instituto para Niños Ciegos y Sordos del Valle del Cauca.

Este proyecto resulta ventajoso como una oportunidad de exploración en la combinación de ambas técnicas y la posibilidad de obtener retroalimentación por parte del instituto, del cual hace parte la población a la que va destinada la solución, y expertos en el área como profesores de música que deben de tener en cuenta la accesibilidad.

A pesar de esto, este proyecto cuenta con desventajas como la ausencia de un mayor número de involucrados que permitan un avance más profundo y rápido, sobre todo en la fase de evaluación, debido al alcance y limitaciones anteriormente establecidos. Además, la población objetivo es más reducida, mientras que los demás proyectos tenían un enfoque más general.

3. ANÁLISIS

En esta etapa, se definieron los requisitos y se desarrolló el flujo que se esperaba para el prototipo de sistema. Para ello, se realizó una reunión con el profesor de música del instituto, Omar Pardo, a quien le interesó la idea del trabajo de grado y ofreció algunos aspectos para incorporar en el sistema.

En esta reunión se discutió el instrumento a simular. El profesor repasó los diferentes instrumentos utilizados en terapias musicales en el instituto y concluyó que el más indicado era un xilófono debido a la posibilidad de interacción con el sistema de realidad virtual y a su utilidad en las terapias musicales. Se explicó el potencial de la terapia musical no solo como herramienta auditiva, sino también visual y cognitiva, y cómo el uso de xilófonos es frecuente en las instalaciones del instituto al momento de realizar las terapias.

En cuanto a las funcionalidades del sistema, el profesor sugirió incorporar diversos sonidos al xilófono para que se pudieran producir timbres de piano, guitarra, saxofón, entre otros; poder elegir el número de placas del xilófono y la distancia entre estas. Estos aspectos fueron tomados en cuenta a la hora de desarrollar el modelo.

El tema de la accesibilidad también fue muy importante. Se habló de poder modificar la distancia entre diferentes placas, además de poder seleccionar el número de estas presentes en el xilófono, para poder tocar melodías más simples y que no confundieran tanto a los niños del instituto.

3.1. REQUISITOS DEL SISTEMA

En ese orden de ideas, se establecieron los siguientes requisitos para el sistema:

3.1.1. REQUISITOS FUNCIONALES

- El sistema debe presentarle al usuario un xilófono que pueda ser interactuado y tocado.
- El sistema debe permitir cambiarle el timbre (tipo de sonido) al xilófono.
- El sistema debe ser útil para producir melodías simples.
- El sistema debe de ser accesible de forma auditiva y visual.
- El sistema debe de permitir cambiar el número de placas del xilófono.
- El sistema debe ofrecer un entorno agradable y cómodo.
- El sistema debe de tener un entorno al que se le pueda cambiar el color.
- El sistema debe de permitir seleccionar la escala musical.
- El sistema debe de permitir elegir la distancia entre las placas.
- El sistema debe de reproducir sonido de forma clara y cómoda.

3.1.2. REQUISITOS NO FUNCIONALES

- El sistema debe de ser desarrollado en la herramienta Unity.
- El sistema debe de funcionar en las gafas Meta Quest 2.
- El sistema debe de hacer uso de samples de libre uso para la reproducción de sonido.
- El sistema debe de utilizar modelos en 3d de libre uso.

3.1.3. DIAGRAMA DE ACTIVIDADES

Para el desarrollo del sistema, se plantea el siguiente diagrama de actividades (ver figura 1).

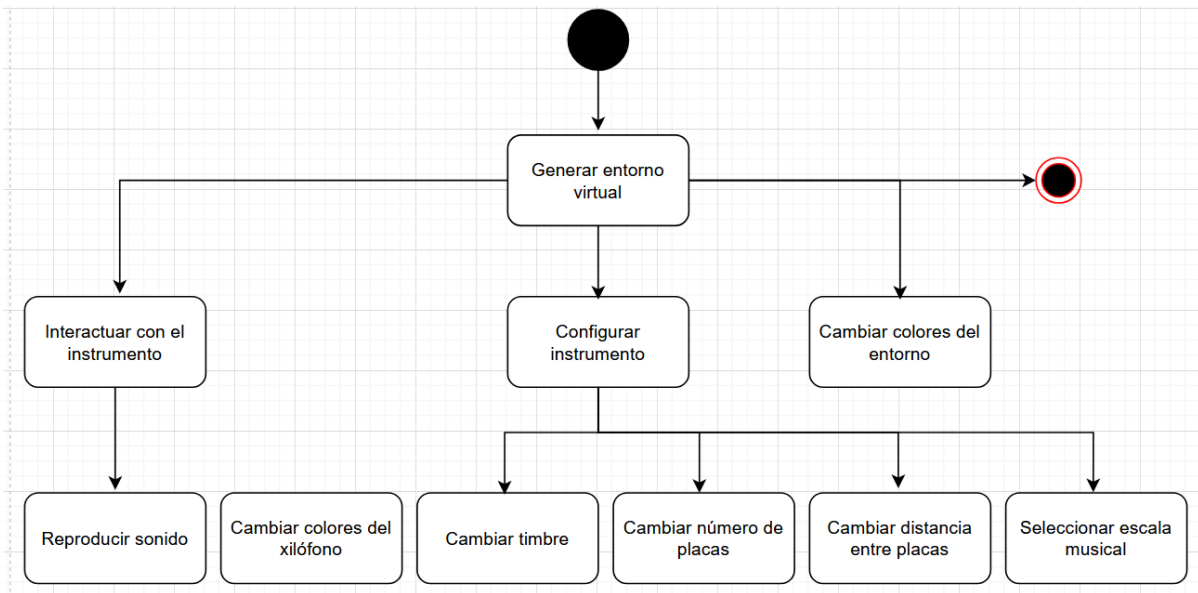


Figura 1. Diagrama de actividades. Hecho en draw.io

3.1.4. DIAGRAMA DE CASOS DE USO

Adicionalmente, se plantea el siguiente diagrama de casos de uso (ver figura 2).

