



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

[VIGILADA MINEDUCACIÓN Res. 12220 de 2016]

APP MÓVIL VR PARA LA REHABILITACIÓN VESTIBULAR

Nicole Ruiz Quintero

Director: Andres Adolfo Navarro Newball

Asesor: Luis Fernando Rincón Renza

*Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero/a
Biomédico/a*

Facultad de Ingeniería y Ciencias
Programa de Ingeniería Biomédica
Cali, Colombia

Contenido

Título:	5
Resumen ejecutivo	5
1. Fase de Análisis	5
1.1. Planteamiento del problema	5
1.2. Justificación	8
1.3. Objetivos	9
1.4. Estado del arte	9
1.5. Análisis biomecánico de los movimientos cefálicos	14
1.6. Funcionamiento de sensor IMU en celular	19
1.7. Requisitos del diseño	20
1.8. Restricciones del diseño	21
1.9. Contribución del proyecto a la formación en ingeniería	22
1.10. Metodología	22
1.11. Plan de trabajo (Cronograma o cómo se gestiona el proyecto)	24
2. Fase de Síntesis	26
2.1. Diseño conceptual	26
2.2. Generación de alternativas	32
2.3. Selección de la solución preliminar	33
2.4. Bocetos	35
2.5. Construcción de un prototipo inicial	36
2.6. Evolución del prototipo hacia la versión final	43
3. Fase de Evaluación (planeada)	51
3.1. Plan pruebas o validación	51
3.2. Resultados de pruebas o validación	51

3.3. Análisis de resultados	54
3.4. Indicadores de éxito	57
3.5. Prototipo final testado	60
3.6. Descripción de los siguientes pasos de avance en la tecnología	68
3.7. Trabajo Futuro	70
3.8. Anexos	71
4. Declaración de uso de Inteligencia Artificial	84

Título:

Título Corto: APP VESTIBULAR

Programa: Ingeniería Biomédica

Autores: Nicole Ruiz Quintero

Director(a): Andres Adolfo Navarro Newball

Resumen ejecutivo

El presente proyecto de grado tiene como objetivo el desarrollo un aplicativo terapéutico utilizando gafas de realidad virtual (VR) tipo cardboard, orientado al tratamiento de pacientes con disfunción vestibular periférica. La importancia de esta propuesta radica en la necesidad de mejorar el acceso y la eficacia de la terapia vestibular, especialmente para personas en contextos de bajos recursos o con dificultades de movilidad, ya que las tecnologías actuales, como Oculus Rift, HTC Vive, presentan limitaciones económicas debido a su precio elevado. La problemática que aborda este proyecto se centra en la falta de dispositivos accesibles que realicen una terapia para el trastorno vestibular periférico en condiciones que dificulten el acceso a la salud. Como objetivo general, se propuso diseñar e implementar un prototipo de software de aplicación móvil para gafas VR tipo cardboard que permitieran generar entornos terapéuticos interactivos. Entre los objetivos específicos se incluyeron la revisión de literatura científica, la integración de componentes software gráficos, y la validación preliminar del dispositivo con un profesional de salud especializado en el tema.

1. Fase de Análisis

1.1. Planteamiento del problema

El sistema vestibular es fundamental para el mantenimiento del equilibrio y la orientación espacial en los seres humanos. Cuando este sistema se ve afectado, como ocurre en los

trastornos vestibulares periféricos, los pacientes pueden experimentar síntomas debilitantes como vértigo, mareo e inestabilidad postural, lo que impacta de forma significativa su calidad de vida [2]. La terapia vestibular ha demostrado ser una intervención efectiva para la rehabilitación de estos síntomas, ya que promueve la adaptación del sistema nervioso central a partir de la información proveniente del sistema vestibular periférico, mediante ejercicios físicos estructurados que favorecen la compensación y la recuperación funcional[13].

En los últimos años, la tecnología ha comenzado a desempeñar un papel crucial en el fortalecimiento de las terapias de rehabilitación, destacándose el uso de la realidad virtual (VR) como una herramienta innovadora [14]. Diferentes estudios han evidenciado que la terapia vestibular mediante realidad virtual (VR) ha demostrado ser efectiva para mejorar la estabilidad postural y reducir síntomas de disfunción vestibular[6] como se puede evidenciar en la Fig 1 la eficacia de la terapia tiende a aumentar conforme se incrementan el tiempo total de intervención y el número de sesiones realizadas.

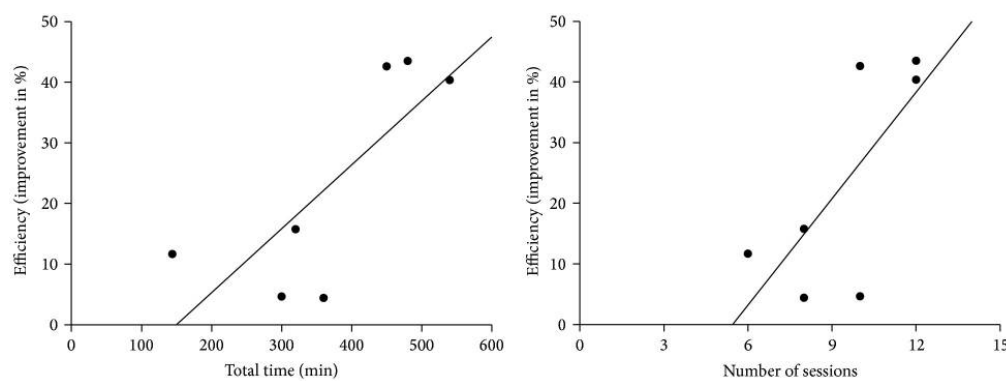


Figura 1: Eficacia de la rehabilitación vestibular en VR [6]

Estos resultados sugieren que la adherencia y la constancia durante el proceso terapéutico son factores relevantes para obtener mejores resultados. En este sentido, la realidad virtual representa una herramienta con potencial para apoyar la rehabilitación vestibular, al permitir la repetición controlada de ejercicios y favorecer la participación activa del paciente.

No obstante, a pesar de su efectividad, las soluciones disponibles en el mercado, como Oculus Rift o HTC Vive, presentan importantes limitaciones en el contexto clínico, principalmente debido a su elevado costo y a la necesidad de equipos de cómputo de alto rendimiento, lo que incrementa la inversión inicial. Esta barrera económica dificulta su

adopción en entornos de atención primaria y en poblaciones de bajos recursos o con acceso limitado a servicios de salud, limitando así el alcance potencial de estas tecnologías [18]. Asimismo, estas tecnologías requieren infraestructura tecnológica especializada, lo que las convierte en soluciones poco viables en contextos domiciliarios o en lugares de acceso limitado.

Adicionalmente, la mayoría de estas plataformas comerciales no están diseñadas para la personalización dinámica de estímulos en tiempo real, lo que limita la capacidad de adaptar la terapia al progreso individual de cada paciente y reduce su eficacia en programas de rehabilitación prolongados. Esta limitación afecta directamente la adherencia al tratamiento y la efectividad clínica de las intervenciones basadas en VR.

Este panorama se ve reforzado por el metaanálisis realizado por Hazzaa [8], donde se evidencia que los programas de rehabilitación vestibular basados en realidad virtual presentan resultados significativamente más altos en comparación con los métodos tradicionales, especialmente en parámetros como la estabilidad postural (posturografía), la percepción del mareo (DHI) y la satisfacción del paciente (VAS). Sin embargo, un aspecto importante identificado en este estudio es que ninguno de los dispositivos evaluados en los ensayos clínicos incluía experiencias inmersivas de bajo costo, lo que evidencia un vacío en el desarrollo de soluciones accesibles y adaptadas a contextos reales de uso.

En este sentido, se identifica la necesidad de desarrollar soluciones tecnológicas accesibles, funcionales y adaptadas a un contexto real. El uso de dispositivos móviles con sensores integrados, como el giroscopio y el acelerómetro, representa una alternativa viable para implementar sistemas de seguimiento del movimiento cefálico (head tracking) basados en IMU. Esta alternativa permitiría desarrollar soluciones portátiles, escalables y de bajo costo, con potencial de implementación tanto en entornos domiciliarios.

Frente a este panorama, surge la necesidad de desarrollar una aplicación móvil especializada, compatible con gafas VR tipo cardboard de bajo costo, que permita el monitoreo del movimiento de la cabeza en tiempo real y la generación de entornos terapéuticos interactivos. Esta solución no solo facilitaría el acceso a terapias vestibulares de alta calidad, sino que también permitiría la personalización dinámica de los estímulos visuales según la respuesta del paciente, mejorando la adherencia y efectividad del tratamiento.

Este enfoque representa una oportunidad para facilitar el acceso a terapias vestibulares de alta calidad, aprovechando los recursos disponibles y ampliando la cobertura de atención. Además, se alinea con los principios de equidad y salud del desarrollo sostenible,

contribuyendo al bienestar integral de las comunidades más vulnerables [9].

Por lo tanto, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo desarrollar una aplicación móvil de realidad virtual inmersiva, diseñada para su uso con gafas VR tipo cardboard, que aproveche el giroscopio y el acelerómetro integrados en el dispositivo móvil para permitir el monitoreo del head tracking basado en IMU, pertinente para la terapia vestibular y garantizar un costo accesible y una implementación viable en contextos domiciliarios?

1.2. Justificación

La disfunción vestibular periférica es una condición que afecta significativamente la calidad de vida de los pacientes. Entre 2021 y 2022 se identificaron 22.776 casos [20], y en el RIPS se reportaron 66.025 casos de síndrome vertiginoso, donde alrededor de 44.254 son identificados como periféricos[26]; este se caracteriza por síntomas como mareo, inestabilidad y dificultad para mantener el equilibrio [9]. La terapia vestibular ha demostrado ser efectiva en la rehabilitación de estos síntomas [7], y el uso de realidad virtual (VR) ha potenciado sus beneficios al ofrecer entornos controlados y repetibles para el entrenamiento sensoriomotor [8]. No obstante, los dispositivos de VR disponibles en el mercado, como Oculus Rift o HTC Vive, presentan un costo elevado que dificulta su adquisición y limita su uso en contextos clínicos, especialmente en poblaciones de bajos recursos o en zonas rurales. Esta barrera económica restringe el acceso a terapias de rehabilitación vestibular basadas en VR, reduciendo su alcance y el potencial beneficio para los pacientes que más lo necesitan. Este proyecto busca dar respuesta a esta problemática mediante el desarrollo de una aplicación móvil con integración de realidad virtual inmersiva, diseñada para su uso con gafas VR tipo cardboard y equipada con un sistema de head tracking basado en IMU, utilizando el giroscopio y el acelerómetro del dispositivo móvil para detectar en tiempo real los movimientos de la cabeza. La propuesta permitirá generar y adaptar estímulos visuales dinámicamente, incrementando el impacto terapéutico y facilitando su implementación en contextos clínicos y domiciliarios. Además de su relevancia tecnológica, el proyecto se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente con el ODS 3: Salud y bienestar, al contribuir al acceso a terapias innovadoras que mejoren la calidad de vida de los pacientes; y con el ODS 10: Reducción de las desigualdades, al fomentar soluciones accesibles para poblaciones vulnerables o con limitaciones geográficas

y económicas [10].

1.3. Objetivos

Objetivo general: Desarrollar una aplicación móvil de realidad virtual inmersiva, diseñada para su uso con gafas VR tipo cardboard, que integre el giroscopio y el acelerómetro del dispositivo móvil para garantizar un monitoreo de head tracking basado en IMU. La aplicación deberá permitir la interacción dinámica con estímulos visuales y estar orientada a superar barreras económicas y de movilidad, ofreciendo una solución de bajo costo y con potencial de implementación en entornos domiciliarios.

Objetivos específicos:

- Analizar la información disponible en la literatura científica sobre las terapias vestibulares existentes y el uso de gafas de realidad virtual como apoyo en el tratamiento de personas con disfunción del sistema vestibular periférico
- Diseñar un prototipo del sistema terapéutico, empleando componentes de hardware previamente existentes e integrando el software necesario para el monitoreo del movimiento de la cabeza y la generación de estímulos visuales en un entorno inmersivo.
- Validar la funcionalidad y pertinencia terapéutica del dispositivo mediante la evaluación experta de un médico especialista en terapias vestibulares, quien analizará el desempeño del sistema a través de simulaciones del entorno virtual en PC, valorando la coherencia de los ejercicios y la adecuación de los estímulos generados.

1.4. Estado del arte

El análisis del estado del arte en el contexto de la rehabilitación vestibular mediante tecnologías de realidad virtual (VR) requiere, en primer lugar, comprender los fundamentos fisiológicos de el trastorno vestibular, así como las soluciones terapéuticas existentes y las tecnologías actualmente disponibles para su tratamiento.

El trastorno vestibular se clasifica topográficamente en dos tipos: periférico y central. Ambos afectan al sistema vestibular, pero se diferencian en su localización y origen. En el caso del trastorno vestibular periférico, las alteraciones se presentan desde las estructuras del oído interno hasta la porción vestibular del octavo par craneal (nervio vestibulococlear).

Por otro lado, el trastorno vestibular central se manifiesta cuando existe una lesión o disfunción en las estructuras del sistema vestibular ubicadas en el tronco encefálico y sus conexiones con otras regiones del sistema nervioso central [2].

Para comprender el origen del vértigo y otros síntomas asociados, es necesario considerar la organización del sistema vestibular. El sistema periférico, ubicado en el oído interno, está conformado por tres canales semicirculares que detectan movimientos rotacionales de la cabeza, y por los órganos otolíticos (utrículo y sáculo), encargados de percibir aceleraciones lineales y cambios de inclinación. Estas estructuras contienen células ciliadas sensoriales que transforman estímulos mecánicos en señales nerviosas, las cuales son transmitidas al sistema nervioso central a través del nervio vestibulococlear[2].

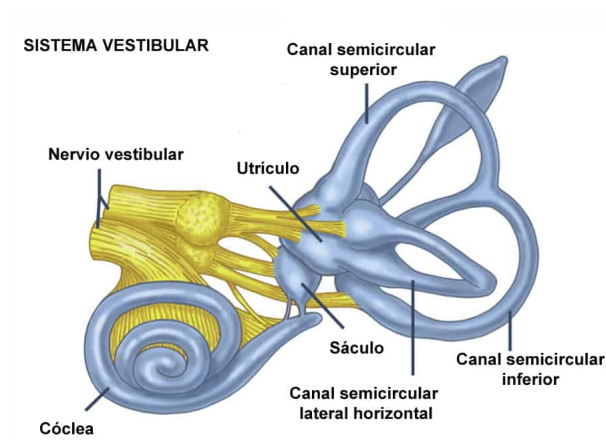


Figura 2: Sistema vestibular periférico [21]

Mientras que en el sistema central, esta información es procesada en los núcleos vestibulares del tronco encefálico y distribuida hacia el cerebelo, los núcleos oculomotores, la médula espinal y la corteza cerebral, permitiendo la integración sensorial necesaria para el equilibrio y la orientación espacial [23].

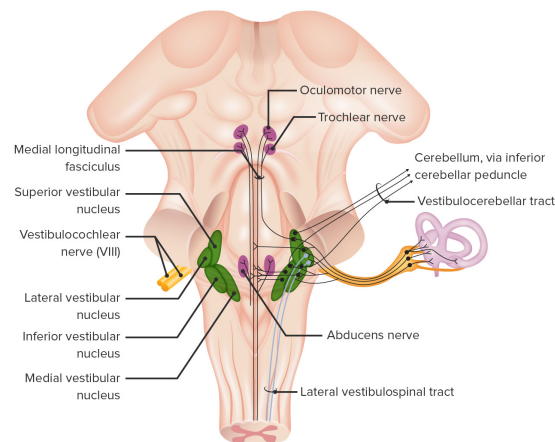


Figura 3: Sistema vestibular central [22]

El vértigo, como síntoma cardinal del trastorno vestibular, se produce cuando existe una alteración en el procesamiento de esta información, generando un desequilibrio entre los sistemas vestibular, visual y propioceptivo. Clínicamente, puede identificarse mediante pruebas como la maniobra de Dix-Hallpike o el head impulse test, y suele acompañarse de signos como nistagmo, náuseas e inestabilidad postural [11].

En cuanto a las soluciones terapéuticas existentes, la rehabilitación vestibular ha evolucionado a partir de los ejercicios propuestos por Cawthorne y Cooksey, los cuales buscan promover la adaptación del sistema nervioso mediante movimientos controlados de la cabeza, ojos y cuerpo. Actualmente, se encuentran ejercicios orientados a estimular distintos mecanismos de compensación sensorial y motora [3]. Entre ellos se encuentran los ejercicios de dependencia visual, los cuales emplean estímulos visuales dinámicos o conflictivos durante movimientos cefálicos y cambios posturales, con el objetivo de reducir la dependencia excesiva de la visión y favorecer el uso de otras vías sensoriales relacionadas con el equilibrio [28].

Asimismo, se encuentran los ejercicios de adaptación, enfocados en mejorar la estabilidad visual durante el movimiento de la cabeza mediante el entrenamiento del reflejo vestibulo-ocular (VOR). Finalmente, los ejercicios de equilibrio y marcha buscan fortalecer la estabilidad postural y la coordinación motora a través de actividades realizadas en diferentes superficies y condiciones de desplazamiento [28].

En los últimos años, el avance tecnológico ha permitido integrar la realidad virtual (VR) como herramienta terapéutica en la rehabilitación vestibular, generando entornos inmer-

sivos y controlados que facilitan la repetición de estímulos y el seguimiento del paciente. Diversos estudios han explorado la aplicación de VR en este campo, desarrollando sistemas con distintos niveles de inmersión: no inmersiva, semi-inmersiva y totalmente inmersiva.

La VR no-inmersiva se basa en el uso de pantallas normales, como monitores o proyectores, donde el paciente puede realizar el ejercicio sin perder la percepción del entorno real, algunos sistemas incorporan consolas como la Nintendo Wii Fit, estas han demostrado ser efectivas al momento de integrar una plataforma de fuerzas ya que ayuda a mejorar la estabilidad postural, al integrar ejercicios con peso y equilibrio. Sin embargo cabe destacar que esta modalidad presenta limitaciones en torno a la interacción con el espacio virtual [24].

Por otro lado, la VR semi-inmersiva permite una mayor integración del paciente en el entorno virtual mediante el uso de proyecciones 3D, y seguimiento del movimiento de cabeza. Estas tecnologías está basada en plataformas de proyectores de corto alcance y sensores de movimiento como Microsoft Kinect , que han sido utilizadas para mejorar la respuesta del reflejo vestibulo-ocular. Estas plataformas ofrecen una experiencia un poco más envolvente que la no-inmersiva, pero sin aislar totalmente al paciente de su entorno físico, lo que podemos ver como una ventaja en términos de seguridad [5].

En contraste, la VR totalmente inmersiva utiliza dispositivos como Oculus Rift y HTC Vive para adentrar al paciente en un entorno totalmente virtual. Estas plataformas pueden evaluar la integración sensorial y el control postural en pacientes con trastorno vestibular, analizando su movimiento postural mientras interactúan con escenas dinámicas. En específico en el artículo “An Oculus Platform to Measure Sensory Integration for Postural Control in Patients with Vestibular Dysfunction”, utilizan los dispositivos VR anteriormente mencionados, con una plataforma de fuerzas donde exponen a los pacientes a situaciones de vértigo simuladas, registrando sus respuestas y adaptaciones musculares. De manera similar, otros trabajos han utilizado sistemas como la *Balance Rehabilitation Unit (BRU™)*, una unidad de rehabilitación del equilibrio que combina estímulos visuales, vestibulares y propioceptivos mediante realidad virtual y posturografía dinámica, mostrando mejoras en síntomas de mareo, estabilidad postural y calidad de vida en pacientes con enfermedad de Ménière [29].

A pesar de las ventajas que ofrece la realidad virtual inmersiva en los procesos de rehabilitación, diferentes estudios han reportado la presencia de efectos adversos asociados al uso prolongado o inadecuado de estos entornos, especialmente el cibermareo o *cybersick-*

ness [27]. Este fenómeno afecta con mayor frecuencia a poblaciones vulnerables, como adultos mayores, personas con alteraciones neurológicas o pacientes en procesos de rehabilitación posterior a un accidente cerebrovascular; sin embargo, también puede presentarse en individuos sanos durante experiencias inmersivas.

El cibermareo se produce principalmente debido a la disonancia sensorial, es decir, una incongruencia entre la información visual percibida y las señales registradas por el sistema vestibular y propioceptivo del cuerpo. En estos casos, el usuario observa movimiento dentro del entorno virtual mientras el cuerpo permanece estático o experimenta movimientos diferentes a los esperados fisiológicamente, generando síntomas como mareo, náuseas, desorientación visual, fatiga y malestar general [27].