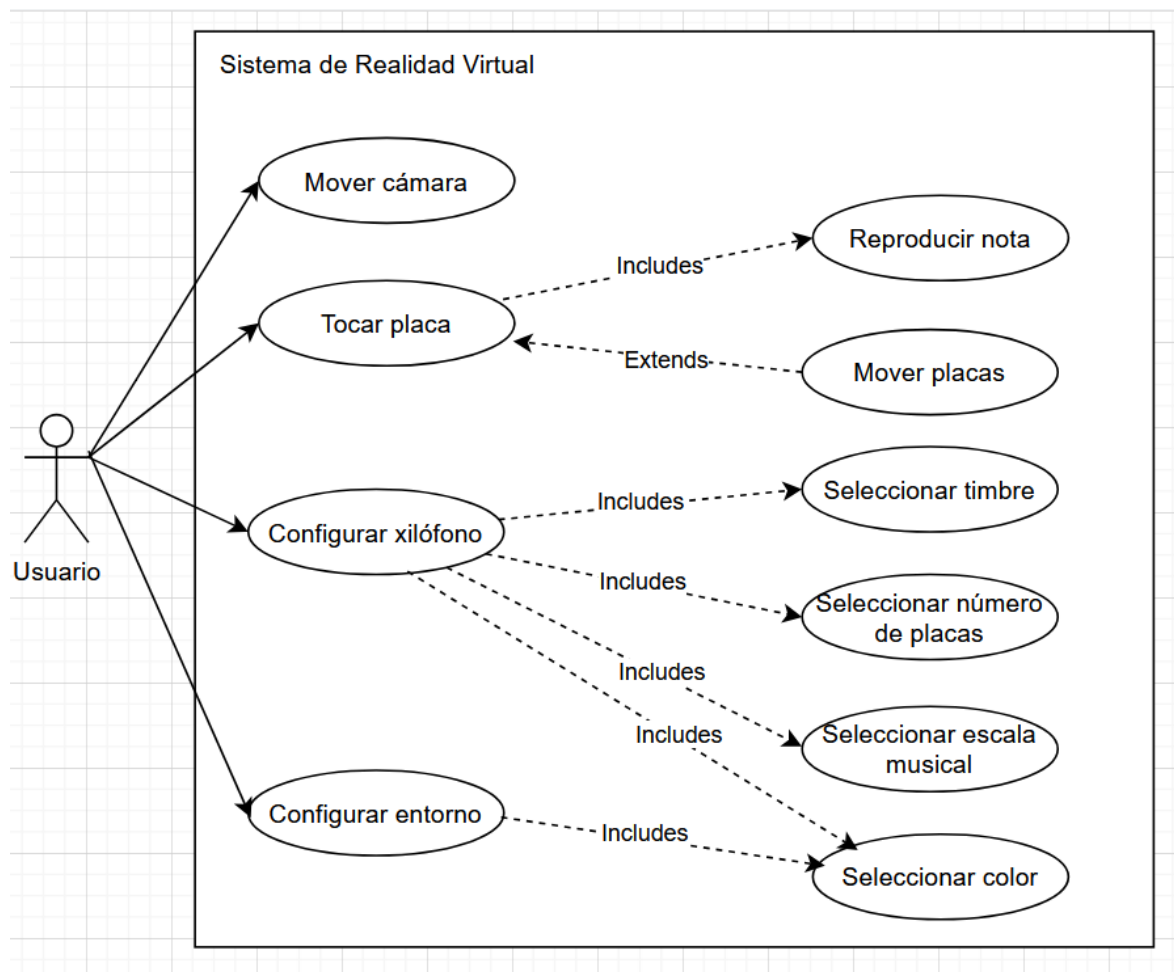


Figura 2. Diagrama de casos de uso. Hecho en draw.io

4. DISEÑO

4.1. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

Dado que el sistema va a ser desarrollado en la herramienta Unity, es crucial diseñar el sistema teniendo en cuenta la jerarquía que utiliza la aplicación al momento de crear el entorno. Con esto en mente, se estableció la siguiente estructura para desarrollar el sistema:

- Xilófono
- Usuario
- Entorno

4.1.1. XILÓFONO

El elemento principal de este sistema es el instrumento en cuestión: el xilófono. Este debe de ser altamente modificable de acuerdo con los objetivos propuestos anteriormente y la reunión que se tuvo con el profesor de música.

Se ha decidido que el xilófono se asemeje visualmente a los instrumentos que se suelen utilizar para enseñar música y realizar ejercicios de terapia musical para niños. Debe de ser colorido, de tal forma que sea agradable a la vista y pueda ser modificable para mejorar la accesibilidad en sus configuraciones. Las placas varían en tamaño: las notas más grandes son más graves, mientras que las más pequeñas son más agudas. La sucesión de placas debe de formar una escala musical

En cuanto al sistema de cómputo, dado que el xilófono debe de poder ser generado con un número variable de teclas, la mejor opción es tomar una de las placas y replicarla con la configuración que le corresponda. Por ende, se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Color de la tecla
- Nota (tono) de la tecla
- Tipo de instrumento (timbre)
- Tamaño
- Distancia entre cada tecla

Para la reproducción de sonido, se ha optado por utilizar samples, los cuales representarán el sonido del instrumento en cuestión en la nota do₄, y a partir de allí se calcularán matemáticamente las demás.

4.1.2. ENTORNO

El entorno del sistema es importante para poder sumergir al usuario cómodamente y que pueda aprovechar al máximo las capacidades del instrumento. El diseño de este entorno será detallado más adelante. En el entorno estará presente una interfaz que ofrezca la opción de modificar la configuración del sistema a conveniencia del usuario en cualquier momento.

4.1.3. USUARIO

Dado que se va a desarrollar el sistema para las gafas Meta Quest 2, es importante configurar el sistema para que pueda ser utilizado en ellas. Por ello, es crucial otorgarle al usuario un par de controles que pueda mover e interactuar utilizando los que vienen con las gafas. En Unity se cuenta con las librerías oficiales de Meta para el uso de las gafas, junto con la opción de incorporar los controles y la funcionalidad de los botones.

El usuario se podrá mover libremente por todo el salón, pudiendo acercarse al xilófono a tocarlo, o a explorar el entorno si lo desea.

4.2. DISEÑO DE COMPORTAMIENTO

4.2.1. DISEÑO DE GENERACION DE NOTA MUSICAL

Para asegurarnos de que el sistema funcione como debería, es crucial diseñar la lógica de cómo va a funcionar el instrumento. Lo más crítico consiste en la correcta generación del xilófono, con sus características y la posibilidad de modificarlo. La generación puede ser explicada por medio del siguiente pseudocódigo:

```
for int i in numero_de_teclas:  
  nueva_tecla = prefab()  
  nueva_tecla.posicion = (i + distancia_teclas)  
  color_tecla = paleta_seleccionada[i % length(paleta_seleccionada)]  
  timbre_tecla = sample_seleccionado  
  nota_tecla = escala[(i % length(escala)) + i / length(escala) * 12]  
  tono_tecla = pow(2, nota_tecla / 12)
```

Es preciso aclarar que tanto la paleta como la escala deben ser representadas como un arreglo en donde se puedan seleccionar las que hayan sido incluidas en el sistema.

4.2.2. DISEÑO DE CREACION DE TECLA

Para cada tecla, una vez establecido el tono de esta, se procede a establecer el color, tamaño y posición. Para el color, basta con tener una lista que represente la paleta de colores e iterar sobre esta:

```
paleta = [rojo, azul, amarillo, verde]
```

```
color_tecla = paleta[i % length(paleta)]
```

Para el tamaño, es crucial considerar los xilófonos reales, los cuales tienen placas más grandes para notas más graves, y placas más agudas para notas más agudas. Para eso, se establece el tamaño con la siguiente ecuación:

```
tamaño = tamaño * (1 - i * factor_cambio_tamaño)
```

Esta fórmula funciona considerando un tamaño inicial X para la nota más grande (Do4)

Por último, la posición se calcula con la fórmula:

```
posicion = (-(numero_teclas / 2) + i) * (factor_espaciado))
```

Esta función calcula las posiciones tomando en cuenta el centro del xilófono, representado por $\text{numero_teclas} / 2$.

La asignación del timbre de la nota se realizará por medio de un arreglo que contenga referencias a los archivos de audio, del tal forma que funcione como una simple selección del número del sample a utilizar.

4.3. DISEÑO DE LA INTERFAZ

Para este sistema es muy importante una interfaz que permita configurar el xilófono y el entorno de una forma fácil y cómoda, que tome en cuenta las limitaciones al momento de utilizar el equipo de realidad virtual.

Debido a la naturaleza de los programas en realidad virtual, resulta incómodo crear una interfaz que requiera presionar la pantalla, similar a las aplicaciones móviles, dado que esto requeriría quitarse el dispositivo. En su lugar, en una de las paredes se colocarán diversas opciones de configuración, las cuales podrán ser cambiadas con los controles del juego. La interfaz deberá de tener sliders y botones que permitan fácilmente entender qué se está cambiando, en qué valor está, y que el cambio se dé inmediatamente con respecto al momento en que se realizó.

Para las escalas musicales se utilizan 3 botones para seleccionar cada escala (Cada botón tiene un número representativo para mejor distinción (5 – pentatónica, 7 – diatónica, 12 – cromática). Para las demás funciones se utilizan deslizadores, los cuales permiten un fácil cambio entre valores (enteros, flotantes, # de la paleta de colores). El texto debe de ser grande y fácil de leer, los deslizadores deben de marcar a un lado el valor actual para orientar al usuario.

Para un mejor entendimiento, se ha creado un mockup (ver figura 3) que expresa mejor el diseño de la interfaz:

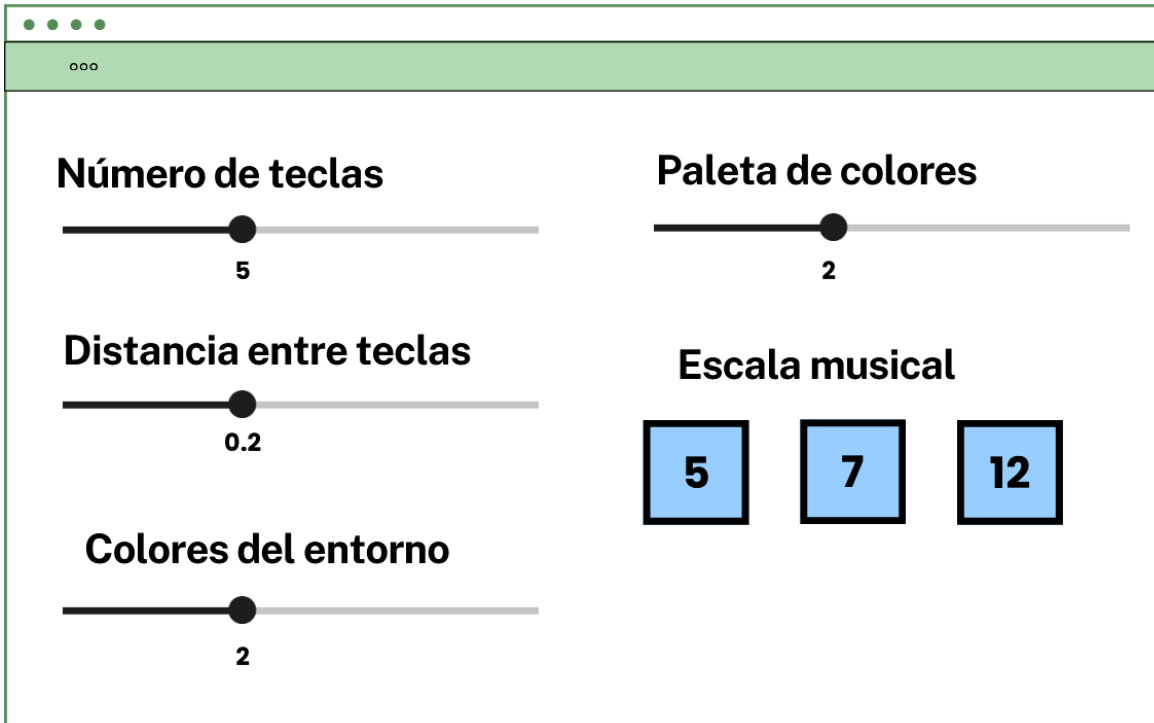


Figura 3. Mockup de la interfaz. Hecho en Canva

4.4. DISEÑO DEL ENTORNO

El entorno tendrá un ambiente tipo salón de juegos, con imágenes ilustrativas relacionadas con animales típicos de Colombia, generadas con inteligencia artificial. Se colocará una mesa, y encima de esta el xilófono centrado.

El entorno debe de poder modificarse de acuerdo con las necesidades del usuario. Para esto, el color de las paredes, piso y techo será modificable en la configuración, con diversos colores que permitan establecer un alto contraste entre estos y el xilófono.

Las ilustraciones serán generadas utilizando herramientas de inteligencia artificial. El aspecto de los animales debe de ser en dibujo animado, coincidiendo con la temática del entorno que se desea implementar.

5. IMPLEMENTACION

5.1. USO DE HERRAMIENTA

Como ya se estableció anteriormente, la herramienta Unity fue la usada para el desarrollo del sistema. Las librerías relacionadas con las gafas Meta Quest 2 fueron instaladas, junto con las librerías generales para Realidad Virtual OpenXR, y un simulador para depuración cuando no se tuvieran las gafas presentes.

La razón del uso de la herramienta radica en su amplio portafolio de librerías y contenido relacionado con la realidad virtual, dado que es uno de los motores gráficos más usados del mercado. Además, la herramienta es de uso gratuito y no es necesario contar con un equipo de cómputo muy avanzado para desarrollar dentro de ella.