Debido a esto, el cibermareo representa un aspecto crítico en el diseño de aplicaciones terapéuticas basadas en realidad virtual, particularmente en sistemas orientados a rehabilitación vestibular. Por esta razón, la literatura recomienda que los entornos virtuales cuenten con una navegación clara, estímulos visuales controlados y configuraciones adaptables según las necesidades del usuario. Asimismo, se sugiere incorporar niveles progresivos de intensidad, velocidades moderadas de movimiento y mecanismos de personalización que permitan reducir la sobrecarga sensorial y favorecer una mayor adaptación y adherencia al tratamiento [27].

Sin embargo, a pesar de los beneficios terapéuticos, estas soluciones también presentan limitaciones importantes asociadas tanto a la accesibilidad tecnológica como a la experiencia de uso. Además del riesgo de cibermareo presente en algunos entornos inmersivos, muchas de las aplicaciones existentes requieren dispositivos especializados y equipos de cómputo de alto rendimiento, lo que dificulta su implementación en contextos de bajos recursos o en entornos domiciliarios.

Asimismo, varios sistemas no inmersivos y semiinmersivos no incorporan mecanismos que aprovechen la tecnología ya disponible en dispositivos móviles para el seguimiento del movimiento cefálico. De igual forma, presentan limitaciones relacionadas con la personalización dinámica de los estímulos visuales y la adaptación en tiempo real según el desempeño del usuario, reduciendo así la flexibilidad terapéutica y la capacidad de ajuste progresivo durante la rehabilitación.

En este sentido, el uso de sensores inerciales (IMU), como el giroscopio y el acelerómetro, representa una alternativa tecnológica relevante para implementar sistemas de head tracking sin necesidad de hardware especializado adicional. Por lo tanto, existe una oportu-

tunidad de mejora en las soluciones de terapia vestibular en realidad virtual inmersiva accesible.

1.5. Análisis biomecánico de los movimientos cefálicos

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del movimiento cervical durante la ejecución de ejercicios de rehabilitación, se llevó a cabo un análisis biomecánico en un laboratorio de captura de movimiento. Para ello, se empleó un patrón de colocación de marcadores en puntos anatómicos clave [43], incluyendo frente, barbilla, oreja izquierda, oreja derecha, vértebra cervical C7, región de la espalda baja y tórax.



Figura 4: Patrón de posicionamiento de marcadores

Esta disposición permitió estimar la orientación relativa entre la cabeza y el tronco, facilitando el cálculo de los ángulos cervicales en distintos planos de movimiento. A partir de estos datos, se calcularon ángulos cervicales considerando el ángulo relativo respecto a la postura inicial, siendo este el más representativo para el análisis funcional.

En el caso del movimiento de flexión-extensión cervical, correspondiente al desplazamiento vertical de la cabeza, se observaron amplitudes que alcanzaron valores cercanos a $\pm 45^\circ$, como se evidencia en la Fig 5, lo que representa un rango total aproximado de $\pm 93^\circ$.

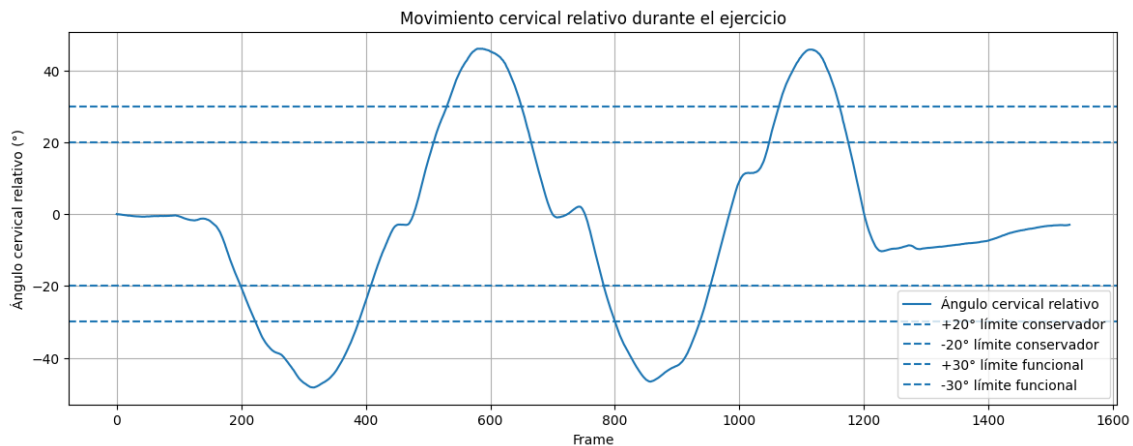


Figura 5: Angulo Cervical Vertical

Estos valores no alcanzan el rango máximo fisiológico reportado en la literatura, donde la flexión cervical puede aproximarse a 80° - 90° y la extensión a 70° [18]. Sin embargo, al compararlos con los rangos funcionales entre 13° y 32° para actividades de la vida diaria [16], se identifica que el movimiento excede los valores típicos y desde el punto de vista ergonómico, el método REBA establece que movimientos cervicales superiores a 20° incrementan el nivel de riesgo biomecánico, alcanzando niveles elevados cuando superan los 45° [17], lo que justifica la necesidad de controlar la amplitud del movimiento durante la terapia.

En cuanto al movimiento de rotación cervical en el plano horizontal los resultados mostraron valores de $-64,66^{\circ}$ y $+64,74^{\circ}$, con un rango total de movimiento de aproximadamente $129,41^{\circ}$, como se puede evidenciar en la Fig 6.

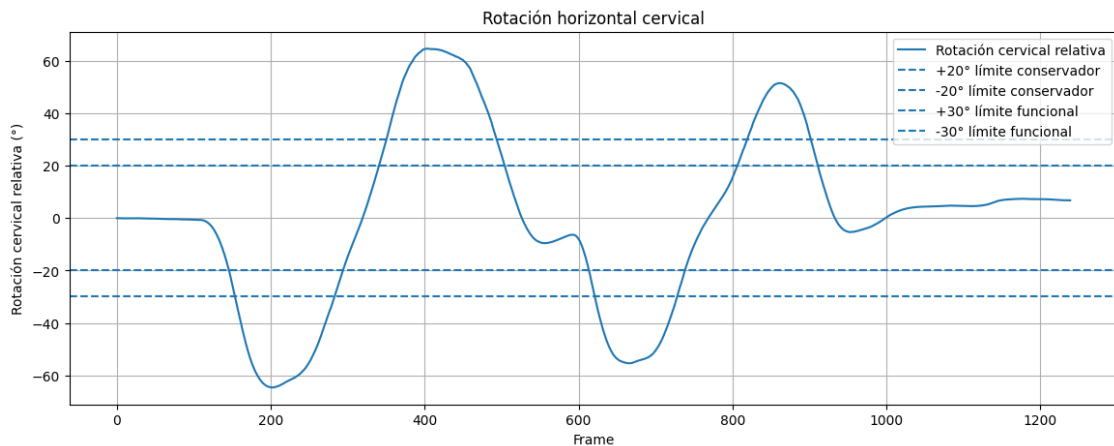


Figura 6: Angulo Cervical Horizontal

Este comportamiento refleja una ejecución amplia del movimiento, coherente con el rango fisiológico de la rotación cervical que se encuentra entre 70° - -90° [42]. No obstante, al compararlo con los valores funcionales reportados para actividades de la vida diaria, que oscilan entre 13° y 57° [16], se evidencia que el movimiento supera estos límites. Asimismo, según los criterios de REBA, aunque no establece rangos angulares específicos para la rotación cervical, pero sí considera la presencia de giro cervical como un factor que incrementa el riesgo postural. [17], lo que sugiere que, aunque es fisiológicamente viable, resulta fundamental implementar un control de los ángulos de movimiento en contextos de rehabilitación, con el fin de garantizar que estos se mantengan dentro de rangos seguros.

Por otro lado, en el análisis del movimiento de agacharse se evaluó la variación del ángulo cervical en función de la interacción entre la cabeza y el tronco durante la ejecución del gesto funcional. En este caso, se obtuvieron valores de ángulo relativo comprendidos entre $-9,59^{\circ}$ y $+15,08^{\circ}$ como se puede evidenciar en la Fig 7, con un rango total de movimiento de $24,68^{\circ}$.

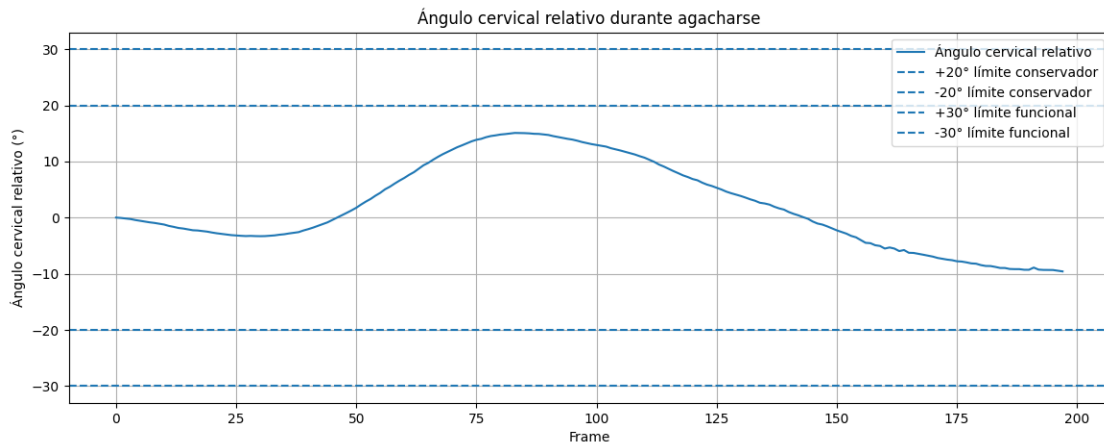


Figura 7: Angulo Cervical

A diferencia de los movimientos aislados de flexión-extensión, este resultado evidencia una amplitud moderada del movimiento cervical, ya que el gesto de agacharse se realiza principalmente mediante la flexión del tronco, mientras que la región cervical acompaña el movimiento con desplazamientos angulares reducidos.

Al comparar estos valores con los rangos reportados para actividades de la vida diaria, se observa que movimientos funcionales como recoger objetos del suelo suelen requerir una amplitud cervical moderada, típicamente entre 13° y 32° [16]. Por lo tanto esto indica que el movimiento registrado en el presente análisis se encuentra dentro del rango funcional esperado, siendo coherente con la naturaleza del gesto evaluado.

Desde la perspectiva del método REBA, el movimiento de agacharse se mantiene dentro del intervalo de 0° a 20° [17], lo que corresponde a un nivel de bajo riesgo biomecánico. Esto refuerza la importancia de mantener el control de los ángulos cervicales durante la ejecución de ejercicios terapéuticos, permitiendo que estos se desarrollen dentro de rangos seguros y adecuados para aplicaciones de rehabilitación vestibular.

Finalmente, se analizó la lateroflexión cervical, correspondiente al movimiento de inclinación lateral de la cabeza hacia la derecha y hacia la izquierda en el plano frontal. Los resultados mostraron valores aproximados entre -41° y 44° , como se evidencia en la Fig. 8.

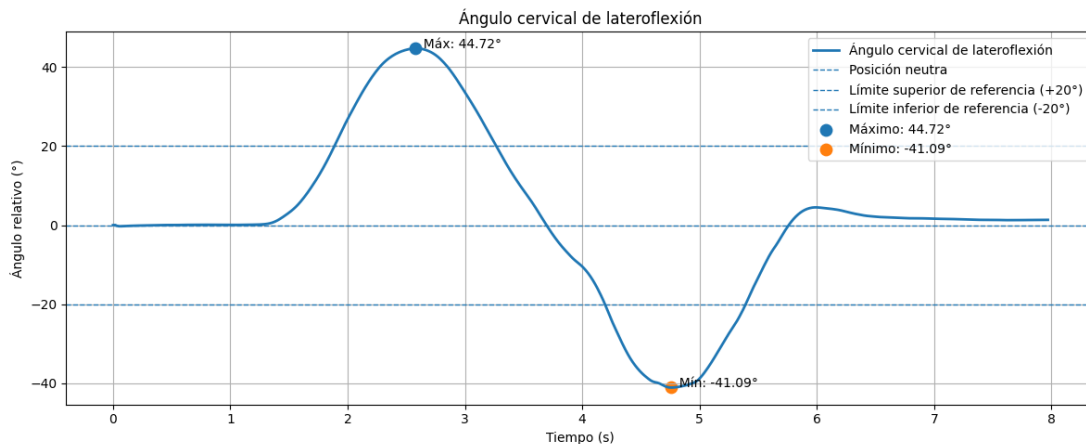


Figura 8: Ángulo cervical durante la lateroflexión

Al comparar estos valores con los rangos funcionales reportados en la literatura, se observa que la lateroflexión cervical se encuentra dentro de un rango esperado, ya que se han descrito valores aproximados entre 20° y 45° [42]. Asimismo, para actividades de la vida diaria se reportan rangos de movimiento cervical entre 13° y 57° [16]. Por lo tanto, el movimiento registrado en el presente análisis se encuentra dentro de los límites funcionales esperados, siendo coherente con la ejecución del gesto evaluado.

Por otro lado, según los criterios del método REBA, aunque no se establecen rangos angulares específicos para la lateroflexión cervical, la inclinación o desviación del cuello se considera un factor que puede incrementar el riesgo postural [17]. Por esta razón, aunque los valores obtenidos se encuentran dentro de un rango funcional, resulta importante controlar la amplitud del movimiento durante la terapia, con el fin de evitar posturas cervicales excesivas y favorecer una ejecución segura dentro del entorno de realidad virtual.

En conjunto, los resultados del análisis evidencian que los movimientos cervicales ejecutados en condiciones no restringidas tienden a superar los rangos funcionales y los límites conservadores establecidos por criterios ergonómicos. Esto resalta la importancia de definir rangos angulares controlados en el diseño de sistemas de rehabilitación, especialmente en entornos de realidad virtual, con el fin de garantizar la seguridad del usuario y evitar sobrecargas en la región cervical.

1.6. Funcionamiento de sensor IMU en celular

La Unidad de Medición Inercial, conocida como IMU, es un sistema de sensores que permite estimar el movimiento y la orientación de un dispositivo. En los teléfonos móviles, esta unidad suele integrar principalmente un acelerómetro y un giroscopio, los cuales trabajan de forma complementaria para detectar los cambios de inclinación y rotación del celular [19].

El acelerómetro mide las aceleraciones lineales del dispositivo en los tres ejes espaciales y permite identificar la inclinación del celular con respecto a la gravedad. Por su parte, el giroscopio mide la velocidad angular, es decir, qué tan rápido rota el dispositivo alrededor de sus ejes. Aunque ambos sensores pueden utilizarse de manera independiente, presentan ciertas limitaciones como que el acelerómetro puede verse afectado por el ruido y los movimientos bruscos, mientras que el giroscopio puede acumular error con el tiempo debido a la deriva o *drift* [19].

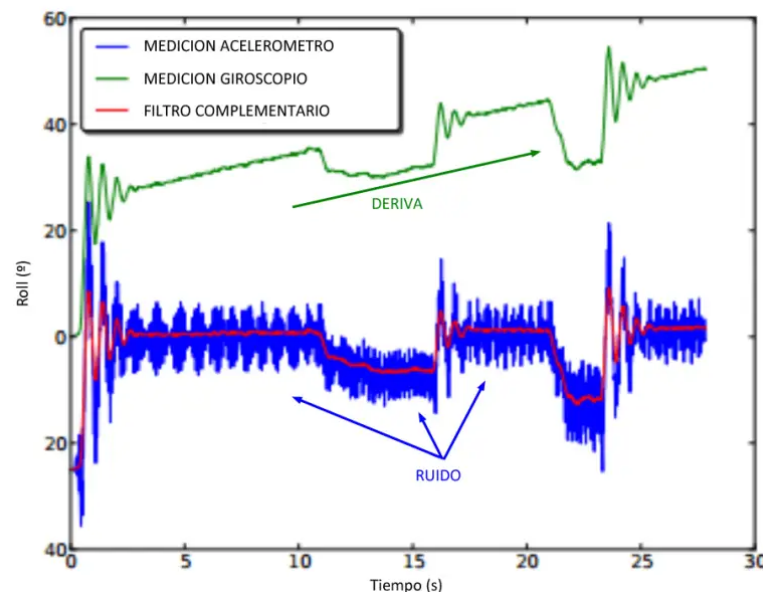


Figura 9: Medición de giroscopio y acelerómetro [19]

La orientación del dispositivo puede describirse mediante tres ángulos principales: *roll*, *pitch* y *yaw*. El *roll* corresponde a la rotación alrededor del eje longitudinal del dispositivo, asociada con la inclinación lateral. El *pitch* representa la rotación alrededor del eje transversal, relacionada con los movimientos de flexión y extensión. Finalmente, el *yaw*

corresponde a la rotación alrededor del eje vertical, asociada con el giro horizontal de la cabeza hacia la derecha o hacia la izquierda.

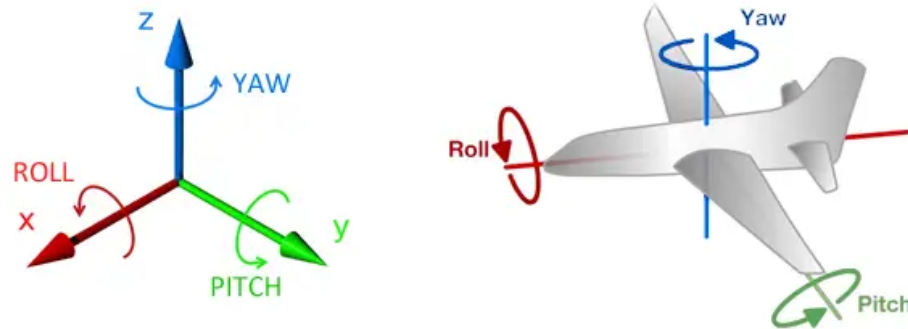


Figura 10: Ejes de rotación [19]

Esta forma de representar la orientación permite relacionar los datos obtenidos por la IMU con los movimientos cefálicos utilizados en los ejercicios de rehabilitación vestibular.

Para obtener una medición más estable de la orientación, los sistemas basados en IMU suelen emplear procesos de filtrado. Estos filtros combinan la respuesta rápida del giroscopio con la del acelerómetro respecto a la gravedad. Entre los métodos más conocidos se encuentra el filtro de Kalman; sin embargo, también se utiliza el filtro complementario, el cual es más sencillo y combina ambas señales asignando mayor peso al giroscopio en movimientos rápidos y mayor peso al acelerómetro en periodos más prolongados. De esta manera, se reduce el ruido del acelerómetro y se compensa la deriva del giroscopio [19].

En el contexto del presente proyecto, el celular se ubica dentro de las gafas de realidad virtual tipo cardboard, por lo que los cambios de orientación del dispositivo representan los movimientos de la cabeza del usuario. De esta forma, la IMU permite realizar el seguimiento cefálico o de head tracking, identificando movimientos como flexión-extensión, rotación e inclinación lateral permitiendo así controlar los ángulos de movimiento.

1.7. Requisitos del diseño

El diseño del prototipo se rigió por criterios de accesibilidad, usabilidad y adaptabilidad terapéutica, considerando las recomendaciones reportadas para aplicaciones terapéuticas basadas en realidad virtual. Uno de los principales aspectos considerados fue la reducción

del cibermareo y la mejora de la experiencia de uso. Por esta razón, se contemplaron escenarios visuales poco saturados, navegación controlada y movimientos suaves, con el fin de disminuir la sobrecarga sensorial y favorecer una experiencia más cómoda y segura para el usuario [27].

En cuanto a los stakeholders, se identificaron como actores principales un médico especialista en rehabilitación vestibular, quien actuó como validador experto del sistema; la estudiante de ingeniería biomédica encargada del desarrollo del prototipo; y los docentes asesores del área tecnológica. Para esta etapa del proyecto no se contempló la participación directa de pacientes o usuarios finales, dado que la validación se realizó mediante simulaciones controladas.

Los requisitos técnicos y funcionales del sistema incluyeron la simulación del head tracking basado en sensores IMU, la representación gráfica de ejercicios vestibulares en entornos virtuales, una interfaz simple e intuitiva para su visualización en dispositivos móviles, controlar los rangos angulares y la posibilidad de análisis del tipo de terapia en un entorno de PC. Asimismo, se consideró el ajuste de parámetros terapéuticos, como la velocidad de los estímulos visuales, junto con condiciones de accesibilidad, usabilidad [30] y principios de ergonomía [31].

1.8. Restricciones del diseño

Restricciones de contexto:

El proyecto presentó limitaciones asociadas al alcance experimental y a las condiciones de validación. En esta etapa, la validación de las terapias se realizó exclusivamente mediante simulación en entorno de PC, aunque el sistema estuvo diseñado para funcionar en dispositivos móviles. Por lo tanto, no se evaluó la interacción directa con pacientes.

Asimismo, el desarrollo se llevó a cabo en un período estimado de diez meses, lo cual limitó la profundidad de implementación y validación del sistema. Las pruebas estuvieron condicionadas a la disponibilidad del médico especialista encargado de evaluar la pertinencia terapéutica del prototipo, lo que pudo restringir la cantidad de iteraciones de validación.

Restricciones de costo:

El presupuesto del proyecto estuvo limitado al uso de recursos institucionales disponibles, lo que restringió la adquisición de equipos especializados o tecnologías de alto costo. En

este sentido, se empleó software académico como *Unity*, *Blender* y *Visual Studio*, así como hardware de bajo costo, específicamente gafas de realidad virtual tipo cardboard. Estas condiciones influyeron directamente en las decisiones de diseño, priorizando soluciones accesibles y de bajo costo sobre alternativas más robustas pero económicamente menos viables.

1.9. Contribución del proyecto a la formación en ingeniería

El desarrollo del presente proyecto permitió aplicar de manera integral conocimientos propios de la ingeniería biomédica, especialmente en áreas como el análisis biomecánico del movimiento cefálico, el desarrollo de software, la simulación en entornos virtuales y la investigación de sensores inerciales (IMU). Asimismo, el diseño de una aplicación de realidad virtual orientada a la rehabilitación vestibular implicó la comprensión de principios fisiológicos, biomecánicos y tecnológicos, fortaleciendo la capacidad de abordar problemas interdisciplinarios en el ámbito de la salud.

El proyecto también fomentó la toma de decisiones bajo restricciones reales de tiempo, costo y recursos, lo que obligó a priorizar soluciones viables, accesibles y eficientes, alineadas con las condiciones del entorno tecnológico. En este sentido, se promovió el desarrollo de habilidades de análisis crítico, selección de tecnologías y optimización de recursos.

Adicionalmente, la interacción con un médico especialista como validador experto permitió integrar criterio médico en el proceso de diseño, favoreciendo un enfoque centrado en el usuario y en la pertinencia terapéutica del sistema. Esto contribuyó al desarrollo de competencias en trabajo interdisciplinario y comunicación efectiva entre áreas de la ingeniería y la salud.

Finalmente, el proyecto fortaleció la capacidad de proponer soluciones innovadoras en el campo de la rehabilitación vestibular, orientadas a mejorar la accesibilidad a tecnologías médicas. Esto se alineó con los principios de la ingeniería aplicada al bienestar social, promoviendo el desarrollo de soluciones tecnológicas.

1.10. Metodología

El desarrollo del presente proyecto se llevó a cabo mediante una metodología estructurada en tres fases principales: análisis, síntesis y evaluación. Este enfoque integró principios del

diseño centrado en el usuario con el enfoque sistemático del diseño en ingeniería, basado en el modelo propuesto por Cross y adaptado del marco híbrido descrito por Cross y Henao et al . [1]. Esta metodología permitió organizar el proceso desde la identificación del problema hasta la validación del prototipo final.

Fase de análisis: En esta fase se realizó la revisión de la literatura científica relacionada con la rehabilitación vestibular y el uso de tecnologías de realidad virtual con la rehabilitación vestibular. Asimismo, se identificaron las necesidades del sistema, las limitaciones de las soluciones existentes y se definieron los requerimientos técnicos y funcionales del prototipo. Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis biomecánico preliminar del movimiento cefálico, con el fin de establecer parámetros de referencia para la implementación de los ejercicios terapéuticos en el entorno virtual. También se incluyó una explicación del funcionamiento de los sensores inerciales tipo IMU, debido a que estos constituyen la base tecnológica que permite estimar la orientación y el movimiento del dispositivo móvil durante la experiencia de realidad virtual.

Fase de síntesis: En esta etapa se desarrolló el diseño conceptual del sistema, definiendo su arquitectura y los módulos principales. Posteriormente, se generaron diferentes alternativas de solución utilizando herramientas como la metodología TRIZ, las cuales fueron evaluadas mediante criterios técnicos, económicos y de viabilidad. A partir de este proceso, se seleccionó la alternativa más adecuada y se procedió al desarrollo de un prototipo inicial, incluyendo la implementación de la aplicación móvil y la construcción del entorno virtual en Unity.

Fase de evaluación: Finalmente, el prototipo fue sometido a un proceso de validación mediante simulación en entorno de PC, con la participación de un médico especialista en rehabilitación vestibular. En esta fase se analizó la pertinencia terapéutica, la funcionalidad del sistema y la coherencia de los ejercicios implementados. Los resultados obtenidos permitieron identificar posibles mejoras y ajustes en el diseño.

1.11. Plan de trabajo (Cronograma o cómo se gestiona el proyecto)

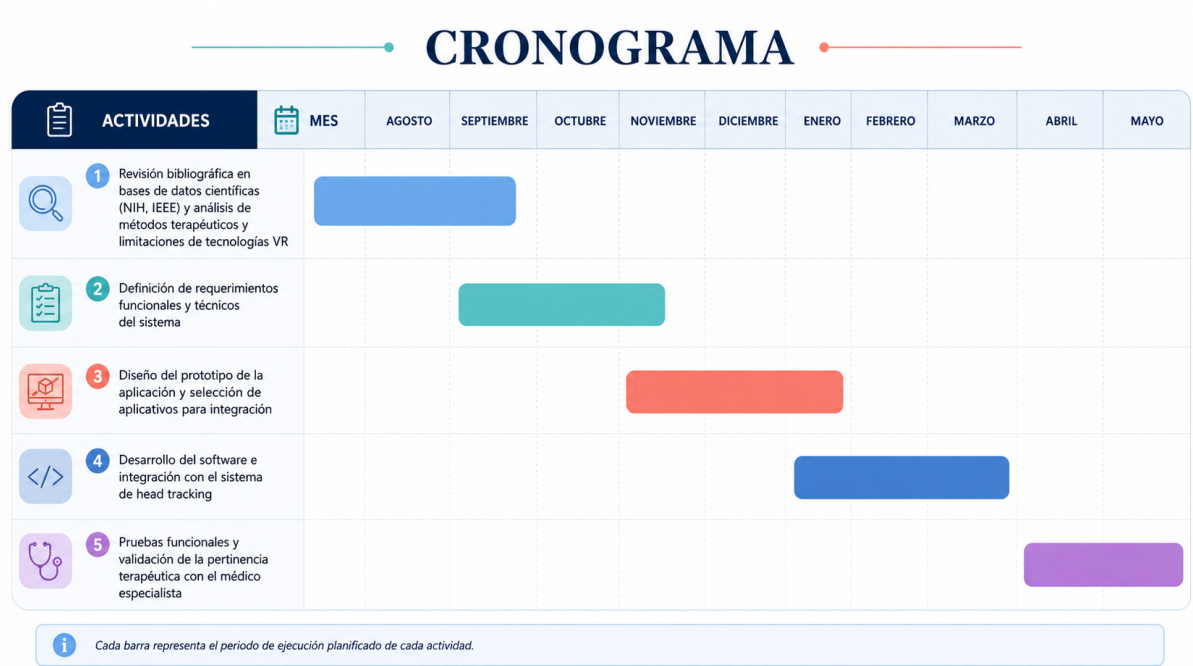


Figura 11: Cronograma de trabajo

Parte 2 - Proyecto de diseño 1

2. Fase de Síntesis

2.1. Diseño conceptual

El sistema propuesto tiene como objetivo principal adaptar ejercicios tradicionales de rehabilitación vestibular a un entorno de realidad virtual, permitiendo su ejecución de manera controlada, interactiva y donde el sistema responde según la ejecución del ejercicio. En este contexto, el sistema no solo busca replicar los ejercicios convencionales, sino también mejorar su seguimiento mediante el uso de tecnologías de medición y retroalimentación.

Desde el diseño conceptual, el prototipo se planteó bajo criterios de accesibilidad, usabilidad y principios de ergonomía. Por esta razón, se consideró una interfaz sencilla, escenarios visuales poco saturados, navegación controlada y movimientos suaves dentro del entorno virtual, con el fin de favorecer una experiencia cómoda y segura para el usuario. Asimismo, se contempló el ajuste de parámetros terapéuticos, como la velocidad de los estímulos visuales, para disminuir la sobrecarga sensorial y reducir el riesgo de cibermareo durante la ejecución de los ejercicios [30, 31]

Los ejercicios seleccionados corresponden a movimientos básicos utilizados en la rehabilitación vestibular, enfocados en la adaptación y habituación del sistema vestibular. En particular, se incluyeron ejercicios de flexión-extensión cervical (movimiento vertical) rotación cervical (movimiento horizontal) e inclinación lateral [25] como se observan en la Fig 12.



Figura 12: Movimientos cervicales [25]

los cuales representan los principales patrones de movimiento cefálico utilizados en protocolos terapéuticos para mejorar la estabilidad y la coordinación viso-vestibular.

Asimismo, se consideraron ejercicios de seguimiento visual en los que el usuario debe seguir un objeto con la mirada sin mover la cabeza, incluyendo desplazamientos de arriba hacia abajo, de izquierda a derecha y en profundidad con el objetivo de trabajar la estabilidad de la mirada y la coordinación ojo-cabeza. [25] como se observa en la Fig 13.



Figura 13: Movimiento Ocular [25]

También se integró un ejercicio funcional de agacharse para recoger un objeto, el cual permite evaluar la interacción entre el movimiento cervical y el desplazamiento del tronco en una actividad de la vida diaria como se observa en la Fig 14.

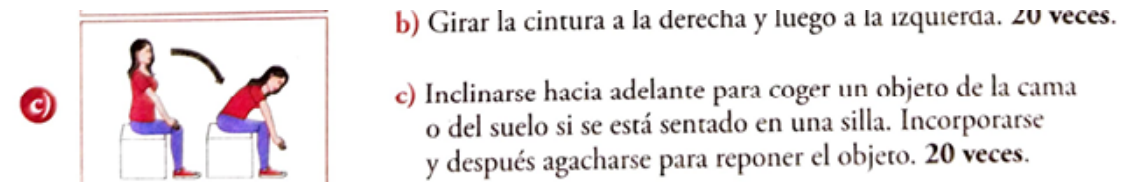


Figura 14: Movimiento de tronco [25]

En conjunto, todos los ejercicios seleccionados se encuentran fundamentados en el protocolo clásico de rehabilitación vestibular de Cawthorne-Cooksey [32].

A partir del análisis biomecánico realizado sobre estos movimientos, se identificó la necesidad de implementar mecanismos que permitan detectar, evaluar y controlar los ángulos de

movimiento en tiempo real, garantizando que estos se mantengan dentro de rangos seguros durante la ejecución de los ejercicios en el entorno virtual.

El sistema se compone de los siguientes módulos funcionales principales:

- **Obtención de orientación:** El dispositivo móvil emplea algoritmos internos de fusión que utiliza la Unidad de Medición Inercial (IMU) integrada en el dispositivo móvil para registrar la orientación de la cabeza del usuario en los tres ejes espaciales. En este proyecto, la aplicación recibe estos datos ya procesados a través de sensores virtuales del sistema operativo.
- **Cálculo de ángulos cervicales:** A partir de la orientación obtenida, se calculan los ángulos de movimiento en los planos de flexión-extensión, rotación e inclinación lateral, tomando como referencia la postura inicial del usuario.
- **Evaluación biomecánica:** Los ángulos calculados se comparan con rangos funcionales y límites ergonómicos definidos a partir de la literatura [16] y el método REBA [17].
- **Límites angulares:** A partir de la evaluación biomecánica, se determinan los límites máximos de movimiento que la persona puede realizar de forma segura para cada articulación analizada.
- **Dentro de límites angulares:** Se determinan que la persona se encuentra dentro de los límites de movimiento que puede realizar de forma segura para cada articulación analizada.
- **Sobrepasa los límites o no realiza el movimiento:** Se determinan que la persona se encuentra fuera de los límites de movimiento que puede realizar de forma segura para cada articulación analizada o que no se encuentra realizando el ejercicio.
- **visualización o sonoro:** Una vez que se cumple el bloque de sobrepasa los límites o no realiza el movimiento, el sistema envía una alarma visual o sonora al nivel en el que se encuentra la persona para que realice correctamente el ejercicio.
- **Interfaz de realidad virtual:** Se desarrolla un entorno virtual interactivo en el dispositivo móvil que permite la ejecución de los ejercicios de rehabilitación. Este incluye un menú principal, selección de nivel y diferentes escenarios o niveles de dificultad, diseñados para guiar al usuario durante la terapia.

- **Visualización:** El entorno está orientado a su uso con dispositivos tipo cardboard, proporcionando una experiencia inmersiva durante la ejecución de los ejercicios. Además se dispone de una interfaz en computador que permite la simulación de los ejercicios dentro del entorno virtual, facilitando el análisis funcional de las terapias por parte del profesional de salud.
- **Registro de datos:** Una vez termina el nivel se almacena información del desempeño del usuario.

La relación entre estos módulos y el funcionamiento general del sistema se puede visualizar en la Fig. 15.

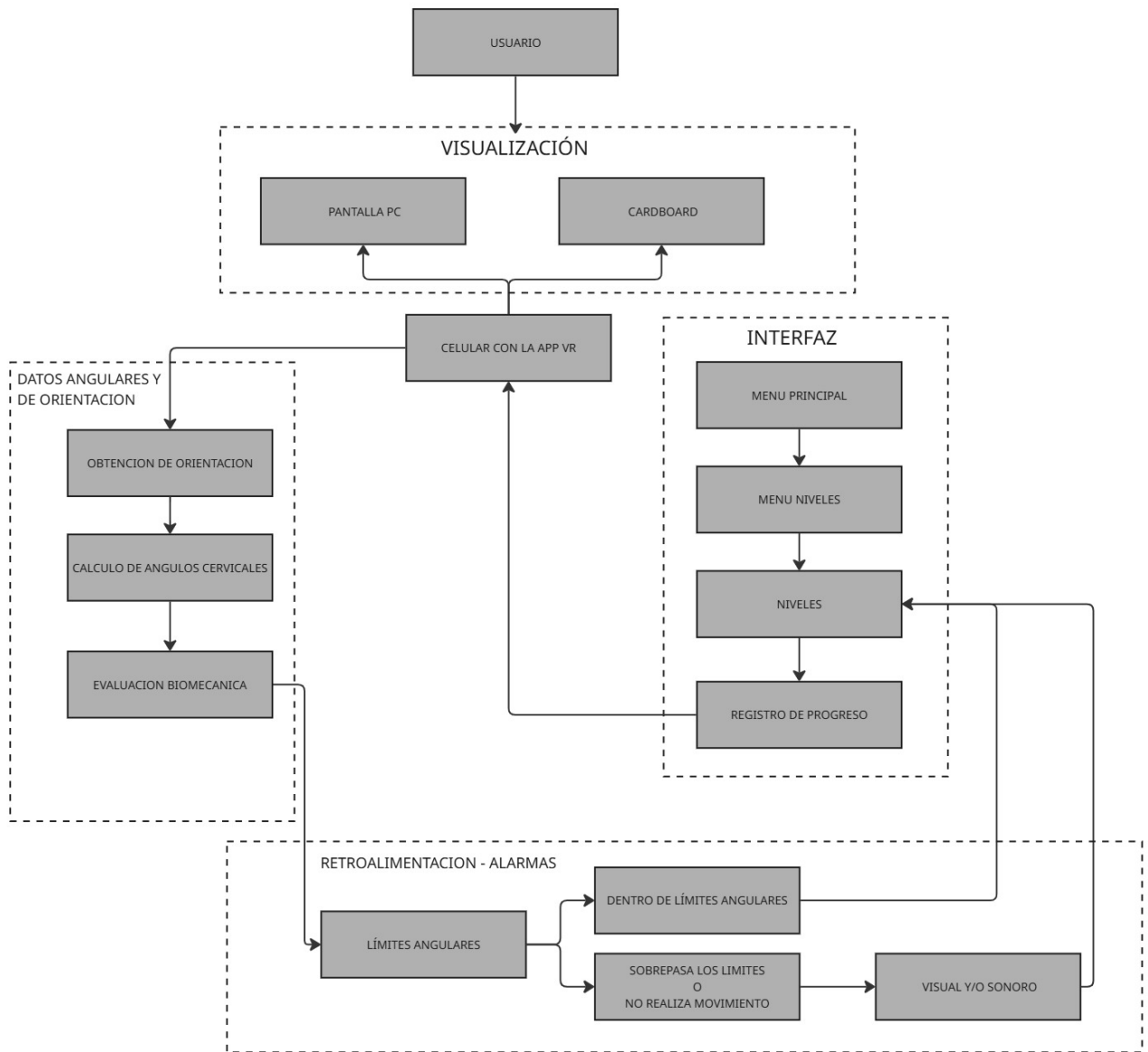


Figura 15: Diagrama de bloques de funcionalidad

Como se observa en la Fig. 15, el sistema inicia con la captación de datos y orientación por medio de la IMU, seguida de el cálculo de los ángulos cervicales, la evaluación de estos en función de criterios biomecánicos, finalmente, la generación de retroalimentación dentro del entorno de realidad virtual y su visualización por medio de la pantalla PC o Cardboard.

2.2. Generación de alternativas

Se llevó a cabo el proceso de generación de alternativas mediante la aplicación de la metodología TRIZ, con el objetivo de resolver la contradicción principal del proyecto, centrada en incrementar la inmersión y la precisión del sistema sin aumentar los costos ni la complejidad técnica. Para ello, se analizaron los principios inventivos de TRIZ y se seleccionaron aquellos pertinentes para el diseño del sistema de rehabilitación en realidad virtual.

A partir de este análisis se formularon cuatro alternativas viables. La Alternativa 1 se fundamentó en el Principio 6: Universalidad, aprovechando exclusivamente las capacidades internas del teléfono móvil, como la IMU integrada, para desarrollar una aplicación de realidad virtual en Unity con visualización mediante un visor tipo Cardboard, manteniendo un diseño simple, económico y compatible con una amplia gama de dispositivos.

La Alternativa 2 se construyó con base en los Principios 1: Segmentación y 15: Dinamismo, proponiendo un seguimiento del movimiento dividido en módulos, con filtros de orientación que se adaptan dinámicamente según el tipo de ejercicio, con el fin de mejorar la precisión sin incorporar hardware adicional.

Por su parte, la Alternativa 3 se diseñó empleando los Principios 6: Universalidad y 32: Cambio del Entorno, utilizando la cámara posterior del dispositivo móvil como sensor auxiliar para corregir el drift de la IMU bajo condiciones específicas, manteniendo una baja carga computacional.

Finalmente, la Alternativa 4 se formuló aplicando los Principios 28: Sustitución Mecánica y 1: Segmentación, mediante la implementación de modelos matemáticos que generan “sensores virtuales” a partir de microgestos segmentados, permitiendo emular la funcionalidad de sensores adicionales sin incrementar el hardware ni los costos.

La validación del prototipo se realizará mediante juicio de experto por parte de un fonaudiólogo especialista en rehabilitación vestibular y terapias apoyadas con realidad virtual. Esta evaluación tendrá como propósito verificar la pertinencia terapéutica, funcionalidad, usabilidad y seguridad preliminar del sistema desarrollado.

Dado que en esta etapa no se realizarán pruebas con pacientes, la validación se llevará a cabo en un entorno controlado mediante la observación directa del funcionamiento del prototipo. El especialista revisará la ejecución de los ejercicios implementados, la coheren-

cia de los estímulos visuales, la navegación dentro de la aplicación y la relación entre los movimientos cefálicos propuestos y los objetivos de la rehabilitación vestibular.

Descripción	Principios TRIZ	Justificación
IMU interna + card-board	P6: Universalidad	Se aprovechó la multifuncionalidad del móvil para evitar hardware adicional y reducir complejidad.
Seguimiento segmentado con filtros dinámicos	P1: Segmentación, P15: Dinamismo	Se divide el seguimiento en módulos y los filtros se ajustan según el tipo de movimiento.
Estabilización con cámara usando análisis visual mínimo	P6: Universalidad, P32: Cambio del entorno	Se reutiliza la cámara como sensor auxiliar y la corrección se activa sólo en condiciones inestables.
Sensores virtuales mediante modelos matemáticos	P28: Sustitución mecánica, P1: Segmentación	Se sustituye hardware físico con algoritmos y se segmentan los movimientos para mejorar la estimación.

Cuadro 1: Alternativas TRIZ

2.3. Selección de la solución preliminar

Con el fin de seleccionar la alternativa más adecuada para el desarrollo del sistema, se empleó un método de ponderación multicriterio, el cual permite comparar diferentes soluciones a partir de criterios técnicos y de viabilidad previamente definidos.

Los criterios considerados en la evaluación fueron: precisión del seguimiento, nivel de inmersión, costo de implementación, complejidad técnica y compatibilidad con dispositivos móviles. Estos criterios fueron ponderados en 30 %, 20 %, 20 %, 20 % y 10 %, respectivamente, de acuerdo con su importancia relativa dentro del contexto del proyecto.

Cada alternativa fue evaluada en una escala de 1 a 5, donde 1 representa un bajo desem-

peño y 5 un alto desempeño. Posteriormente, las calificaciones obtenidas fueron multiplicadas por los pesos asignados, permitiendo calcular un puntaje total ponderado para cada alternativa. Este procedimiento facilitó una comparación cuantitativa objetiva entre las soluciones propuestas.