Para la creación y modificación de scripts en `c#` se utilizó el IDE Visual Studio Code por su integración con el lenguaje de programación, facilidad de uso y acoplamiento con Unity.

5.2. SISTEMA DE REALIDAD VIRTUAL

El sistema fue desarrollado con base en una plantilla para realidad virtual de Unity, la cual contó con la configuración necesaria para poder correr un entorno de realidad virtual. El entorno fue creado por medio de la interfaz gráfica de la herramienta, la cual permite la fácil creación de objetos, prefabs y conexión entre las diversas partes.

Lo primero que se realizó fue la instalación de librerías de OpenXR y Meta Quest para desarrollar entornos de realidad virtual en Unity. Posterior a eso, se cargó una plantilla de realidad virtual ofrecida por la plataforma que cuenta con algunas configuraciones ya establecidas y un entorno simple para iniciar desde un punto claro. Estas librerías cuentan con un sistema de simulación llamado XRDeviceSimulator, el cual nos permitió probar el sistema cuando no teníamos las gafas al alcance, reduciendo tiempos en cuanto a la

disponibilidad de estas y el proceso que intuía compilar el sistema cada vez que se quisiera probar.

5.3. CREACIÓN DEL ENTORNO

Una vez el sistema estaba configurado, el siguiente paso era organizar el sistema y añadir los objetos que harían parte de él. Para ello, se utilizaron formas básicas de Unity, y se importó un modelo para el xilófono [15] (ver figura 4).

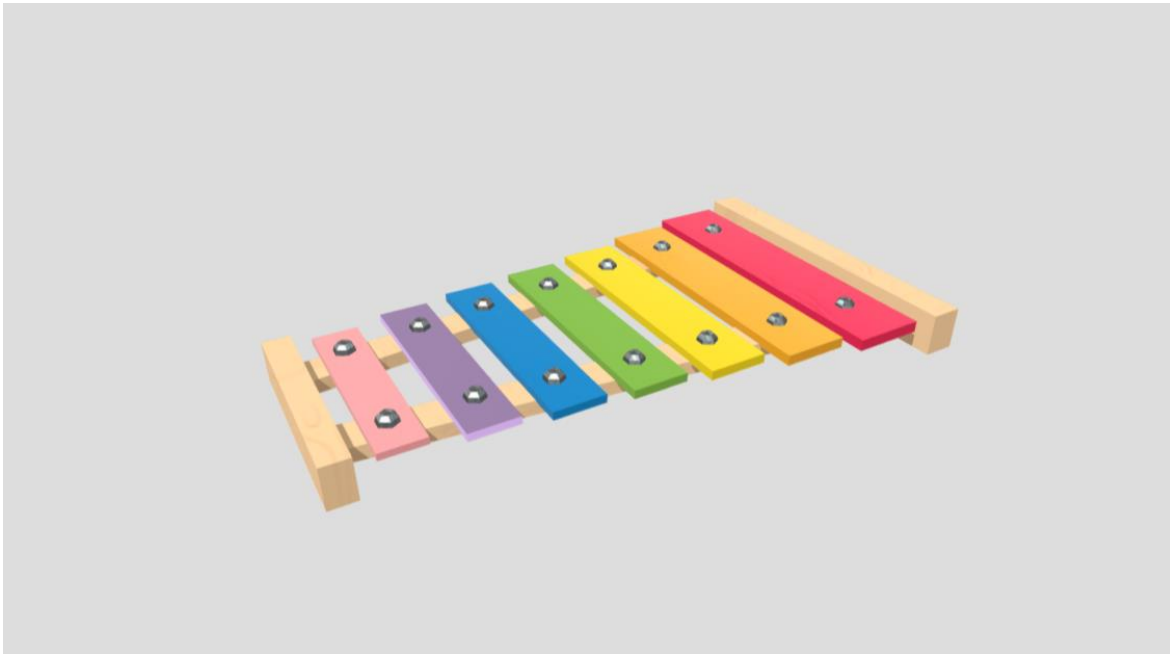


Figura 4. Modelo de xilófono. Libre uso. Obtenido de SketchFab.

Posteriormente, se procedió a generar las ilustraciones en cuestión utilizando inteligencia artificial (ver figura 5).



Figura 5. Mono tití. Generado con ChatGPT

También fueron generadas imágenes del oso de anteojos y del cóndor de los ándes. Todas las imágenes fueron creadas siguiendo el diseño de salón de videojuegos que se estableció anteriormente.

La mesa en la que se colocaría el xilófono fue creada con una figura por defecto de Unity, dado que el tamaño variable del xilófono complicaba el uso de un modelo de mesa.

5.4. XILÓFONO

El xilófono fue implementado utilizando un prefab y un generador. El prefab fue creado con base en el modelo obtenido anteriormente, y se extrajo una de las placas utilizando el software Blender (ver figura 6).

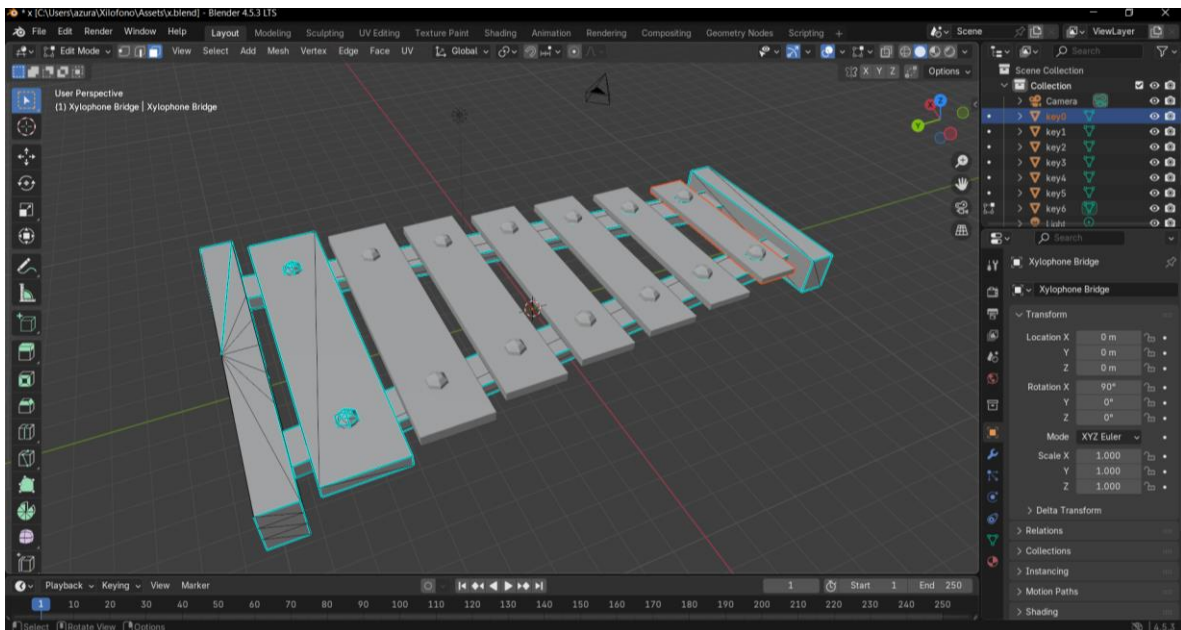


Figura 6. Separación de las placas en Blender.