Los resultados de la evaluación se presentan en la Tabla 2.

Alt.	Prec. (30 %)	Inm. (20 %)	Costo (20 %)	Compl. (20 %)	Comp. (10 %)	Total
A1	3	3	5	5	5	4.00
A2	4	3	4	3	4	3.60
A3	4	4	3	2	3	3.30
A4	4	3	5	2	4	3.60

Cuadro 2: Evaluación de alternativas

A partir del análisis de los resultados, se observa que la Alternativa 1 obtuvo el mayor puntaje (4.00), destacándose por su simplicidad técnica, bajo costo de implementación y alta compatibilidad con dispositivos móviles de gama media.

Aunque las Alternativas 2 y 4 presentan mejoras en términos de precisión mediante el uso de segmentación, filtros dinámicos o sensores virtuales, su mayor complejidad técnica disminuye su viabilidad para una implementación práctica. Por su parte, la Alternativa 3 mejora la estabilidad del sistema al incorporar la cámara como sensor auxiliar; sin embargo, esto implica un mayor consumo computacional, lo cual afecta su desempeño en dispositivos de menor capacidad.

En consecuencia, la Alternativa 1 fue seleccionada como la solución preliminar para el desarrollo del prototipo, ya que ofrece el mejor equilibrio entre desempeño, costo y factibilidad técnica. Esta elección resulta coherente con el objetivo del proyecto, orientado a desarrollar una solución accesible, eficiente y aplicable en entornos de rehabilitación vestibular basados en realidad virtual.

2.4. Bocetos

Una vez seleccionada la alternativa preliminar, se procedió a la elaboración de bocetos iniciales con el objetivo de definir la estructura general de la aplicación y su flujo de interacción. Estos bocetos permitieron representar de manera visual la disposición de los elementos de la interfaz, la navegación entre pantallas y la organización de los módulos funcionales del sistema.

En particular, se diseñaron bocetos correspondientes al menú principal, la selección de niveles y la escena de ejecución de los ejercicios, incluyendo anotaciones que describen la funcionalidad de cada componente. Estos esquemas facilitaron la comprensión del comportamiento esperado del sistema y sirvieron como base para la construcción del mockup inicial.

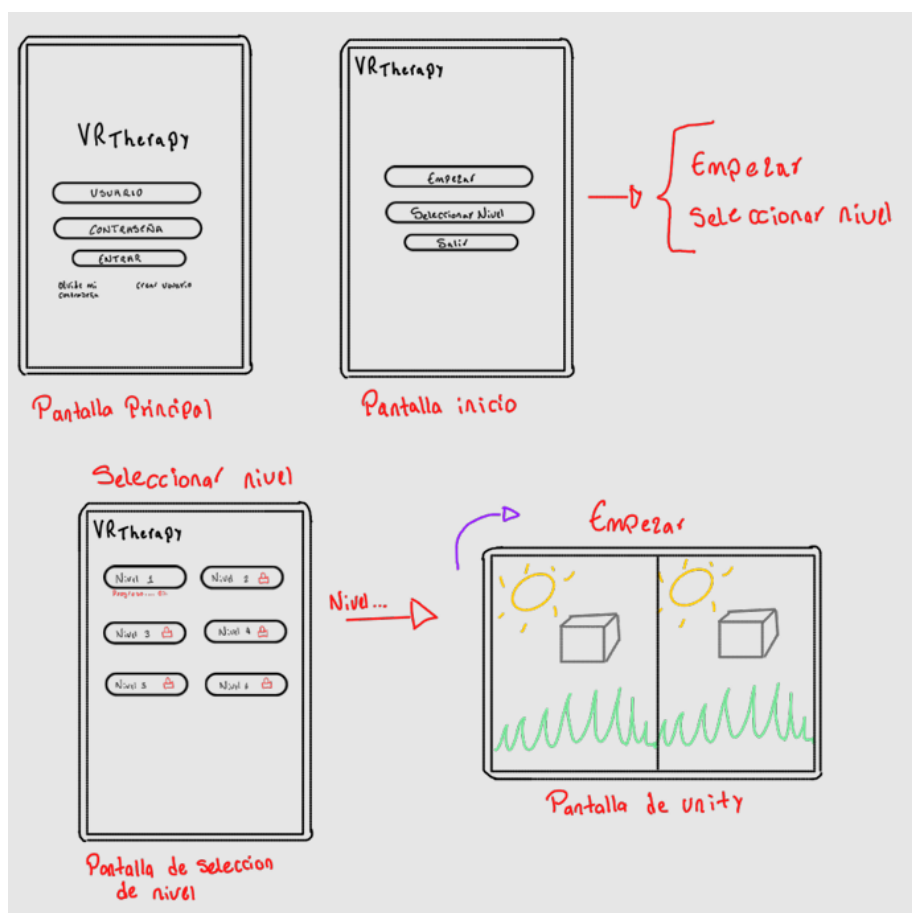


Figura 16: Bocetos de la aplicación

Los bocetos realizados se presentan en la Figura 16, donde se evidencia la estructura preliminar de la aplicación y la interacción entre los distintos módulos.

Posteriormente, a partir de estos bocetos, se desarrolló un mockup digital mediante la plataforma web Figma, y con Canva se incorporó el diseño en la imagen de un dispositivo móvil que permitió visualizar con mayor detalle la interfaz del usuario y validar aspectos relacionados con la usabilidad y la navegación entre pantallas. Este mockup se utilizó como guía directa para la implementación de la primera versión funcional de la aplicación móvil como se presenta en la figura 17.



Figura 17: Mockup de la aplicación

2.5. Construcción de un prototipo inicial

Con base en el diseño conceptual seleccionado, se desarrolló un primer prototipo funcional del sistema, orientado a validar las funciones de control del menú y su entorno virtual. Dado que el sistema propuesto es de naturaleza software, el prototipo se enfocó en la implementación de la aplicación móvil y del entorno inmersivo, utilizando herramientas de desarrollo como Android Studio, Unity y un escenario desarrollado en blender.

En una primera etapa, se realizó una aproximación inicial mediante la implementación de la interfaz móvil en Android Studio, junto con el desarrollo independiente de una escena básica en Unity como se puede observar en la figura 18.

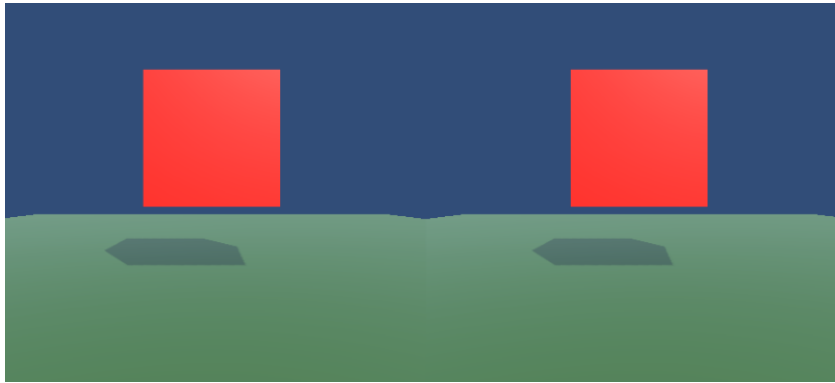


Figura 18: Escena de Unity

Esta fase permitió validar aspectos preliminares como la navegación entre pantallas, la estructura del menú y la visualización de un entorno 2D y 3D básico. La implementación inicial de la aplicación móvil se presenta en la Figura 19, donde se observa en 2D el menú principal y la selección de niveles.

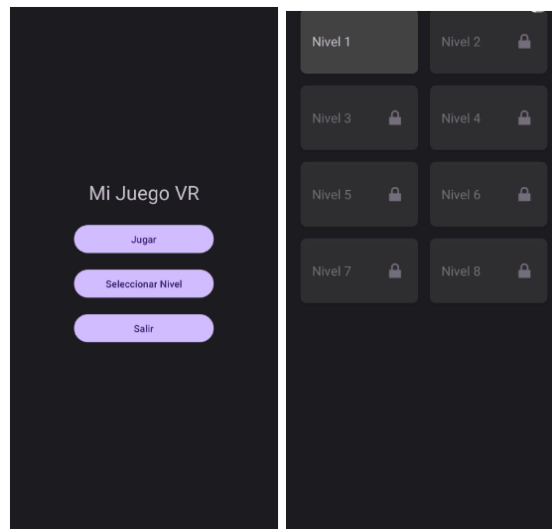


Figura 19: Menu y menu niveles de Android Studio

Sin embargo, durante estas pruebas iniciales se identificaron limitaciones asociadas a la separación entre la aplicación móvil y el entorno de realidad virtual Unity, particularmente en la integración de funcionalidades y la sincronización de datos, por lo que se optó por unificar el desarrollo del sistema en la plataforma Unity, eliminando el desarrollo en Android Studio, con el fin de aprovechar las capacidades para integrar la interfaz de usuario, la lógica de la aplicación y el entorno inmersivo en un único entorno de desarrollo. Esta

decisión permitió simplificar la arquitectura del sistema y mejorar la conexión entre los distintos módulos.

A partir de esta elección, se desarrolló una versión integrada del prototipo en Unity, incorporando 2 escenas modeladas en Blender, como se muestra en la figura 20.



Figura 20: Escenas de Blender completa

Para la construcción de los escenarios en Blender, se siguió un proceso estructurado que permitió modelar entornos simples y funcionales adecuados para su integración en Unity. Inicialmente, se definió el entorno base mediante la creación de primitivas básicas, como planos y cubos, con el fin de establecer la estructura general del escenario, incluyendo suelo y paredes como se muestra en la Figura 21.

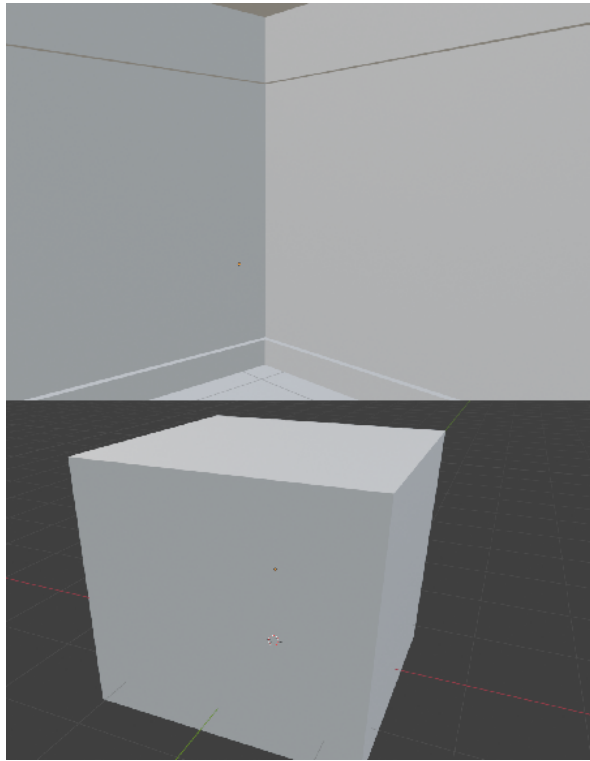


Figura 21: Escena de Blender solo plano y cubo

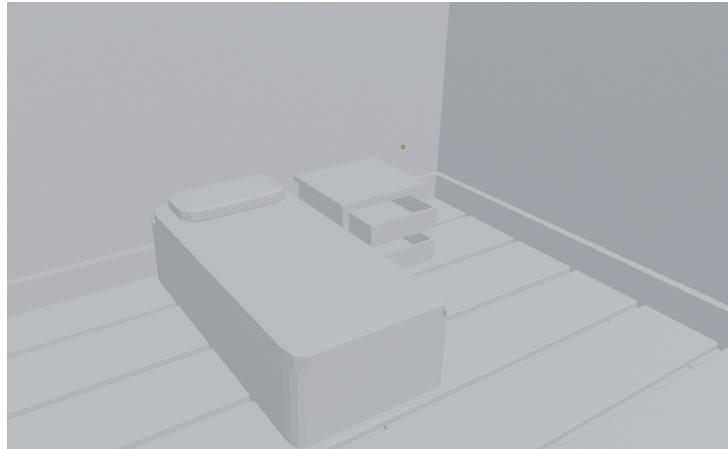
Posteriormente, se llevó a cabo el modelado de los elementos principales del entorno, tales como la camilla, mesas y escritorio e muestra en la Figura ?? .



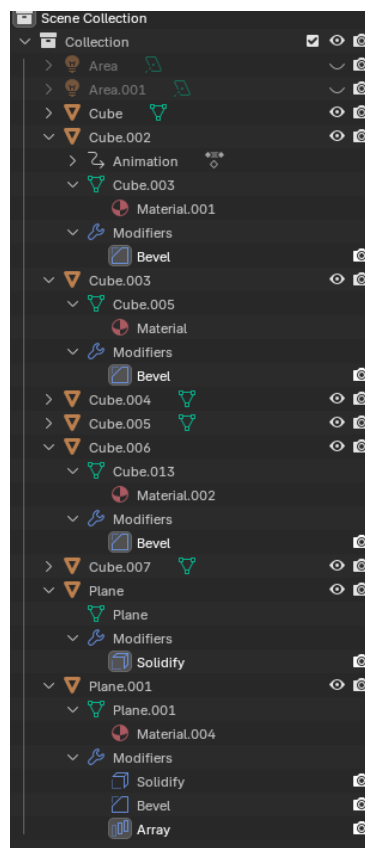
Figura 22: Escena de Blender con elementos

Para el desarrollo de estos elementos, se emplearon modificadores propios de Blender, tales como Bevel, Solidify y Array, los cuales permitieron ajustar la geometría de los objetos. En

particular, Bevel se utilizó para suavizar aristas, Solidify para añadir grosor a superficies, y Array para generar repeticiones de elementos dentro del entorno.



(a) Escena del entorno modelado.



(b) Modificadores aplicados en Blender.

Figura 23: Escenario desarrollado en Blender y configuración de modificadores.

Una vez creados los objetos, se procedió a su organización dentro del espacio tridimensional, considerando proporciones y distribución para simular un entorno coherente y funcional. Seguidamente, colores básicos a las superficies con el propósito de entender que es cada elemento, dando así una claridad visual.

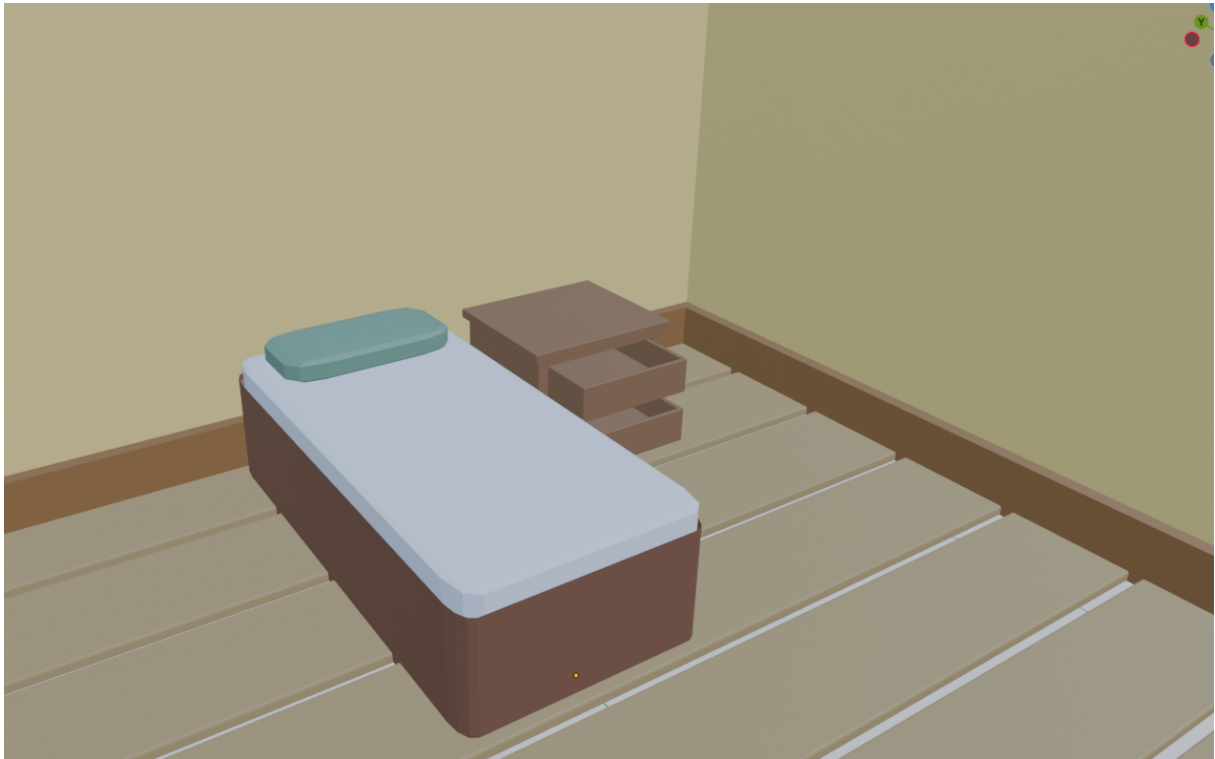


Figura 24: Escena de Blender con elementos

Asimismo, al momento de crear los modelos se tuvo como objetivo mantener una baja complejidad geométrica low poly [44], con el objetivo de garantizar un rendimiento adecuado en dispositivos móviles y entornos de realidad virtual. Posteriormente. Finalmente, los escenarios fueron exportados en un formato como .FBX, para su posterior integración en Unity.

Esta implementación representa la versión más completa alcanzada en esta etapa del proyecto, ya que integra el menú principal, la selección de niveles y una escena básica de realidad virtual con configuración de cámara tipo Cardboard. Esto permite ofrecer una experiencia inmersiva en dispositivos móviles y validar el funcionamiento general del sistema.

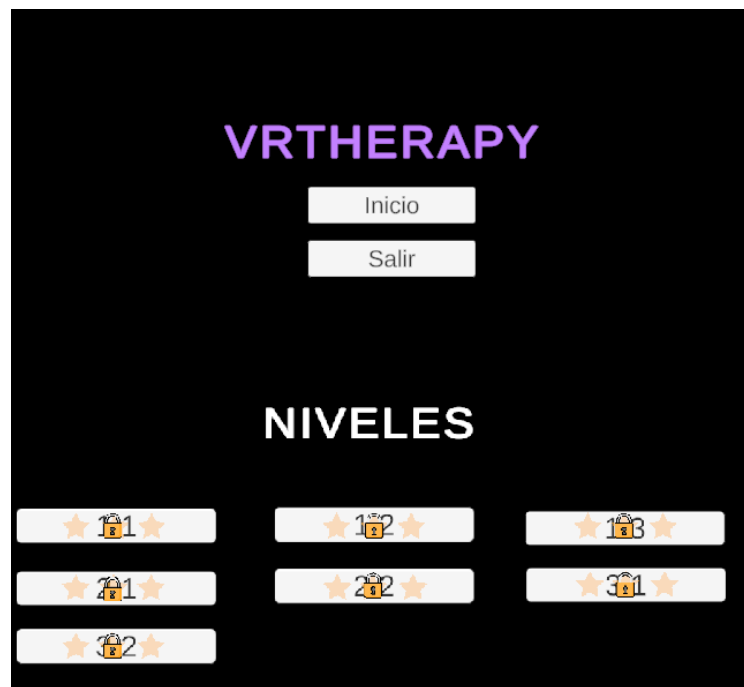


Figura 25: Menú principal y selección de niveles

En la Figura 25 se observa el menú principal de la aplicación junto con la pantalla de selección de niveles. Estas interfaces permiten al usuario navegar de manera intuitiva entre las distintas opciones disponibles, facilitando el acceso a los diferentes ejercicios propuestos según su progreso.

Adicionalmente, el sistema incorpora mecanismos de interacción que permiten seleccionar niveles, visualizar el estado de desbloqueo. Todo esto contribuye a una estructura organizada del flujo de navegación, mejorando la usabilidad de la aplicación. La lógica de funcionamiento de estos menús, así como la gestión del estado de los niveles, se muestra en los anexos 44, 45.

Por otra parte, en la Figura 26 se presenta la escena desarrollada en Unity, donde se muestra un entorno tridimensional básico con elementos interactivos para la ejecución de los ejercicios. Esta escena permitió comprobar la correcta configuración del entorno virtual, la ubicación de los objetos y el comportamiento visual dentro del sistema.



Figura 26: Escena tridimensional desarrollada en Unity

Las pruebas realizadas evidenciaron un funcionamiento adecuado en términos de visualización, estabilidad del entorno virtual y navegación funcional de la aplicación. No obstante, en esta versión inicial aún no se encontraba implementado el seguimiento del movimiento cefálico mediante los sensores IMU del dispositivo móvil. En particular, el componente de head tracking en tiempo real.