Una vez obtenida las placas, se creó el prefab en Unity. Se le añadió un material para asignarle los colores de la paleta más adelante.

Posteriormente, se creó un Script llamado XyloKey.cs, el cual contiene la lógica interna que asigna la configuración deseada al prefab. Este Script será utilizado al momento de la creación del xilófono, dado que cada placa contiene atributos diferentes dependiendo de su posición en el instrumento.

El generador consiste en un objeto en blanco con un script adjuntado llamado XyloSpawner.cs. En este script se realiza la lógica de selección y cálculo de características de cada una de las placas. Como caso puntual, podemos observar la forma en la que se calculan los tonos de las placas:

5.5. GENERADOR

El generador fue creado como un objeto que, al ser invocado, genera cada placa con los atributos deseados y en las posiciones correspondientes. Este generador va junto con un script llamado XyloSpawner.cs, el cual recibe las configuraciones como entradas y realiza todos los cálculos necesarios para crear las placas.

Una parte importante del código a resaltar es el loop interno que crea cada tecla, la cual podemos observar a continuación:

```
// Iterar para crear cada tecla  
  
for (int i = 0; i < numKeys; i++)  
  
{  
  
    // Crear placa  
  
    GameObject key = Instantiate(keyPrefab, transform);  
  
    // Asignar posición  
  
    Vector3 pos = new Vector3(0f, 0f, -(numKeys / 2) + i) * (spacing);  
  
    key.transform.localPosition = pos;  
  
    // Ajustar escala (tamaño)  
  
    Vector3 scale = key.transform.localScale;
```

```

scale.z *= 1f - i * 0.025f; // Ancho

scale.x *= 1f - i * 0.025f; // Largo

key.transform.localScale = scale;

// Configurar AudioSource para el sonido

AudioSource src = key.GetComponent<AudioSource>() ??
key.AddComponent<AudioSource>();

// Elegir sample

if (sampleClips != null && sampleClips.Length > 0)
{
    src.clip = sampleClips[sampleIndex % sampleClips.Length];
}

// Calcular tono. Tomando como punto de partida la nota Do4

int octave = i / steps.Length;

int note = i % steps.Length;

float offset = steps[note] + octave * 12f + startingNote;

float pitch = Mathf.Pow(2f, offset / 12f);

// Establecer tono

XyloKey xy = key.GetComponent<XyloKey>();

if (xy != null)
{
    xy.SetPitch(pitch);
}

else src.pitch = pitch;

```

```

// Establecer color de la paleta

Renderer rend = key.GetComponent<Renderer>();

if (rend != null)
{
    rend.material.color = palette[i % palette.Length];
}
}

```

Este código itera de acuerdo al número de placas a crear. En la línea 4 se genera la placa por medio del prefab. En la línea 6 se asigna la posición, la cual va centrada respecto a la mesa y considera el espaciado, denotado por la variable *spacing*, al momento de calcularla.

Posteriormente, se escala cada placa de acuerdo a su posición en el xilófono, para hacer alusión al funcionamiento de las estas en los instrumentos reales: placas más grandes suenan más graves, y placas más pequeñas suenan más agudo.

Después de establecer el tamaño y posición, se procede a crear el AudioSource, que manejará todo el tema de sonido, y se elige el sample correspondiente. Luego, se calcula la nota correspondiente a la placa utilizando la lógica vista anteriormente en la fase de diseño. Por último, se extrae el color de la paleta de colores.

Este archivo también se encarga de crear las paletas de colores y las escalas. Se consideran un total de 6 entradas para el script, cada una representando una configuración:

- *sampleClips*: contiene un arreglo con referencias a los archivos de sonido utilizados
- *sampleIndex*: el número del sample a utilizar
- *numKeys*: número de placas del xilófono
- *music_scale*: ID de la escala musical (5 para pentatónica, 7 para diatónica, 12 para cromática)
- *spacing*: espaciado entre teclas
- *colorPalette*: número de la paleta de colores a utilizar

La asignación de timbres (tipo de sonido) se realiza aquí por medio de una lista de samples de uso libre [16] [17] precargados y adjuntados como parámetros para el spawner. De igual manera, las paletas de colores son preestablecidas y seleccionadas con la lógica del sistema.

Cuando se cambia una configuración, el sistema elimina el xilófono ya creado y genera uno nuevo con las nuevas características. Este enfoque resultó ser el más eficiente y rápido. Los resultados se ven inmediatamente después de cambiar un parámetro en la interfaz.

Se establecieron un total de 5 paletas de colores para el xilófono:

- Colores pasteles: colores suaves y agradables a la vista. Opción por defecto
- Colores fuertes: colores vivos y distinguibles entre sí, ideal para opciones de alto contraste con fondos blanco y negro.
- Paleta deuteranopia
- Paleta protanopia
- Paleta tritanopia

Las últimas 3 paletas son una ayuda a aquellas personas que presentan daltonismo, por lo que estas les sirven para distinguir mejor los colores de cada placa entre sí.

5.6. SAMPLES

Cada sample consiste en un archivo wav con una grabación de la nota Do4 de diferentes sonidos de instrumentos. Esta nota es la referencia para que el generador calcule cada nota sucesiva al momento de crear el xilófono. El sistema es capaz de cargarlas por medio de los assets, y se asignan a cada tecla con un objeto AudioSource. Se obtuvieron 6 samples de libre uso de 2 fuentes [16] [17]:

- Xilófono (por defecto)
- Trompeta
- Piano
- Marimba
- Guitarra
- Saxofón

5.7. ENTORNO

El entorno fue creado utilizando objetos básicos de Unity y estableciéndoles un material fácilmente modificable por medio de la interfaz. Este entorno consiste en un piso cuadrado, 4 paredes, una mesa rectangular, una ventana y un techo con vista al cielo. Los elementos en cuestión cuentan con un color, el cual es modificado por medio del script BuildingColorHandler.cs, el cual establece la conexión para poder modificar el color del material.