En conjunto, este prototipo constituyó una primera aproximación funcional del sistema, ya que permitió validar aspectos clave del diseño, identificar limitaciones técnicas y definir mejoras orientadas a su implementación completa.

2.6. Evolución del prototipo hacia la versión final

Después de la construcción del prototipo inicial, se realizó una etapa de mejora orientada a integrar y mejorar las funcionalidades principales del sistema. En la primera versión se habían validado aspectos básicos como la navegación entre pantallas, la estructura del menú, la visualización del entorno virtual y la configuración inicial de la cámara tipo Cardboard. Sin embargo, algunas funciones centrales, como el seguimiento cefálico mediante la orientación del dispositivo móvil, aún se encontraban en desarrollo.

Durante esta etapa de mejora se integró el uso de la orientación del dispositivo móvil para representar los movimientos cefálicos del usuario dentro del entorno virtual. Para ello, se utilizó el plugin XR Google Cardboard [38], el cual permitió configurar una cámara de

realidad virtual compatible con visores tipo Cardboard. Esta cámara emplea internamente los sensores inerciales del celular, como el giroscopio y el acelerómetro, cuyos datos son procesados mediante algoritmos de fusión sensorial para estimar la orientación del dispositivo en el espacio.

A partir de esta estimación, Unity proporciona la rotación de la cámara, la cual puede expresarse en términos de ángulos de Euler, específicamente *yaw*, *pitch* y *roll*. Estos corresponden a los movimientos de giro horizontal, inclinación vertical y rotación lateral de la cabeza, respectivamente. Para acceder a estos valores, se utilizó el comando `vrCamera.eulerAngles`, que permite obtener los ángulos en los ejes x , y y z , asociados a cada uno de estos movimientos.

Estos ángulos fueron empleados como base para el seguimiento cefálico dentro de la aplicación, permitiendo que la visualización se actualice en función de la orientación del dispositivo móvil y logrando así una interacción más natural e inmersiva en el entorno virtual.

Para los ejercicios de cabeza fija con seguimiento visual vertical, horizontal y en profundidad, se implementaron códigos independientes, cuyas representaciones lógicas se presentan en los Anexos 34, 35 y 36, respectivamente. En cada código se define el objeto visual que debe desplazarse dentro del entorno virtual y se configura su movimiento.

Durante la ejecución, el usuario debe mantener la cabeza en posición neutra mientras realiza el seguimiento del estímulo únicamente con la mirada. Para verificar esta condición, el sistema monitorea los valores de pitch, yaw y roll obtenidos a partir de la orientación del dispositivo móvil, comprobando que estos permanezcan dentro de un rango cercano a cero.

Adicionalmente, se incorporó un sistema de dificultad progresiva basado en la tolerancia al movimiento cefálico. A medida que aumenta el número de repeticiones, el rango permitido de movimiento de la cabeza disminuye, exigiendo mayor control postural por parte del usuario. De esta manera, se busca garantizar que el movimiento realizado corresponda principalmente al seguimiento ocular del estímulo visual, evitando movimientos cefálicos compensatorios durante la actividad.

Posteriormente, se implementaron los ejercicios de movimiento cervical, correspondientes a flexión-extensión, inclinación lateral, rotación y agacharse. Para estos cuatro ejercicios se utilizó una lógica de tipo *aim shooter*, representada en el Anexo 38, la cual permite que el usuario apunte hacia diferentes objetivos ubicados en el entorno virtual mediante el

movimiento de la cabeza. Cuando el sistema detecta que el objetivo está siendo apuntado correctamente, este se marca internamente como alcanzado y se contabiliza como una repetición cumplida, como también detecta cuando la persona no apunta y muestra una alerta pidiendo que apunte al objetivo.

En el ejercicio de flexión-extensión cervical, el código controla el movimiento del objeto dentro de los límites establecidos en el eje Y, ubicando el estímulo en posiciones superiores e inferiores. De esta forma, el usuario debe mover la cabeza hacia arriba y hacia abajo, movimiento asociado principalmente al ángulo pitch.

En el ejercicio de inclinación lateral cervical, los objetivos se localizan hacia los lados del entorno virtual, en dirección contraria al movimiento que debe realizar el usuario. Una vez el usuario apunta al objetivo, el sistema indica la dirección hacia la cual debe inclinar la cabeza. Posteriormente, el usuario debe regresar a la posición neutra y volver a apuntar al objetivo para completar la repetición. Este ejercicio permite trabajar el movimiento de inclinación lateral derecha e izquierda, asociado principalmente con el ángulo roll.

En el ejercicio de rotación cervical, los objetivos se distribuyen hacia los laterales del entorno virtual. El usuario debe girar la cabeza hacia la derecha o hacia la izquierda para apuntar al objeto y apagar la luz correspondiente. Una vez completada la acción, debe regresar a la posición central antes de continuar con la siguiente repetición. Este ejercicio permite trabajar el movimiento de rotación cervical y se relaciona principalmente con el ángulo yaw.

En el ejercicio de agacharse, el objeto se ubica en el piso del entorno virtual. Para recogerlo, el usuario debe inclinar la mirada hacia abajo y acercarse ligeramente al objetivo hasta apuntarlo correctamente. Después de recoger el objeto, debe regresar a la posición central y posteriormente volver a agacharse para dejarlo en la zona señalada. Este ejercicio permite representar un movimiento funcional asociado principalmente con la flexión del tronco y el acompañamiento del movimiento cervical, relacionado principalmente con la variación del ángulo pitch.

A su vez, en los niveles que involucran movimiento cervical se definió el componente Head Angle Limit Manager que se encuentra en el 33, encargado de controlar los ángulos permitidos para cada nivel de ejercicio. Este componente permite establecer un límite angular según el valor configurado y muestra un mensaje de advertencia cuando el usuario se encuentra fuera del rango permitido. De esta manera, el sistema busca promover una ejecución más segura y controlada de los movimientos cervicales durante la terapia.

Adicionalmente, durante la ejecución del ejercicio, el usuario puede visualizar el número de repetición en el que se encuentra, lo que facilita el seguimiento de la actividad y permite conocer su progreso dentro del nivel. También se definió un sistema de estrellas como mecanismo de evaluación del desempeño del usuario. Este sistema asigna una calificación de acuerdo con el número de repeticiones realizadas correctamente, de manera que el usuario debe alcanzar una cantidad específica de repeticiones válidas para obtener las tres estrellas.

Asimismo, se estableció un criterio mínimo de avance entre niveles. Para continuar al siguiente nivel, el usuario debe completar un número mínimo de repeticiones válidas. En caso de no cumplir con este requisito, el sistema reinicia el nivel actual y no permite avanzar hasta que el usuario alcance el desempeño mínimo esperado. De esta manera, se favorece la repetición controlada de la actividad y se refuerza la correcta ejecución del ejercicio. Por el contrario, si el usuario cumple con el mínimo establecido, el sistema permite avanzar automáticamente al siguiente nivel.

El sistema de estrellas y el criterio de avance permiten reforzar la ejecución correcta de los ejercicios, promover la repetición controlada y ofrecer una retroalimentación simple sobre el desempeño del usuario dentro del entorno virtual. Además, la lógica implementada permite guiar la ejecución de los ejercicios cervicales y registrar el cumplimiento de cada repetición a partir de la interacción del usuario con los objetivos del entorno virtual.

El criterio seleccionado para definir el número de repeticiones por nivel se basó en la guía de ejercicios de rehabilitación vestibular [25], la cual recomienda realizar 20 repeticiones para este tipo de actividades terapéuticas. Por esta razón, cada nivel fue configurado con un total de 20 repeticiones, con el fin de mantener coherencia con la referencia utilizada.

Con el fin de adaptar la actividad a distintos tipos de usuarios, se integró en el menú principal una opción para modificar la dificultad del nivel. Esta configuración permite ajustar la velocidad con la que aparece el objeto dentro del entorno virtual y el tiempo en el que este se desvanece, ajustando en 3 niveles, fácil, normal y difícil. De esta manera, el sistema puede ofrecer una experiencia más flexible, permitiendo iniciar con una dificultad menor y aumentar según la exigencia del ejercicio, su desempeño o las necesidades del usuario.

Para determinar el avance entre niveles, se definió un criterio de cumplimiento basado en el porcentaje de repeticiones válidas realizadas por el usuario. Se estableció como requisito mínimo completar 16 repeticiones válidas de 20 posibles, lo que corresponde al 80% de

cumplimiento. Este valor se consideró adecuado porque permite verificar que el usuario ejecutó correctamente la mayor parte del ejercicio, manteniendo un margen de error del 20 % asociado a posibles fallos de interacción, pérdida momentánea del objetivo o pequeñas desviaciones del movimiento cefálico.

De esta manera, el sistema no exige una ejecución perfecta para permitir el avance, pero sí garantiza que el usuario haya alcanzado un desempeño mínimo suficiente antes de pasar al siguiente nivel.

$$\text{Porcentaje de cumplimiento} = \frac{\text{Repeticiones válidas}}{\text{Repeticiones totales}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Porcentaje de cumplimiento} = \frac{16}{20} \times 100 = 80\% \quad (2)$$

Cuadro 3: Criterio de desempeño para el avance entre niveles

Repeticiones válidas	Porcentaje de cumplimiento	Resultado en el sistema	Interpretación
0-10	0 % - 50 %	Reinicia el nivel	Desempeño insuficiente. El usuario debe repetir el ejercicio para mejorar la ejecución del movimiento.
11-15	55 % - 75 %	Reinicia el nivel	Desempeño parcial. Aunque el usuario realiza varias repeticiones, no alcanza el mínimo necesario para avanzar.
16-18	80 % - 90 %	Avanza al siguiente nivel	Desempeño adecuado. El usuario cumple el mínimo requerido para continuar con el siguiente nivel.

Repeticiones válidas	Porcentaje de cumplimiento	Resultado en el sistema	Interpretación
19-20	95 % – 100 %	Avanza al siguiente nivel	Desempeño alto. El usuario completa la mayoría o la totalidad del ejercicio con mayor precisión.

Asimismo, este criterio se relaciona con el sistema de estrellas implementado en la aplicación, el cual permite brindar una retroalimentación simple sobre el desempeño alcanzado al finalizar cada nivel. La asignación de estrellas se definió de acuerdo con el número de repeticiones válidas completadas por el usuario.

Cuadro 4: Criterio de asignación de estrellas según repeticiones válidas.

Repeticiones válidas	Estrellas obtenidas	Interpretación
0-15	0 estrella	Ejecución baja o insuficiente. El usuario requiere repetir el nivel y mejorar el control del movimiento.
16-17	1 estrellas	Ejecución adecuada. El usuario cumple el requisito mínimo para avanzar, aunque todavía puede mejorar su precisión.
18-19	2 estrellas	Ejecución alta. El usuario completa la mayoría o la totalidad del ejercicio correctamente.
20	3 estrellas	Ejecución alta. El usuario completa la totalidad del ejercicio correctamente.

Con este criterio, el usuario debe alcanzar al menos 16 repeticiones válidas para avanzar al siguiente nivel y obtener como mínimo una estrella. Este sistema permite reforzar la repetición controlada de los ejercicios, promover una ejecución más precisa y ofrecer una retroalimentación visual sencilla sobre el desempeño del usuario dentro del entorno virtual.

Para la versión en PC se mantuvo la misma lógica general del sistema utilizada en la

versión móvil, incluyendo la navegación entre niveles, la interacción con los objetivos, el conteo de repeticiones, el sistema de estrellas, el criterio de avance y la retroalimentación visual. Sin embargo, se modificó la forma de controlar los movimientos, debido a que en el computador no se utiliza la orientación del dispositivo móvil ni la cámara tipo *Cardboard*.

En esta versión, los movimientos de rotación cervical y flexión-extensión se simularon mediante el movimiento del *mouse*, lo que permitió controlar la orientación de la cámara en los ejes correspondientes. Por otro lado, los movimientos de inclinación lateral se implementaron mediante las teclas Q y E, con el fin de representar la variación asociada al ángulo de inclinación lateral.

Para permitir la interacción con todos los ejercicios en el entorno de PC, se reemplazó la cámara de realidad virtual tipo *Cardboard* por una cámara convencional de Unity. Además, se modificó el código de control de movimiento, como se presenta en el Anexo 43, para utilizar los desplazamientos del *mouse* y las entradas del teclado como mecanismo de simulación de los movimientos cefálicos.

Adicionalmente, se integró una interfaz de pausa mediante la tecla ESC, la cual permite detener temporalmente la ejecución del ejercicio. Desde esta interfaz, el usuario puede reanudar la actividad, cambiar de nivel o salir de la simulación. Esta funcionalidad facilitó la navegación y el control del prototipo durante la evaluación en PC.

De esta manera, la versión en PC permitió evaluar y demostrar el funcionamiento general de los ejercicios sin depender directamente del visor tipo *Cardboard* ni de los sensores IMU del celular. Esta adaptación facilitó la simulación controlada del prototipo durante la validación, permitiendo revisar la lógica de interacción, la retroalimentación visual, el cumplimiento de repeticiones y el avance entre niveles.

En conclusión, esta etapa permitió consolidar el desarrollo del sistema, pasando de un prototipo inicial enfocado principalmente en la navegación y visualización del entorno, a un prototipo final funcional con ejercicios terapéuticos organizados por niveles, control de rangos de movimiento, retroalimentación visual y seguimiento cefálico en la versión móvil, además de una versión en PC adaptada para su evaluación controlada.

Parte 3 - Proyecto de diseño 2

3. Fase de Evaluación (planeada)

3.1. Plan pruebas o validación

El plan de pruebas se estructuró con el propósito de verificar el funcionamiento general del prototipo y su coherencia con los requisitos de diseño establecidos en la fase de análisis. Debido a que el proyecto no contempló pruebas con pacientes ni usuarios finales, la validación se planteó mediante simulación controlada por juicio de un experto, con el fin de evaluar de manera preliminar la funcionalidad, usabilidad, accesibilidad, ergonomía y pertinencia terapéutica del sistema.

La validación se realizó en un entorno controlado de PC, donde se ejecutaron los ejercicios implementados en el prototipo y se observaron las respuestas del sistema frente a la navegación, la visualización de los estímulos, el seguimiento del movimiento cefálico y la retroalimentación generada durante la actividad. Esta modalidad permitió revisar el desempeño del prototipo sin exponer a pacientes a una tecnología aún en fase de desarrollo.

Para organizar la evaluación, se diseñó una lista de verificación compuesta por criterios asociados a los requisitos funcionales y terapéuticos del prototipo. Cada criterio fue evaluado mediante tres categorías: “Cumple”, “Cumple parcialmente” y “No cumple”. Además, se incluyó un espacio de observaciones para registrar recomendaciones y posibles ajustes identificados durante la revisión del sistema. Con el fin de complementar el análisis de los aspectos de usabilidad evaluados, los criterios de la lista de verificación fueron relacionados con las heurísticas de usabilidad propuestas por Nielsen [41]. Este análisis permitió identificar que el prototipo cumple satisfactoriamente con las heurísticas de visibilidad del estado del sistema, consistencia y prevención de errores, mientras que las heurísticas de flexibilidad y eficiencia de uso presentan oportunidades de mejora, particularmente en lo relacionado con la personalización de parámetros terapéuticos.

3.2. Resultados de pruebas o validación

La tercera fase del proyecto se centró en la validación funcional del prototipo mediante simulación controlada y evaluación experta. Para ello, se realizó una validación con el asesor Dr. Luis Fernando Rincón Renza, especialista en otorrinolaringología, otología y

neurootología, quien analizó la pertinencia terapéutica del sistema, la coherencia de los ejercicios propuestos y la funcionalidad del seguimiento del movimiento cefálico.

Durante esta validación, el especialista observó la ejecución de los ejercicios dentro del entorno virtual desde una estación de computador, sin necesidad de utilizar dispositivos de visualización VR. Esta estrategia permitió evaluar aspectos clave como la secuencia de movimientos y la pertinencia de los estímulos visuales. Se empleó una lista de verificación con criterios de cumplimiento, en la cual cada aspecto fue clasificado como “Cumple”, “No cumple” o “Cumple parcialmente”. Además, se incluyó un espacio de observaciones para registrar recomendaciones, ajustes o comentarios realizados por el especialista.

Esta fase permitió verificar si el prototipo cumplió con los requerimientos funcionales y terapéuticos definidos en el diseño, garantizando una evaluación segura antes de considerar futuras pruebas con usuarios reales.

Cuadro 5: Lista de verificación para la validación del prototipo por juicio de experto

No.	Criterio de evaluación	C	CP	NC	Observaciones	Heurística Nielsen
1	La aplicación permite visualizar correctamente el entorno de realidad virtual.	X				H1: Visibilidad del estado del sistema
2	El menú principal y la selección de niveles son claros e intuitivos para el usuario.	X				H4: Consistencia y estándares
3	Los ejercicios implementados son coherentes con los principios de rehabilitación vestibular.	X				H6: Reconocimiento antes que recuerdo
4	Los movimientos cefálicos propuestos corresponden a ejercicios utilizados en terapia vestibular, como flexión-extensión, rotación e inclinación lateral.	X				H6: Reconocimiento antes que recuerdo
5	Los estímulos visuales presentados en el entorno virtual son adecuados para guiar la ejecución del ejercicio.		X		Se recomienda ajustar el tamaño o color de algunos estímulos visuales para mejorar la visibilidad del objeto durante la terapia.	H8: Diseño estético y minimalista

No.	Criterio de evaluación	C	CP	NC	Observaciones	Heurística Nielsen
6	El sistema permite identificar o representar el movimiento de la cabeza durante la ejecución del ejercicio.	X				H1: Visibilidad del estado del sistema
7	La retroalimentación visual del sistema es comprensible para orientar al usuario durante la terapia.		X		La retroalimentación es útil, aunque podría reforzarse con sonidos o con una animación más lenta.	H1: Visibilidad del estado del sistema
8	Los ejercicios no inducen movimientos excesivos o innecesarios de la región cervical.	X			La retroalimentación de los ángulos de movimiento es útil.	H5: Prevención de errores
9	La duración y dinámica de los ejercicios son adecuadas para una etapa inicial de rehabilitación vestibular.	X			La duración de 20 repeticiones es adecuada para lograr una correcta adaptación.	H7: Flexibilidad y eficiencia de uso
10	La interfaz presenta una estructura visual clara y facilita la navegación dentro del prototipo.	X				H4: Consistencia y estándares
11	El prototipo presenta estabilidad durante la ejecución de los ejercicios, sin interrupciones o fallos evidentes.		X		No se observaron fallos críticos durante la ejecución; sin embargo, se identificaron bloqueos ocasionales en la secuencia de repeticiones cuando el usuario no realiza el movimiento al ritmo propuesto.	H5: Prevención de errores
12	El sistema permite la personalización de los estímulos visuales al usuario.		X		La personalización está planteada, pero requiere mayor desarrollo para ajustar más parámetros según el usuario.	H7: Flexibilidad y eficiencia de uso
13	El prototipo cuenta con una base funcional suficiente para continuar hacia una futura etapa de validación con usuarios o pacientes.	X			El prototipo presenta una base funcional adecuada para futuras mejoras y validaciones.	N/A
C: Cumple. CP: Cumple parcialmente. NC: No cumple.						

A partir de la relación establecida entre los criterios de validación y las heurísticas de

Nielsen [41], se identificó que el prototipo cumple satisfactoriamente con las heurísticas de visibilidad del estado del sistema (H1), consistencia y estándares (H4) y prevención de errores (H5), las cuales corresponden a los criterios evaluados como “Cumple” por el especialista. Por otro lado, las heurísticas de flexibilidad y eficiencia de uso (H7) y diseño estético y minimalista (H8) presentan oportunidades de mejora, coherentes con los criterios evaluados como “Cumple parcialmente”, particularmente en lo relacionado con la personalización de parámetros terapéuticos y la visibilidad de los estímulos visuales. Este análisis complementa la evaluación realizada por el especialista.

3.3. Análisis de resultados

El análisis de resultados se realizó relacionando los requisitos de diseño definidos en la fase de análisis con las decisiones implementadas durante el desarrollo del prototipo y la validación funcional por juicio de experto. En este proyecto no se realizaron pruebas con pacientes, por lo que los resultados corresponden a una evaluación del cumplimiento del prototipo frente a los criterios de accesibilidad, usabilidad, adaptabilidad terapéutica y ergonomía.

Para organizar esta interpretación, se presenta la Tabla 6, en la cual se relaciona cada requisito de diseño con el resultado obtenido en el proyecto, el tipo de análisis aplicado, el criterio de comparación utilizado y los ajustes propuestos para futuras versiones del prototipo.