Considerando que uno de los objetivos incluía la accesibilidad, se consideró ofrecer una amplia selección de colores que permitieran jugar con el entorno y su relación con el instrumento, ofreciendo opciones de alto contraste y fácil distinción en caso de requerirlo. Se seleccionaron los siguientes colores:

- Azul
- Verde claro
- Amarillo
- Coral
- Blanco
- Negro

Las ilustraciones (ver figura 7) creadas por inteligencia artificial fueron importadas al sistema y anexadas a objetos Quad, en donde se ajustó el tamaño y escala para que las imágenes se vieran lo mejor posible. Estas ilustraciones se colocaron en paredes fáciles de observar y cerca del xilófono.



Figura 7. Ilustraciones de animales en una de las paredes

5.8. INTERFAZ

La interfaz (ver figura 8) fue creada en la pared del lado derecho del xilófono. Se decidió utilizar una fuente de color blanco por su buen contraste con los fondos en comparación con el color de fuente negro, además de que el techo ofrecía una sombra en la pared seleccionada, lo que ayudaba a obtener un buen contraste.



Figura 8. Interfaz del sistema, en la pared derecha.

Cada slider cuenta con texto (fuente LiberationSans) el cual menciona claramente la función del slider, y al lado izquierdo se observa su valor actual. Para la escala, se crearon botones con números en su interior, los cuales representan el número de notas de cada escala. Para las paletas de colores, el número representa el ID de la paleta seleccionada actualmente.

Esta interfaz funciona por medio de dos scripts llamados SliderValueHandler.cs y ButtonValueHandler.cs. Estos dos archivos llaman a los deslizadores y botones para poder permitir que los valores de estos puedan ser usados por otras funciones de otros scripts.

Además, también realizan la función de actualizar el texto de la izquierda para reflejar el valor actual, como se puede observar en este fragmento de código:

```
void UpdateSliderText(float sliderValue)
{
    int index = Mathf.RoundToInt(sliderValue);

    // Uso de palabras si las hay (En el caso del timbre)
    if (labels != null && labels.Length > 0 && index >= 0 && index < labels.Length)
    {
        valueText.text = labels[index];
    }
    else
    {
        // Mostrar valor numérico (entero o decimal)
        if (sliderValue % 1 == 0)
            valueText.text = sliderValue.ToString("F0");
        else
            valueText.text = sliderValue.ToString("F1");
    }
}
```

En el caso del sonido (timbre) a utilizar, se realiza un mapeo del número seleccionado por el slider con una lista de labels que contiene los nombres de cada instrumento. En los demás casos, se muestra el valor actual en formato entero o decimal según sea el caso.

5.9. RESULTADO

Una vez realizados los ajustes necesarios y ejecutadas las pruebas necesarias en el sistema, se pueden observar los resultados (ver figura 9):

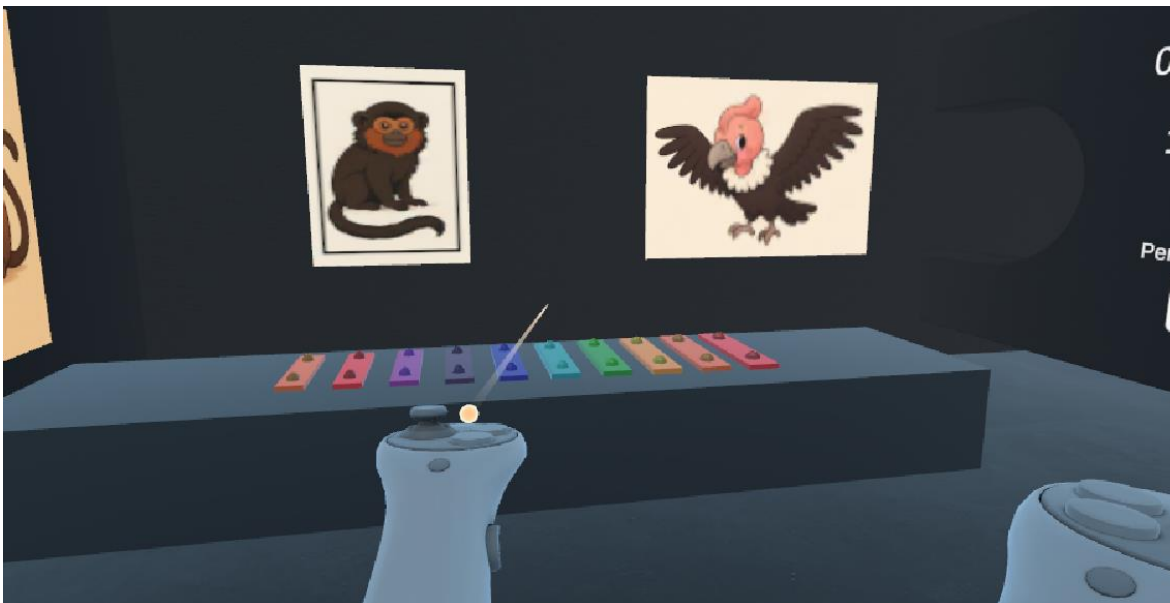


Figura 9. Resultado utilizando simulador de Unity

El sistema nos muestra el entorno, con el xilófono en el centro. Al fondo, se aprecian las ilustraciones de los animales típicos de Colombia. El entorno fue modificado para ser de color negro, y las teclas presentan la paleta #2 de colores fuertes. El sistema está listo para mostrar en el instituto.

5.10. CONSIDERACIONES TECNICAS

Se considera pertinente indicar algunas consideraciones a la hora de querer utilizar el sistema y probarlo tanto en una computadora como en el equipo de realidad virtual Meta Quest 2:

Es importante tener en cuenta que, para compilar el sistema, se necesita tener las librerías de Meta para las gafas, junto con la librería de OpenXR. Estas dos librerías cuentan con opciones de resolución de problemas que orientan al usuario en pasos para tomar en caso de presentarse algún error o de hacer falta algún componente o librería.

Para compilar, nos vamos a “File” y presionamos “Build”. Se selecciona “Android” como sistema para compilar y se presiona el botón (Build). Esto iniciará el proceso de compilación, el cual tomará alrededor de 2 horas la primera vez que se compile, las próximas compilaciones tomarán alrededor de 30 minutos. Una vez la compilación termine, se generará un archivo apk.