Cuadro 6: Análisis de resultados del proyecto en relación con los requisitos de diseño

Requisito de diseño	Resultado obtenido en el proyecto	Tipo de análisis aplicado	Comparación o criterio de referencia	Estrategia de mejora
Accesibilidad tecnológica	Se desarrolló un prototipo basado en dispositivos móviles, Unity y gafas VR tipo <i>cardboard</i> , evitando equipos especializados de alto costo.	Análisis comparativo cualitativo frente a soluciones comerciales de realidad virtual.	Comparación con sistemas como Oculus Rift o HTC Vive, los cuales requieren mayor inversión e infraestructura tecnológica.	Optimizar el prototipo para diferentes dispositivos móviles y mantener compatibilidad con visores de bajo costo.
Usabilidad de la interfaz	Se implementó un menú principal, selección de niveles y navegación básica dentro del prototipo. La estructura fue considerada clara durante la validación.	Evaluación cualitativa mediante juicio de experto y revisión de criterios de usabilidad en aplicaciones móviles.	Criterios de usabilidad móvil reportados por Panigua et al. [30], relacionados con claridad, navegación e interacción.	Mantener las instrucciones existentes antes de cada ejercicio, y complementar la guía con apoyos gráficos o auditivos.
Accesibilidad visual	Los estímulos visuales permiten guiar los ejercicios, pero algunos requieren ajustes de tamaño, color o contraste para mejorar su visibilidad.	Evaluación visual cualitativa durante la simulación del prototipo.	Criterios de accesibilidad y usabilidad visual en aplicaciones móviles [30].	Mantener el uso de contraste, colores diferenciables, tamaños adecuados y escenarios poco saturados, verificando su comportamiento en diferentes pantallas y condiciones de visualización.

Requisito de diseño	Resultado obtenido en el proyecto	Tipo de análisis aplicado	Comparación o criterio de referencia	Estrategia de mejora
Reducción de cibermareo	Se diseñaron escenarios poco saturados, con movimientos suaves y navegación controlada para disminuir la sobrecarga sensorial.	Análisis comparativo con recomendaciones de diseño para aplicaciones terapéuticas en realidad virtual.	Recomendaciones de la literatura sobre reducción de cibermareo en entornos VR terapéuticos.	Mantener velocidades moderadas, incluir pausas y permitir el ajuste de intensidad en futuras versiones.
Ergonomía del movimiento cervical	El prototipo fue diseñado considerando el control de movimientos cervicales para evitar desplazamientos excesivos o innecesarios durante la terapia.	Comparación biomecánica y ergonómica de los movimientos cervicales.	Rangos funcionales de movimiento cervical, criterios ergonómicos como el método REBA y enfoque de evaluación ergonómica en VR propuesto por Leskovský et al. [31].	Mantener los límites angulares por tipo de ejercicio, incluir sonoras.
Adaptabilidad terapéutica	El sistema plantea el ajuste de parámetros como velocidad de estímulos y organización por niveles, pero requiere ampliar la personalización.	Análisis del cumplimiento funcional frente a los requisitos de diseño.	Requisito de personalización terapéutica del prototipo según el tipo de ejercicio y necesidades del usuario.	Permitir modificar tamaño, color, distancia, número de repeticiones y nivel de dificultad.

De acuerdo con la Tabla 6, los resultados muestran que el prototipo cumple con los requisitos principales del diseño. En accesibilidad, se logró una solución basada en herramientas de bajo costo y dispositivos disponibles comercialmente. En usabilidad, se obtuvo una interfaz funcional y comprensible, aunque con oportunidades de mejora en la presentación de estímulos. En ergonomía, el proyecto permitió relacionar el análisis biomecánico con la

necesidad de controlar los movimientos cervicales dentro del entorno virtual.

El tipo de análisis aplicado fue principalmente cualitativo y comparativo. En relación con las estrategias de mejora, los resultados indican que las siguientes iteraciones del prototipo deben enfocarse en tres aspectos principales. Primero, mejorar la retroalimentación del sistema mediante señales auditivas. Segundo, ampliar la personalización de parámetros terapéuticos, número de repeticiones, tamaño y color de los estímulos. Finalmente, optimizar la estabilidad de la secuencia de ejercicios, permitiendo pausas y reinicios. En conclusión, el análisis de resultados permite afirmar que el proyecto alcanzó una base funcional coherente con los requisitos de diseño planteados.

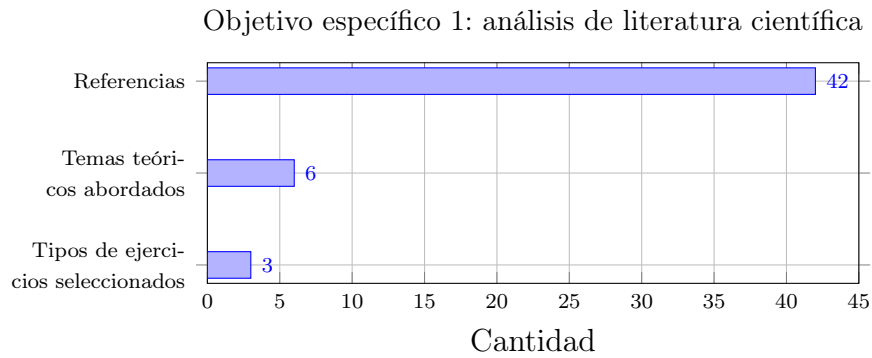
3.4. Indicadores de éxito

Los indicadores de éxito se definieron a partir de los objetivos específicos del proyecto, con el fin de verificar si el diseño desarrollado cumple con el alcance planteado.

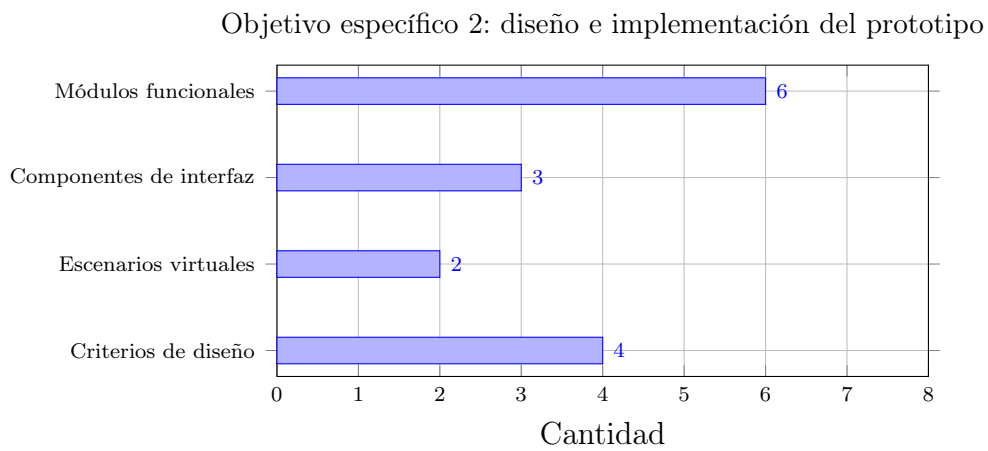
Para facilitar su interpretación, los indicadores se presentan mediante gráficas organizadas por objetivo específico. Estas gráficas permiten visualizar de manera cuantitativa el nivel de avance obtenido en cada etapa del proyecto, como el número mínimo de referencias revisadas, los temas teóricos abordados, los ejercicios seleccionados, los módulos funcionales definidos, los componentes implementados y los criterios evaluados durante la validación por juicio de experto.

Cuadro 7: Indicadores de éxito del proyecto

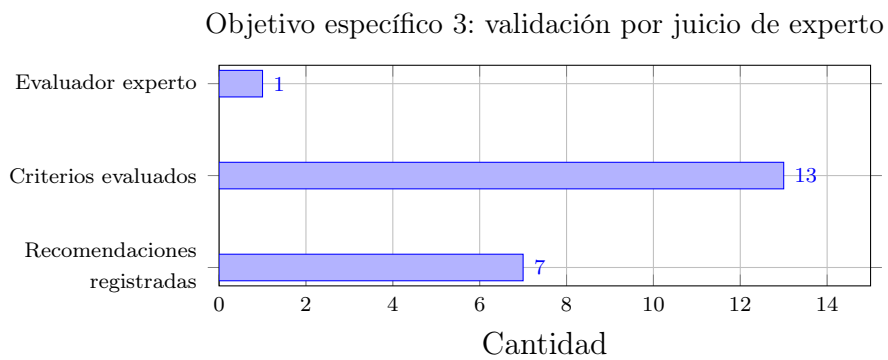
Objetivo específico	Actividad clave	KPI / Parámetro de éxito	Meta mínima	Entregable parcial	Responsable
Analizar literatura científica sobre terapias vestibulares y realidad virtual.	Revisar literatura científica sobre rehabilitación vestibular, realidad virtual, cibermareo, sensores IMU, accesibilidad y usabilidad.	Número de referencias bibliográficas revisadas y utilizadas en el documento.	Mínimo 20 referencias.	Estado del arte, justificación, análisis biomecánico, diseño conceptual, validación y referencias bibliográficas del proyecto.	Estudiante desarrolladora.
Analizar literatura científica sobre terapias vestibulares y realidad virtual.	Identificar los temas teóricos necesarios para fundamentar el diseño del prototipo.	Número de temas teóricos abordados en la fase de análisis.	Mínimo 4 temas.	Desarrollo teórico sobre sistema vestibular, rehabilitación vestibular, realidad virtual, cibermareo, análisis biomecánico e IMU.	Estudiante desarrolladora.
Analizar literatura científica sobre terapias vestibulares y realidad virtual.	Seleccionar ejercicios vestibulares que puedan ser adaptados al entorno virtual.	Número de tipos de ejercicios vestibulares seleccionados.	Mínimo 3 tipos.	Selección de ejercicios: movimientos cefálicos, seguimiento visual y ejercicio funcional.	Estudiante desarrolladora con apoyo del asesor clínico.
Diseñar el prototipo terapéutico con hardware existente e integración de software.	Definir la arquitectura funcional del sistema y sus módulos principales.	Número de módulos funcionales definidos en el sistema.	Mínimo 5 módulos.	Diagrama de bloques funcional con módulos de orientación, cálculo angular, evaluación biomecánica, retroalimentación, interfaz y visualización.	Estudiante desarrolladora y docentes asesores.
Diseñar el prototipo terapéutico con hardware existente e integración de software.	Implementar la interfaz de usuario y la navegación principal del prototipo.	Número de componentes de interfaz implementados.	Mínimo 3 componentes.	Menú principal, selección de niveles e introducción de nivel.	Estudiante desarrolladora.
Diseñar el prototipo terapéutico con hardware existente e integración de software.	Desarrollar escenarios virtuales y estímulos visuales para la ejecución de ejercicios.	Número de escenarios virtuales implementados.	Mínimo 1 escenario.	Escenarios virtuales funcionales desarrollados en Unity e integrados con elementos modelados en Blender.	Estudiante desarrolladora.
Diseñar el prototipo terapéutico con hardware existente e integración de software.	Incorporar criterios de accesibilidad, usabilidad, adaptabilidad terapéutica y ergonomía en el prototipo.	Número de criterios de diseño incorporados.	Mínimo 3 criterios.	Prototipo diseñado con criterios de accesibilidad, usabilidad, adaptabilidad terapéutica y ergonomía.	Estudiante desarrolladora y docentes asesores.
Validar funcionalidad y pertinencia terapéutica mediante evaluación experta.	Aplicar una lista de verificación al prototipo mediante simulación controlada y juicio de experto.	Número de criterios evaluados mediante lista de verificación.	Mínimo 10 criterios.	Lista de verificación diligenciada por el experto.	Médico especialista y estudiante desarrolladora.
Validar funcionalidad y pertinencia terapéutica mediante evaluación experta.	Registrar observaciones y recomendaciones derivadas de la evaluación experta.	Número de observaciones o recomendaciones registradas.	Mínimo 3 observaciones.	Recomendaciones sobre estímulos visuales, retroalimentación, estabilidad y personalización del prototipo.	Médico especialista y estudiante desarrolladora.



(a) KPI asociados a la revisión científica y selección de ejercicios.



(b) KPI asociados al diseño e implementación funcional del prototipo.



(c) KPI asociados a la validación funcional y terapéutica preliminar.

Figura 27: Gráficas de indicadores de éxito cuantitativos por objetivo específico.

La Figura 27 presenta los indicadores de éxito cuantitativos organizados por objetivo específico. Para el primer objetivo, se definió como meta mínima la revisión de al menos 20

referencias, el abordaje de 4 temas teóricos principales y la selección de 3 tipos de ejercicios vestibulares. Para el segundo objetivo, los indicadores se relacionaron con la definición de módulos funcionales, componentes de interfaz, escenarios virtuales y criterios de diseño incorporados en el prototipo. Finalmente, para el tercer objetivo, los KPI se enfocaron en la validación preliminar mediante un evaluador experto, la aplicación de una lista de verificación con 13 criterios y el registro de recomendaciones para futuras mejoras. Por tanto, la gráfica resume el alcance logrado en términos de análisis, diseño, implementación funcional y validación preliminar del prototipo.

3.5. Prototipo final testeado

El prototipo final testeado corresponde a una aplicación móvil de realidad virtual orientada a la rehabilitación vestibular, desarrollada en Unity e integrada con escenarios modelados en Blender. Esta versión fue diseñada para funcionar en dispositivos móviles y ser visualizada mediante gafas de realidad virtual tipo *cardboard*, aprovechando los sensores integrados del celular para el seguimiento del movimiento cefálico durante la ejecución de los ejercicios.

El sistema integra los componentes principales definidos en los requisitos de diseño: menú principal, pantalla de ajustes, selección de niveles, instrucciones de uso, entorno virtual inmersivo, estímulos visuales, seguimiento del movimiento de la cabeza y retroalimentación durante la actividad. Estos elementos permiten que el usuario interactúe con el entorno virtual mediante movimientos cefálicos asociados a ejercicios de rehabilitación vestibular, tales como flexión-extensión, rotación cervical, inclinación lateral y seguimiento visual.

En la Figura 28 se muestran diversos modelos de gafas tipo *cardboard* en los que puede ubicarse el celular para ejecutar el prototipo. Esta característica favorece la adaptabilidad del sistema, debido a que la aplicación no depende de un único modelo de visor, sino que puede utilizarse con diferentes alternativas compatibles con teléfonos móviles, responde así al requisito de accesibilidad tecnológica del proyecto, ya que son dispositivos de bajo costo, fáciles de conseguir y no requieren sensores externos ni equipos de cómputo especializados.



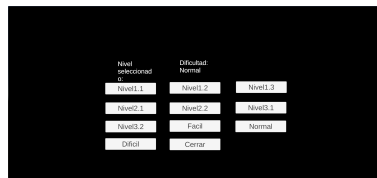
Figura 28: Diferentes modelos de gafas VR tipo *cardboard* compatibles con el prototipo desarrollado.

Con el fin de evidenciar el estado final del prototipo testado, se documentaron las principales pantallas de la aplicación en dispositivo móvil y una vista general del entorno en PC. Las capturas en celular permiten observar la estructura de navegación del sistema, incluyendo el menú principal, la pantalla de ajustes, la selección de niveles y la visualización de cada nivel en modo realidad virtual. Por otra parte, la vista en PC permitió realizar la simulación controlada y facilitar la evaluación del funcionamiento general del prototipo por parte del experto.

En la Figura 29 se presentan las pantallas principales de navegación del prototipo. El menú principal permite iniciar la interacción con la aplicación, la pantalla de ajustes contempla la configuración de parámetros del sistema y la selección de niveles permite acceder a los ejercicios terapéuticos implementados. Estas pantallas responden al requisito de usabilidad, ya que organizan la interacción del usuario de forma clara, sencilla e intuitiva.



(a) Menú principal.



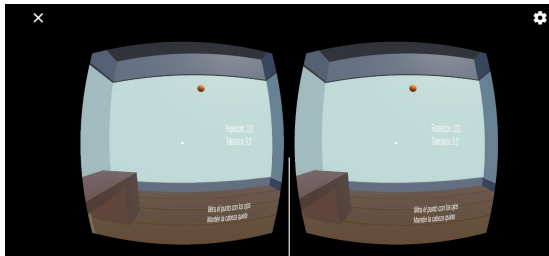
(b) Pantalla de ajustes.



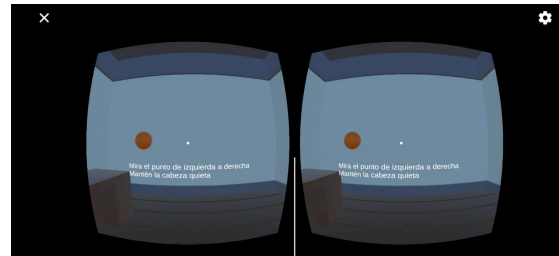
(c) Selección de niveles.

Figura 29: Pantallas principales de navegación del prototipo en dispositivo móvil.

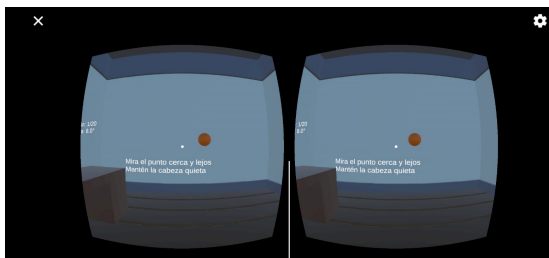
En la Figura 30 se muestra la visualización de los niveles implementados en el dispositivo móvil. Cada nivel fue diseñado para guiar la ejecución de ejercicios asociados a la rehabilitación vestibular mediante estímulos visuales y seguimiento del movimiento cefálico.



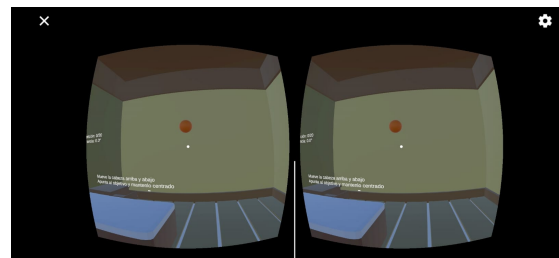
(a) Nivel 1.1 en dispositivo móvil.



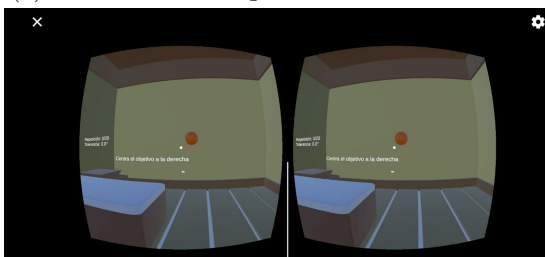
(b) Nivel 1.2 en dispositivo móvil.



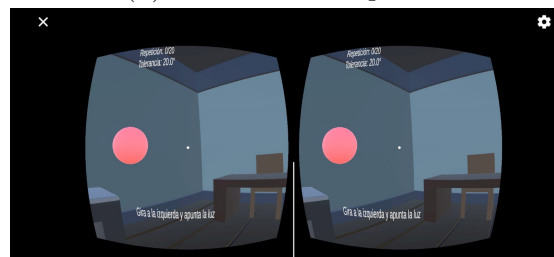
(c) Nivel 1.3 en dispositivo móvil.



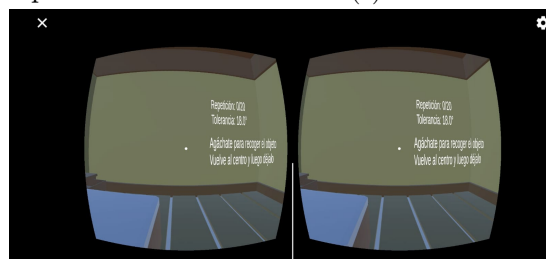
(d) Nivel 2.1 en dispositivo móvil.



(e) Nivel 2.2 en dispositivo móvil.



(f) Nivel 3.1 en dispositivo móvil.



(g) Nivel 3.2 en dispositivo móvil.

Figura 30: Visualización de los niveles terapéuticos del prototipo en dispositivo móvil.

En la Figura 31 se presenta una vista general del prototipo en entorno de PC. Esta visualización fue utilizada durante la simulación controlada para revisar el comportamiento

del sistema, la disposición de los estímulos visuales, la ejecución de los ejercicios y la coherencia de la interacción propuesta. Esta modalidad permitió realizar la evaluación preliminar del prototipo sin involucrar pacientes ni usuarios finales.



Figura 31: Vista general del prototipo en entorno de PC durante la simulación controlada.

Durante la prueba se verificó el funcionamiento de la navegación dentro de la aplicación, la visualización del entorno virtual, la claridad de los estímulos visuales, la ejecución de los ejercicios propuestos y la respuesta del sistema frente al movimiento cefálico.

Para complementar la evaluación del movimiento cefálico, se tuvo en cuenta el análisis biomecánico realizado previamente a partir de los datos de captura de movimiento. En biomecánica, el cálculo de ángulos articulares puede realizarse a partir de la orientación relativa entre segmentos corporales, expresando el movimiento de un segmento respecto a otro [35]. Bajo este principio, se estimaron los ángulos cervicales asociados a los movimientos de flexión-extensión, rotación horizontal y agacharse, con el fin de relacionar la respuesta del sistema con los movimientos terapéuticos implementados en el prototipo.