Una vez obtenido este archivo, se procede a pasarlo a las gafas e instalarlo. El equipo Meta Quest 2, utiliza el sistema operativo HarmonyOS, basado en Android y propiedad de Meta. Este sistema permite la instalación de apks como cualquier otro sistema operativo para dispositivos móviles. Sin embargo, es importante asegurarse de que el sistema permita la instalación de apks externas.

Si se presentan errores al momento de ejecutar el programa, es importante asegurarse de que las librerías estén instaladas y configuradas correctamente, y que el dispositivo en cuestión sea Meta Quest 2 y no otra versión.

6. PRUEBAS

Periódicamente, el sistema fue probado utilizando el plugin XRDeviceSimulator, el cual permitía realizar pruebas simples en una computadora sin necesidad de tener el equipo de realidad virtual a mano. Esto fue muy útil al momento de probar cambios pequeños y funcionamiento en general sin tener que esperar a tener las gafas disponibles. Se realizaron pruebas unitarias para el funcionamiento de cada función, desde la generación de las teclas hasta la reproducción de sonido.

Cada tecla contaba con el comportamiento esperado, las funciones funcionaban correctamente y el sistema respondía de forma individual.

Se hizo una prueba de integración para verificar que todas las funciones funcionaran en conjunto al momento de utilizar la aplicación. Por medio del plugin XRDeviceSimulator, fue posible utilizar la aplicación por medio de una computadora y verificar que el movimiento funcionaba, la interfaz del sistema cambiaba el xilófono correctamente, y el sonido se producía en los momentos correctos con la configuración correcta.

Se realizaron pruebas funcionales para garantizar que los requisitos antes pactados fueran cumplidos. La interfaz permitía cambiar las opciones del xilófono relevantes (escala, colores, distancia entre teclas, número de teclas, etc) y ofrecía un alto contraste con la configuración adecuada, además de ofrecer diversos sonidos en buena calidad, por lo que se cumplía con los requisitos de accesibilidad. El xilófono se podía tocar de las dos formas y producía sonido tal cual se esperaba.

Una vez se obtuvo una versión completa del sistema, se hicieron pruebas utilizando las gafas de realidad virtual Meta Quest 3S, disponibles en la sala de simulación en el edificio Guayacanes, en la Pontificia Universidad Javeriana Cali. Esto nos permitió realizar pruebas de una forma más fiel y acercándonos a la experiencia que tendría el usuario final una vez el sistema estuviera listo.

El sistema fue llevado al instituto para su evaluación con el profesor de música. Se realizaron las pruebas únicamente con él, en las que se le mostró el funcionamiento del sistema y todas las características que poseía, incluidas aquellas que se hablaron en la reunión que se tuvo

anteriormente. Estas pruebas fueron realizadas por medio de una computadora, debido a que el equipo de realidad virtual Meta Quest 2 no se encontraba disponible en el momento, razón por la cual tampoco fue posible efectuar pruebas en niños con diversidad sensorial.

El profesor expresó su interés por el sistema y consideró que contenía una gran variedad de herramientas y personalización, junto con los sonidos claros y las opciones de accesibilidad claras. Se realizó una comparación con una aplicación en la que él estaba trabajando, la cual mostraba teclas de xilófono en la pantalla y ofrecía pistas para que los niños tocaran la tecla que aparecía.

Al momento de evaluar la precisión, el profesor expresó la fiel similitud con un xilófono de verdad, los sonidos claros y concisos, y las placas visiblemente agradables.

En cuanto a las correcciones, el profesor enfatizó que las teclas se estaban generando de mayor a menor de izquierda a derecha, cuando en un xilófono de verdad ocurre al revés, además de algunos ajustes a la escala cromática para que tuviera una similitud a la de un xilófono real, como el poner las teclas en una posición similar a los xilófonos reales o a los pianos.

Después de haberle presentado el modelo, el profesor habló sobre un proyecto en el que él había estado trabajando antes, en donde se mostraba un video con placas del xilófono de colores y las notas en texto. La idea de este proyecto era el ayudar a desarrollar habilidades de coordinación y de reacción entre los niños utilizando el xilófono como herramienta. Él nos mencionó que sería muy interesante poder juntar ambas ideas en un solo sistema, pero por cuestiones de tiempo entendió el poco alcance que se contaba para realizar dicho cambio. De todas formas, se mencionó como un posible trabajo futuro, el cual se detallará más adelante.

Como sugerencias para continuar, sugirió corregir el orden de las placas e intentar organizar la escala cromática, o simplemente descartarla en caso de que no se pudiera arreglar, ya que los niños no suelen usar la escala cromática, debido a que la idea es usar melodías simples con pocas teclas para evitar confusiones.

Como instrumento de recolección de datos, se realizó una encuesta al profesor de música, con el objetivo de conocer y registrar de forma detallada su opinión y aspectos importantes

del proyecto, junto con posibles campos de mejora y desarrollo futuro, junto a una breve calificación del proyecto. La encuesta consistió en 4 preguntas abiertas y una pregunta de calificación entre 1 y 5:

1. ¿Qué utilidad le ve al sistema en el proceso terapéutico?
2. ¿Utilizaría el sistema? ¿Porqué?
3. ¿Qué tan sencillo de usar lo ve?
4. ¿Qué mejoras le haría al sistema?
5. Califique el sistema de 1 a 5

El profesor expresó un gran interés y potencial en la herramienta en el desarrollo y refuerzo de habilidades cognitivas, y ofreció algunas mejoras, las cuales se discutieron anteriormente.

6.1. APROBACIÓN ÉTICA

Al involucrar sujetos humanos, la aprobación de todos los procedimientos y protocolos éticos y experimentales fue otorgada por el Comité de Ética de la Investigación del Instituto para Niños Ciegos y Sordos del Valle del Cauca (Comité de Ética de la Investigación INCS) bajo la Solicitud No. INV-2020-007, del 30 de junio de 2020, y realizada de acuerdo con las resoluciones 8430 (1994) y 2378 (2008) del Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia. En el futuro, estas pruebas y ajustes permitirán perfeccionar el sistema ampliando su aplicabilidad a escenarios más diversos.

7. CONCLUSIONES

El presente trabajo de grado mostró la posibilidad de integrar la terapia musical con la realidad virtual en un sistema que pudiera aprovechar lo mejor de dos mundos y ofrecer una alternativa accesible para el fortalecimiento de habilidades cognitivas, motrices, visuales y auditivas. El profesor estuvo muy satisfecho con el resultado del sistema y espera que se pueda ir avanzando más en el futuro, dado que el proyecto tiene un gran potencial, sobre todo por su alta flexibilidad, accesibilidad y uso de tecnología de realidad virtual.