Para los movimientos de flexión-extensión cervical y agacharse se empleó el mismo principio de análisis, calculando el ángulo entre un vector asociado a la cabeza y un vector de referencia del tronco. El vector de la cabeza se definió a partir de los marcadores ubicados en el mentón y la frente, mientras que el vector del tronco se definió a partir de los marcadores ubicados en el pecho y la región cervical superior. De esta manera, se estimó la variación angular cervical mediante la relación cabeza-tronco.

$$\vec{v}_{cabeza} = P_{frente} - P_{menton}$$

$$\vec{v}_{tronco} = P_{C7} - P_{pecho}$$

El ángulo cervical absoluto se calculó mediante la fórmula del producto punto entre vectores tridimensionales. Esta operación permite determinar el ángulo formado entre dos vectores a partir de sus componentes y sus magnitudes [36].

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{v}_{cabeza} \cdot \vec{v}_{tronco}}{\|\vec{v}_{cabeza}\| \|\vec{v}_{tronco}\|} \right)$$

Posteriormente, se obtuvo el ángulo relativo restando el valor del primer frame, tomado como postura inicial de referencia:

$$\theta_{relativo}(i) = \theta_i - \theta_0$$

En el caso de la flexión-extensión, este procedimiento permitió estimar el desplazamiento vertical de la cabeza respecto al tronco. Para el movimiento de agacharse, el mismo cálculo permitió evaluar cómo la región cervical acompaña un gesto funcional dominado principalmente por la flexión del tronco, identificando si la cabeza se mantiene relativamente alineada o si se producen variaciones cervicales importantes durante la ejecución.

Para el análisis de la rotación horizontal cervical se utilizaron los marcadores laterales de la cabeza, debido a que durante la prueba la participante permaneció en posición de pie y mantuvo el tronco estable, realizando únicamente el movimiento de giro de la cabeza. Por esta razón, la orientación cefálica respecto a la postura inicial se tomó como una aproximación válida del giro cervical en el plano horizontal. A partir de los marcadores laterales se construyó un vector izquierda-derecha de la cabeza:

$$\vec{v}_{LR} = P_{HeadR} - P_{HeadL}$$

A partir de este vector, el ángulo de rotación horizontal o *yaw* se calculó mediante la función `atan2`, considerando las componentes del vector proyectadas en el plano horizontal. Esta función permite obtener el ángulo de un vector en el plano cartesiano teniendo en cuenta el signo de ambas componentes, por lo que identifica correctamente el cuadrante del movimiento [37].

$$\theta_{yaw} = \text{atan2}(v_{LR,y}, v_{LR,x})$$

Finalmente, este ángulo también se calculó de forma relativa respecto al primer frame:

$$\theta_{yaw,relativo}(i) = \theta_{yaw}(i) - \theta_{yaw}(0)$$

Para el análisis de la inclinación lateral cervical se empleó el mismo principio utilizado en la rotación horizontal, ya que en ambos casos se construyó un vector izquierda-derecha de la cabeza a partir de los marcadores laterales:

$$\vec{v}_{LR} = P_{HeadR} - P_{HeadL}$$

Sin embargo, a diferencia de la rotación horizontal, donde el vector se proyectó en el plano horizontal, para la inclinación lateral el vector se analizó en el plano frontal, considerando las componentes Y y Z . A partir de estas componentes, el ángulo de lateroflexión cervical se calculó mediante la función *atan2*:

$$\theta_{lat} = \text{atan2}(v_{LR,z}, v_{LR,y})$$

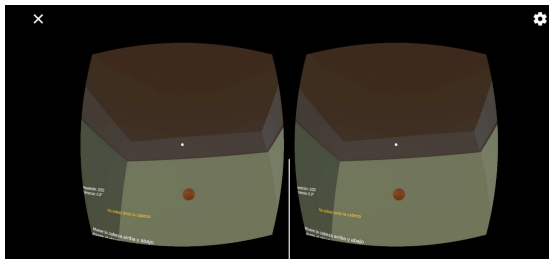
Finalmente, este ángulo también se calculó de forma relativa respecto al primer frame:

$$\theta_{lat,relativo}(i) = \theta_{lat}(i) - \theta_{lat}(0)$$

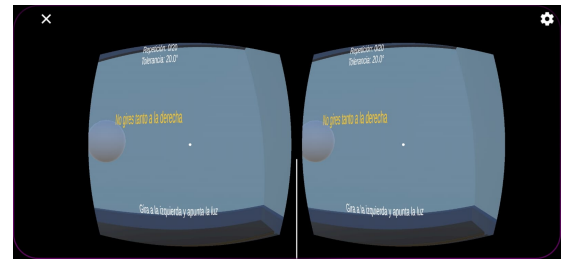
De esta manera, los análisis permitieron establecer una referencia cuantitativa del comportamiento cervical durante los ejercicios evaluados. Esta información fue utilizada como base para revisar que los ejercicios implementados en el entorno virtual no indujeran movimientos cervicales excesivos o innecesarios, manteniendo coherencia con los criterios biomecánicos y ergonómicos planteados en la fase de diseño.

A partir de esta revisión, se comprobó que el sistema responde a los cambios de orientación de la cabeza mediante la generación de alertas visuales cuando el movimiento realizado supera el rango estipulado para el ejercicio. Estas alertas permiten orientar al usuario durante la ejecución de la terapia y funcionan como una estrategia de retroalimentación

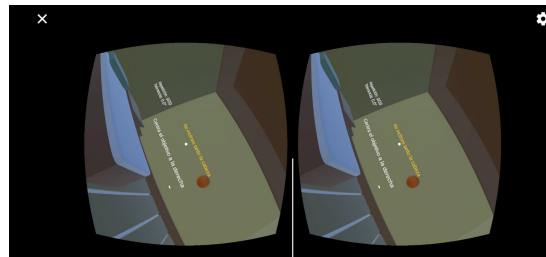
para favorecer movimientos más controlados dentro del entorno virtual.



(a) Nivel 1.1 en dispositivo móvil.



(b) Nivel 1.2 en dispositivo móvil.



(c) Nivel 1.3 en dispositivo móvil.

Figura 32: Visualización de los niveles terapéuticos con las alertas de movimientos cervicales.

La Figura 32 muestra la advertencia presentada por el sistema cuando se detecta un movimiento cefálico mayor al esperado.

Adicionalmente, con el fin de complementar la evaluación funcional del prototipo, se consideró necesario registrar algunos parámetros técnicos asociados al desempeño de la aplicación móvil. Estos parámetros permiten verificar que presenta condiciones adecuadas para su ejecución en diferentes dispositivos móviles, lo cual respalda su accesibilidad y su potencial uso en entornos domiciliarios. Para ello, se analizaron aspectos relacionados con la fluidez del entorno virtual, la respuesta del seguimiento cefálico, la compatibilidad con el sistema operativo Android, el consumo energético, el tamaño de la aplicación y el uso de memoria durante la ejecución.

Se realizó una tabla con las especificaciones técnicas de la aplicación móvil, la cual incluye parámetros de rendimiento, compatibilidad y consumo energético. Esta información permite tener una referencia cuantitativa del comportamiento del prototipo durante su funcionamiento y facilita la identificación de posibles mejoras técnicas en futuras versiones del sistema.

Cuadro 8: Especificaciones técnicas del prototipo

Parámetro técnico	Valor obtenido	Referencia o criterio
FPS promedio durante ejecución	60 FPS	Mínimo recomendado: 60 FPS para VR [40]
Latencia de head tracking	16,7 ms	Latencia mínima recomendada: menor a 30 ms [39]
Versión mínima Android	Android 8.0 Oreo (API level 26)	Requisito plugin XR Cardboard
Consumo de batería	24 % por hora	Medición en sesión de 20 min
Tamaño del APK	110 MB	Build release Unity
Consumo de RAM	283 MB	Consumo en el equipo
Target architecture	ARMv7, ARM64	Compatibilidad con dispositivos de 32 y 64 bits

A partir de la Tabla 8, se observa que el prototipo presenta un desempeño técnico adecuado para una aplicación móvil de realidad virtual. El sistema mantiene una ejecución fluida de 60 FPS y una latencia de head tracking de 16,7 ms, valores que favorecen una respuesta visual estable durante la interacción con el entorno virtual. Además, la compatibilidad con Android 8.0, arquitecturas ARMv7 y ARM64, junto con un consumo de RAM moderado, evidencian que la aplicación puede ejecutarse en dispositivos móviles de gama media sin requerir hardware especializado. No obstante, el consumo de batería de 24 % por hora representa un aspecto a considerar en futuras optimizaciones, especialmente si se busca aumentar la duración de las sesiones terapéuticas.

Los resultados del testeo evidenciaron que la aplicación permite visualizar correctamente el entorno de realidad virtual, navegar entre niveles, ejecutar ejercicios vestibulares en un escenario inmersivo y utilizar el seguimiento cefálico como mecanismo de interacción. Además, el experto consideró que los ejercicios implementados son coherentes con los principios de rehabilitación vestibular y que la duración propuesta resulta adecuada para una

etapa inicial, en conjunto, las capturas presentadas permiten evidenciar que el prototipo final cumple con los objetivos planteados para el proyecto.

3.6. Descripción de los siguientes pasos de avance en la tecnología

El avance tecnológico del prototipo se analiza considerando los niveles de madurez tecnológica o *Technology Readiness Level* (TRL), los cuales permiten clasificar el estado de desarrollo de una tecnología desde su formulación conceptual hasta su validación y demostración en entornos reales. De acuerdo con las definiciones establecidas por Minciencias y las buenas prácticas propuestas por la NASA para la evaluación de madurez tecnológica [33, 34], el presente proyecto se encuentra en una etapa de validación funcional preliminar en entorno controlado.

A partir del alcance desarrollado, el prototipo puede ubicarse aproximadamente en un TRL 4, correspondiente a una tecnología validada a nivel de componentes o prototipo funcional en condiciones de laboratorio o simulación. Esto se debe a que la aplicación integra los módulos principales del sistema, incluyendo la interfaz de usuario, selección de niveles, escenarios virtuales, estímulos visuales, seguimiento del movimiento cefálico mediante la IMU del dispositivo móvil y retroalimentación durante la ejecución de los ejercicios. Además, su funcionamiento fue revisado mediante simulación controlada en PC y evaluación por juicio de experto.

Sin embargo, el prototipo aún no alcanza niveles superiores de madurez tecnológica, debido a que no se realizaron pruebas con pacientes ni usuarios finales en un entorno domiciliario real. Por esta razón, las siguientes etapas deben orientarse a fortalecer la estabilidad del sistema, ampliar la personalización terapéutica, optimizar la retroalimentación y realizar validaciones progresivas con usuarios bajo condiciones éticas adecuadas.

Cuadro 9: Sigüientes pasos de avance tecnológico del prototipo

Etapa	Nivel TRL asociado	Actividad requerida	Resultado esperado
Estado actual del proyecto	TRL 4: validación funcional en entorno controlado.	Validación del prototipo mediante simulación en PC y juicio de experto.	Prototipo funcional con navegación, selección de niveles, estímulos visuales, seguimiento cefálico y pertinencia terapéutica preliminar.
Optimización técnica del prototipo	Transición hacia TRL 5.	Mejorar la estabilidad del sistema, la respuesta del entorno virtual, el funcionamiento de la secuencia de repeticiones y el procesamiento de los datos de la IMU.	Versión más robusta del prototipo, con menor probabilidad de interrupciones durante la ejecución de los ejercicios.
Mejora de la retroalimentación y personalización	Transición hacia TRL 5.	Ampliar las opciones de ajuste de parámetros terapéuticos, como velocidad, número de repeticiones, tamaño, color y distancia de los estímulos visuales. Además, incorporar retroalimentación auditiva o animaciones más claras.	Sistema más adaptable a las necesidades del usuario y al criterio del profesional de salud.
Validación con usuarios sanos	TRL 5: validación en entorno relevante.	Realizar pruebas controladas con usuarios sin diagnóstico vestibular, previa aprobación ética, para evaluar usabilidad, comodidad, claridad de instrucciones, tolerancia al entorno virtual y presencia de cibermareo.	Evidencia preliminar sobre experiencia de uso y seguridad antes de avanzar.
Validación clínica inicial	TRL 6: demostración en entorno relevante con población objetivo.	Evaluar el prototipo con pacientes con disfunción vestibular periférica bajo supervisión de profesionales de salud y aprobación ética.	Información inicial sobre seguridad, aceptación, pertinencia terapéutica y respuesta del paciente durante el uso del sistema.
Implementación piloto	TRL 7: demostración en entorno operativo.	Aplicar el sistema en un contexto clínico o domiciliario controlado, con acompañamiento profesional y seguimiento del desempeño del usuario.	Validación del funcionamiento del prototipo en condiciones cercanas al uso real.

De acuerdo con la Tabla 9, el siguiente paso inmediato consiste en optimizar la versión actual del prototipo, fortaleciendo principalmente la estabilidad del sistema, la retroalimentación al usuario, la personalización terapéutica y el desempeño del seguimiento cefálico. Posteriormente, se recomienda realizar una validación con usuarios sanos, con el fin de evaluar la usabilidad, comodidad y tolerancia al entorno de realidad virtual antes de considerar pruebas con pacientes.

Finalmente, la validación con pacientes deberá realizarse únicamente después de contar con una versión más estable del prototipo y con las aprobaciones éticas correspondientes. Esta etapa permitirá evaluar el desempeño del sistema en la población objetivo y determinar su potencial como herramienta de apoyo en procesos de rehabilitación vestibular. Por tanto, el avance tecnológico futuro del proyecto debe realizarse de manera progresiva, pasando de la validación controlada del prototipo hacia su demostración en entornos domiciliarios

reales.

3.7. Trabajo Futuro

A partir del desarrollo y la validación del prototipo, se identificaron diferentes líneas de trabajo futuro orientadas a fortalecer el sistema y avanzar hacia una versión más robusta, segura y adaptable. Estas mejoras se plantean considerando que, en esta etapa del proyecto, la validación se realizó mediante simulación controlada y juicio de experto, sin incluir todavía pruebas con pacientes o usuarios finales.

En primer lugar, se propone optimizar el funcionamiento técnico del prototipo, especialmente en lo relacionado con la estabilidad de la secuencia de ejercicios, el head tracking provenientes del procesamiento de los datos con IMU del dispositivo móvil. Esto permitiría mejorar la fluidez de la interacción y reducir posibles bloqueos durante la ejecución de los ejercicios.

En segundo lugar, se recomienda ampliar las opciones de personalización terapéutica. Aunque el prototipo cuenta con el ajuste de parámetros de velocidad a fácil, normal y difícil, futuras versiones podrían permitir modificar variables como la velocidad de formar abierta de los estímulos visuales, el tamaño y color de los objetos, la distancia de aparición de los estímulos. Esta mejora permitiría adaptar la terapia a diferentes perfiles de usuario y al criterio del profesional de salud.

Otra línea de trabajo futuro corresponde al fortalecimiento de la retroalimentación del sistema. Se propone complementar la retroalimentación visual actual con señales auditivas, animaciones más lentas o mensajes simples que indiquen si el movimiento fue realizado correctamente. Esto contribuiría a mejorar la comprensión de la tarea.

Asimismo, se plantea continuar mejorando la experiencia visual del entorno virtual mediante el uso de escenarios poco saturados, estímulos claros y espacios abiertos que favorezcan una interacción cómoda y segura. De igual manera, se propone que los ejercicios estén integrados de forma coherente con el escenario, de modo que las actividades terapéuticas no se perciban como elementos aislados, sino como parte natural del entorno virtual. Esto permitiría reducir la sobrecarga sensorial, disminuir el riesgo de cibermareo y mejorar la experiencia de uso durante la terapia.

Adicionalmente, se propone como trabajo futuro la implementación de un componente de

hardware complementario para el seguimiento ocular, como sensores de *eye tracking* o cámaras integradas al visor. Esta mejora permitiría evaluar con mayor precisión si el usuario realiza correctamente los ejercicios de seguimiento visual, diferenciando los movimientos oculares de los movimientos cefálicos. De esta manera, el sistema podría validar de forma más objetiva la ejecución de los ejercicios, fortalecer la retroalimentación terapéutica y ampliar las posibilidades de análisis del desempeño del usuario durante la rehabilitación.

Finalmente, se recomienda explorar la posibilidad de implementar un sistema de registro y análisis de datos del desempeño del usuario, que permita almacenar información como número de repeticiones completadas, errores durante la ejecución, movimientos fuera de rango y evolución del usuario a lo largo de las sesiones. Esta funcionalidad podría ser útil para que el profesional de salud realice seguimiento del proceso terapéutico y ajuste la dificultad de los ejercicios de manera progresiva.

En conclusión, el trabajo futuro debe orientarse a la optimización técnica del prototipo, el fortalecimiento de la retroalimentación, la ampliación de la personalización terapéutica. Estas etapas permitirán avanzar desde un prototipo funcional validado hacia una herramienta más completa y con mayor potencial de aplicación en procesos de rehabilitación vestibular.

3.8. Anexos

En esta sección se presentan los diagramas de flujo correspondientes a los principales módulos funcionales implementados en el prototipo. Estos diagramas permiten representar de manera visual la lógica interna de cada componente del sistema, incluyendo el control de límites angulares, los ejercicios de seguimiento visual, el sistema de apuntado, los ejercicios cervicales, la interfaz de usuario y la simulación en PC.

Cada anexo se relaciona con un script específico desarrollado en Unity, lo que facilita la comprensión del funcionamiento general del prototipo y permite identificar la secuencia de acciones, decisiones y retroalimentaciones que se ejecutan durante cada nivel terapéutico.

Anexo A. Diagrama de flujo del control de límites angulares de la cabeza

Este diagrama representa la lógica del script *HeadAngleLimitWarning*, encargado de calibrar la posición neutra de la cabeza, leer la orientación actual de la cámara VR, calcular los ángulos relativos de *pitch*, *yaw* y *roll*.

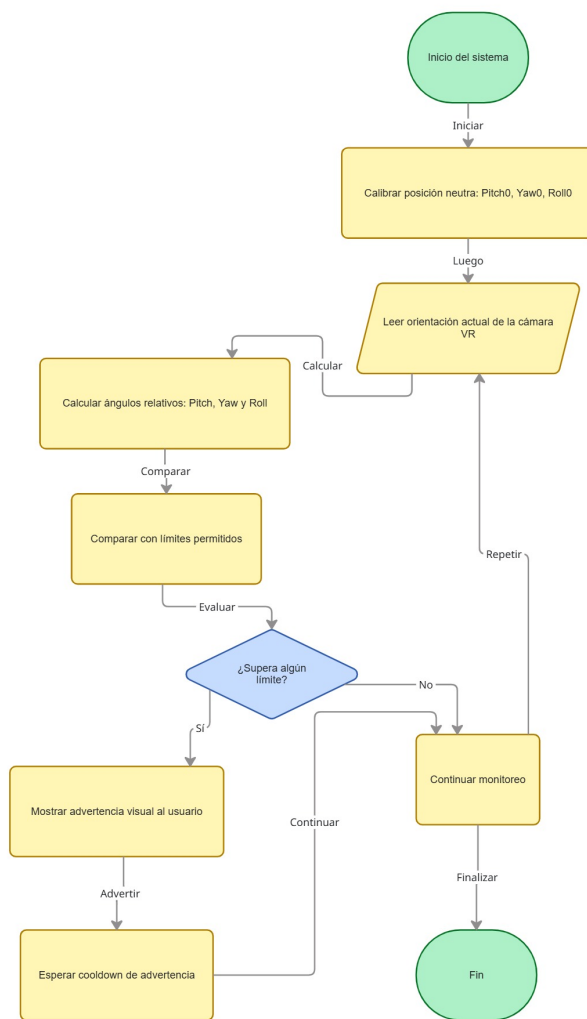


Figura 33: Diagrama de flujo del control de límites angulares de la cabeza.

Anexo B. Diagrama de flujo del seguimiento visual vertical con cabeza fija

Este diagrama corresponde al script *Level1TargetSequence*, utilizado para el ejercicio de seguimiento visual vertical.