El proyecto contó con diversos desafíos al momento de su creación, sobre todo con el tema del funcionamiento de la herramienta, dado que la realidad virtual es una tecnología muy nueva y los recursos disponibles en internet no son tantos como con otro tipo de sistemas. Si bien este proyecto contó con un uso ocasional de inteligencia artificial, se presentaron diversos problemas de incompatibilidad y alucinaciones al momento de codificar, lo que resultó en algunos contratiempos y necesidades de retroceder para corregir errores. Sin embargo, fue muy útil al momento de generar las imágenes vistas anteriormente.

8. TRABAJO FUTURO

Para el futuro, el profesor nos mencionó diferentes ideas, las cuales pueden ser incorporadas en el sistema.

La primera de ellas consiste en fusionar el proyecto que el había iniciado con el sistema construido. La idea consiste en mostrar una pantalla en frente del xilófono en la que se pueda cargar una imagen o un video y se vayan mostrando teclas del xilófono progresivamente para que el usuario las toque con los controles y siga la secuencia.

También podría funcionar si, en vez de ser un recurso externo, se generaran las teclas y la sucesión desde el propio programa.

La segunda consiste en corregir la posición de las teclas en la escala cromática, para que aparezcan en una configuración similar a la de un xilófono real o un piano, en lugar de estar todas una detrás de la otra. Esto ofrecería una apariencia más fiel a los xilófonos reales y ayudaría a acostumbrarse desde temprano a la forma en la que estos son hechos.

Por último, se pueden reforzar las opciones trabajadas en este documento. Se podrían explorar más sonidos para usar como samples, mejorar el entorno para que sea menos monótono y más sofisticado, agregar una opción para iniciar desde una nota más baja, y explorar otros posibles instrumentos que pudieran ser simulados similar a como se trabajó con este.

Es crucial resaltar, además, la posibilidad de poder hacer pruebas con niños en el rango de edad deseado, y que presenten las condiciones de diversidad objetivo de este sistema para que puedan aprovechar sus beneficios. Si bien no se pudieron hacer pruebas en niños, aún queda pendiente la oportunidad de explorar de una forma más práctica sus beneficios y posibles alcances futuros.

El sistema puede ser expandido para soportar más instrumentos, no solo por medio de archivos de audio, si no también con gráficos y mecánicas nuevas para incrementar el abanico de posibilidades al momento de simular instrumentos y utilizarlos para la terapia musical.

Es posible combinar tecnologías como la inteligencia artificial, la cual puede servir como herramienta de apoyo para una experiencia de usuario más personalizada y para incrementar el alcance del proyecto. Además, gracias a su desarrollo hecho en Android, también podría ser integrado a dispositivos móviles para que sea aún más accesible a todo público.

9. REFERENCIAS

- [1] “Estimaciones de la necesidad de rehabilitación,” OPS/OMS | Organización Panamericana De La Salud. Accedido: 5 de febrero de 2025. [Online]. Disponible en: <https://www.paho.org/es/enlace/estimaciones-necesidad-rehabilitacion>
- [2] E. B. Kenneth, Musicoterapia Métodos y prácticas. México D.F., México: Pax México. 2007, pp 9 – 19
- [3] E. Gordon. "music". Encyclopedia Britannica, May. 2025. Accedido: 1 de junio de 2025. [Online]. Disponible en: <https://www.britannica.com/art/music>
- [4] “Understanding Octave in music: What It Is and How It Works”. Music Pandit. Accedido: 25 de octubre de 2025. [Online]. Disponible en: <https://www.musicpandit.com/resources/articles/octave/>
- [5] “Revision of the Hornbostel-Sachs Classification of Musical Instruments by the MIMO Consortium,” 2011. Accedido: 3 junio de 2025. [Online]. Disponible en: <http://www.mimointernational.com/documents/hornbostel%20sachs.pdf>
- [6] L. J. Ausburn and F. B. Ausburn, “Desktop Virtual Reality: a powerful new technology for teaching and research in industrial teacher education”. Journal of Industrial Teacher Education, vol. 41, no. 4, pp. 1–16, Ene. 2004. Accedido: 5 de febrero de 2025. [Online]. Disponible en: <http://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ753111.pdf>
- [7] Meinhold, R. ‘Virtual Reality’, Salem Press Encyclopedia of Science [Preprint]. 2024. Accedido: 3 de junio de 2025. [Online]. Disponible en: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=sso&db=ers&AN=89250621&lang=es&site=eds-live&scope=site>.
- [8] A. A. Navarro-Newball, “Realidades expandidas inteligentes para la innovación en la cultura digital”. Periferica, no. 24, Ene. 2023, doi: 10.25267/periferica.2023.i24.12.

- [9] “Convención sobre los derechos de las personas con discapacidad”. Organización de las Naciones Unidas (ONU). 2007. Accedido: 27 de febrero de 2025. [Online]. Disponible en: <https://www.un.org/esa/socdev/enable/documents/tccconvs.pdf>
- [10] Sustainability Directory, “Sensory Accessibility → Term,” Sustainability Directory, F20, 2025. Accedido: 12 de junio de 2025. [Online]. Disponible en: <https://sustainability.directory.com/term/sensory-accessibility/>
- [11] G. Restrepo et al., “Extended realities for sensorially diverse children,” IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 44, no. 4, pp. 26–39, Jul. 2024, doi: 10.1109/mcg.2024.3419699.
- [12] L. A. S. De Ramón, A. F. F. Martínez, A. R. G. Carricondo, F. E. Gálvez, and R. A. Rodríguez, “Effect of virtual reality and music therapy on anxiety and perioperative pain in surgical extraction of impacted third molars”. The Journal of the American Dental Association, vol. 154, no. 3, pp. 206–214, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.adaj.2022.11.008.
- [13] A. Komaini, H. Andika, S. G. Handayani, R. Effendi, L. Angelia, and I. Ilham, “The Role of Virtual Reality in Enhancing Motor Skills in Children: A Systematic review,” Retos, vol. 58, pp. 214–219, Jun. 2024, doi: 10.47197/retos.v58.104735.
- [14] Kalongo TSHISWAKA, S. and Pinheiro, S.L. (2020) ‘Effect of music on reducing anxiety in children during dental treatment’, RGO: Revista Gaúcha de Odontologia, 68, pp. 1–8. doi:10.1590/1981-863720200003320190049
- [15] “Xylophone”. Sketchfab. [Online]. Disponible en: <https://sketchfab.com/3d-models/xylophone-bcd98f7499a046fa99510ce473134bde>
- [16] Sample Focus. [Online]. Disponible en: <https://samplefocus.com/>
- [17] Freesound. [Online]. Disponible en: <https://freesound.org/>