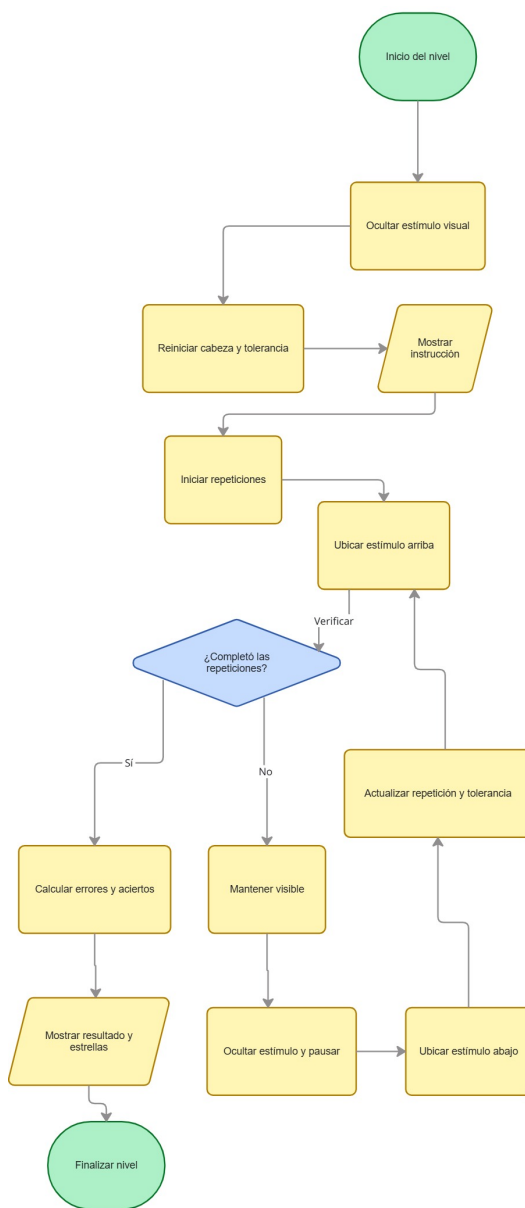


Figura 34: Diagrama de flujo del seguimiento visual vertical con cabeza fija.

Anexo C. Diagrama de flujo del seguimiento visual horizontal con cabeza fija

Este diagrama representa el funcionamiento del script *Level1HorizontalSequence*, correspondiente al ejercicio de seguimiento visual horizontal.

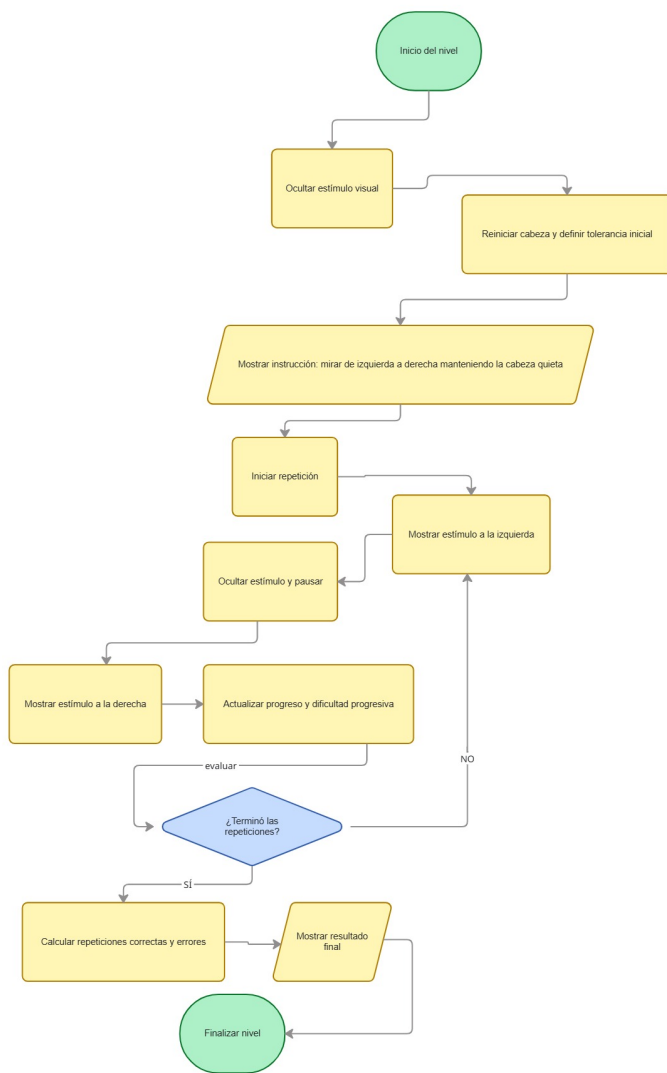


Figura 35: Diagrama de flujo del seguimiento visual horizontal con cabeza fija.

Anexo D. Diagrama de flujo del seguimiento visual en profundidad

Este diagrama corresponde al script *Level1DepthSequence*. Su función es guiar el ejercicio de seguimiento visual en profundidad.

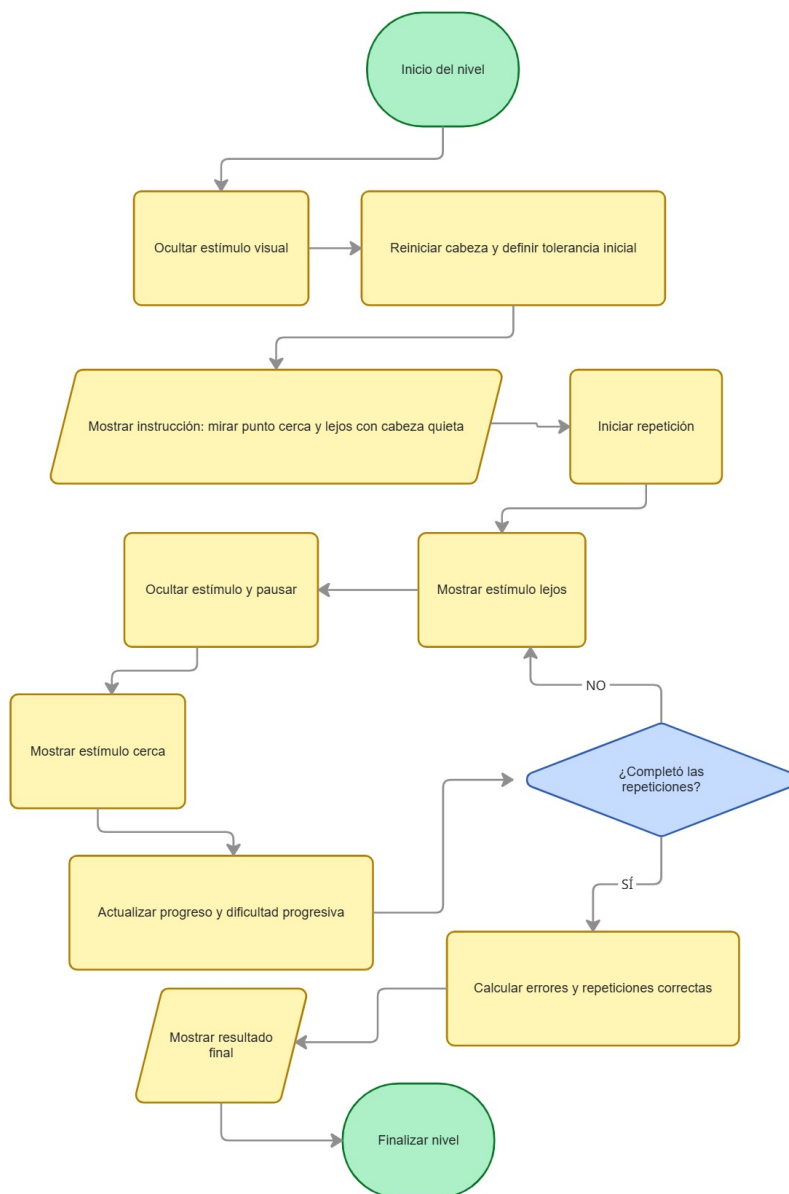


Figura 36: Diagrama de flujo del seguimiento visual en profundidad.

Anexo E. Diagrama de flujo del sistema de interfaz, progreso y estrellas

Este diagrama describe la lógica del script *Level1UIManager*, encargado de administrar los elementos visuales de la interfaz durante la ejecución de los ejercicios.

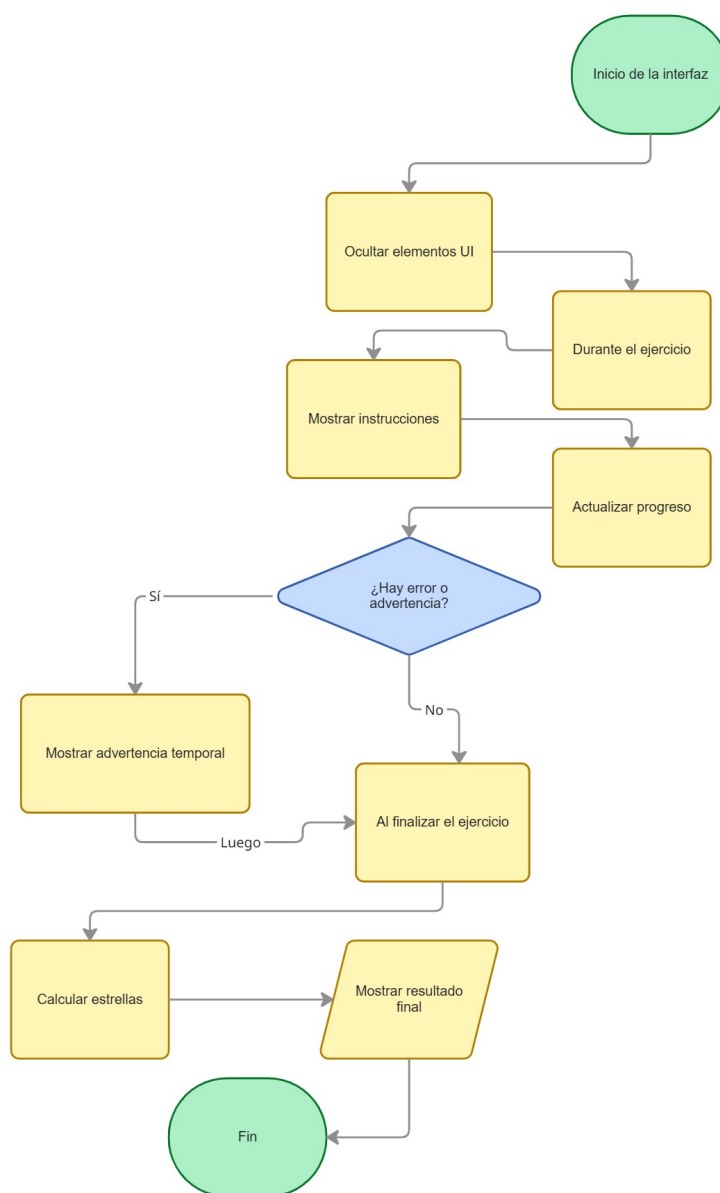


Figura 37: Diagrama de flujo del sistema de interfaz, progreso y estrellas.

Anexo F. Diagrama de flujo del sistema de apuntado por mirada

Este diagrama representa el script *Level2AimShooter*, utilizado para detectar si el usuario apunta correctamente hacia un objetivo dentro del entorno virtual.

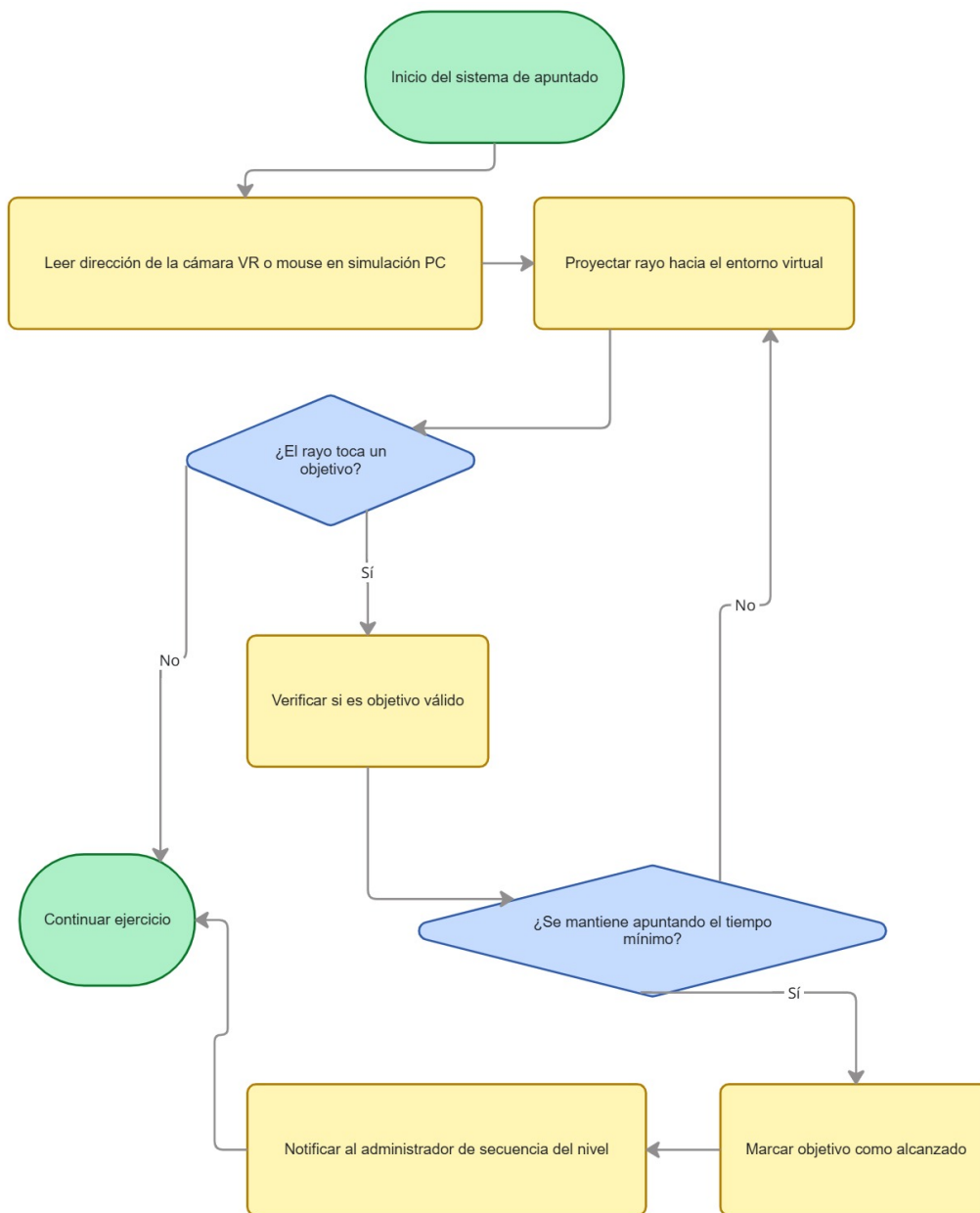


Figura 38: Diagrama de flujo del sistema de apuntado por mirada.

Anexo G. Diagrama de flujo del ejercicio de flexión-extensión cervical

Este diagrama corresponde al script *Level2SequenceManager*, encargado del ejercicio de flexión-extensión cervical.

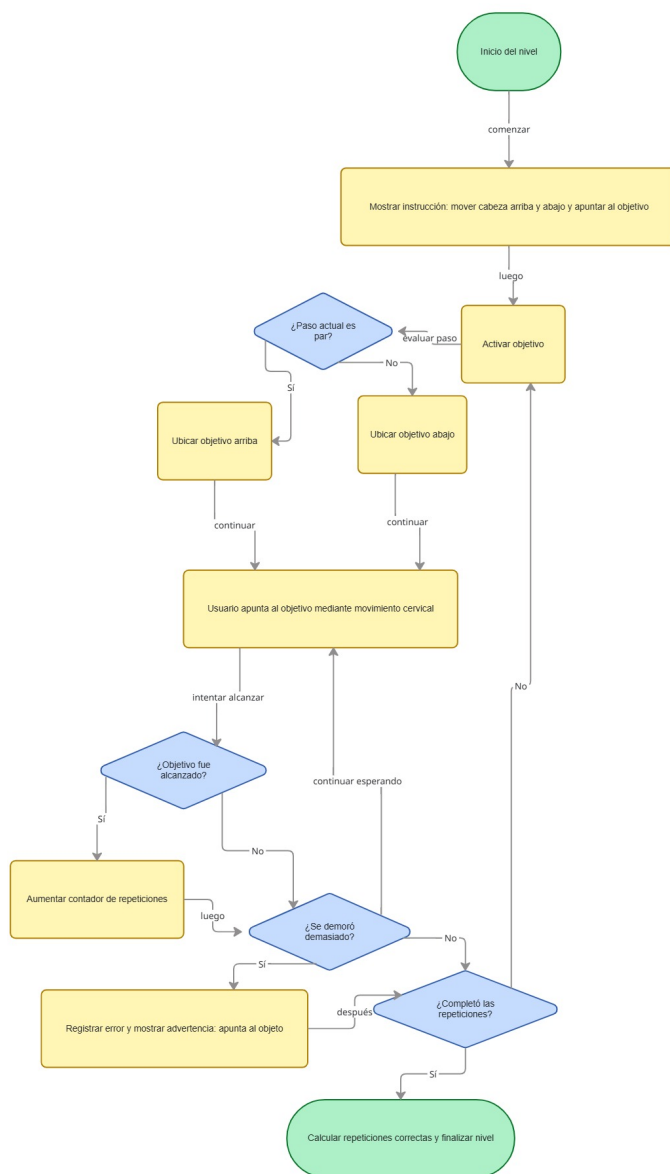


Figura 39: Diagrama de flujo del ejercicio de flexión-extensión cervical.

Anexo H. Diagrama de flujo del ejercicio de inclinación lateral cervical

Este diagrama representa la lógica del script *Level2TiltSequenceManager*, utilizado para el ejercicio de inclinación lateral cervical. movimiento.

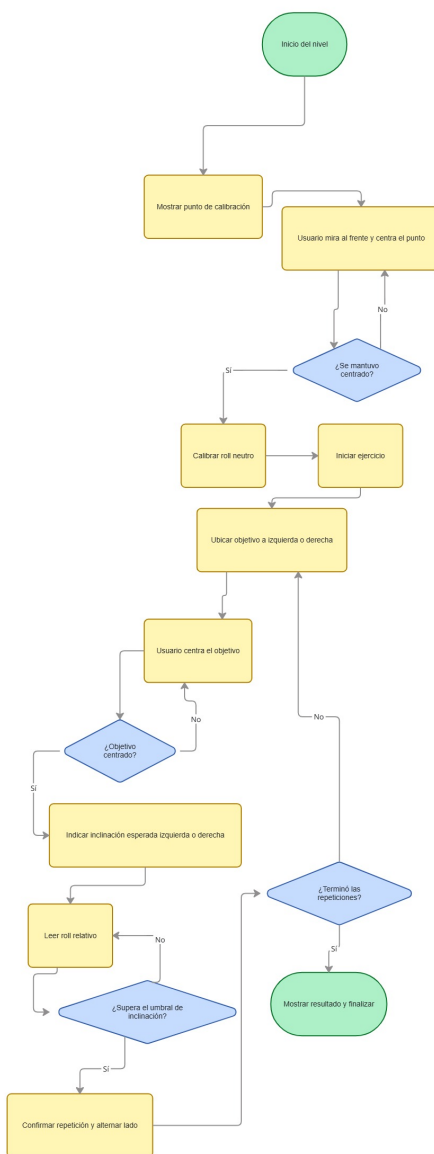


Figura 40: Diagrama de flujo del ejercicio de inclinación lateral cervical.

Anexo I. Diagrama de flujo del ejercicio de rotación cervical

Este diagrama corresponde al script *Level3TurnSequenceManager*, encargado del ejercicio de rotación cervical.

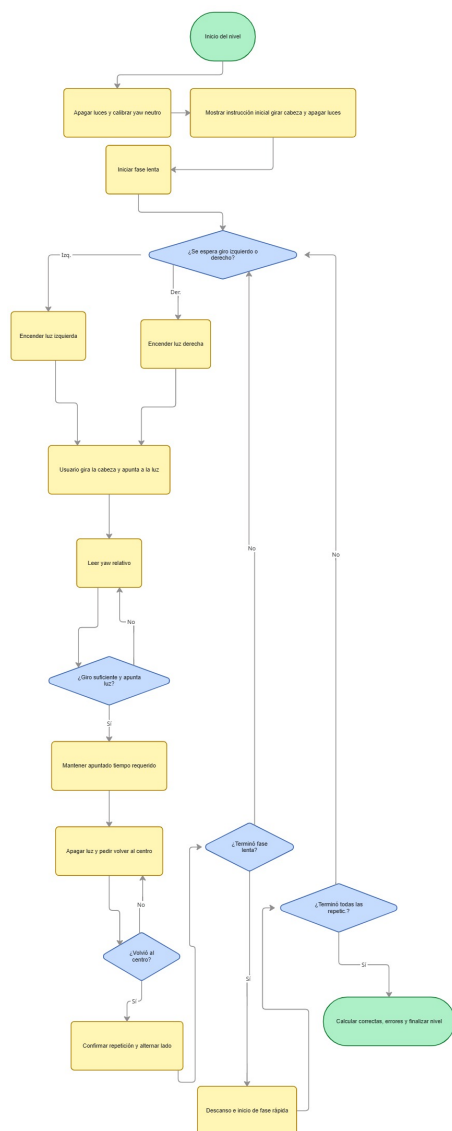


Figura 41: Diagrama de flujo del ejercicio de rotación cervical.

Anexo J. Diagrama de flujo del ejercicio funcional de agacharse

Este diagrama representa el script *Level3PickupSequenceManager*, correspondiente al ejercicio funcional de agacharse.

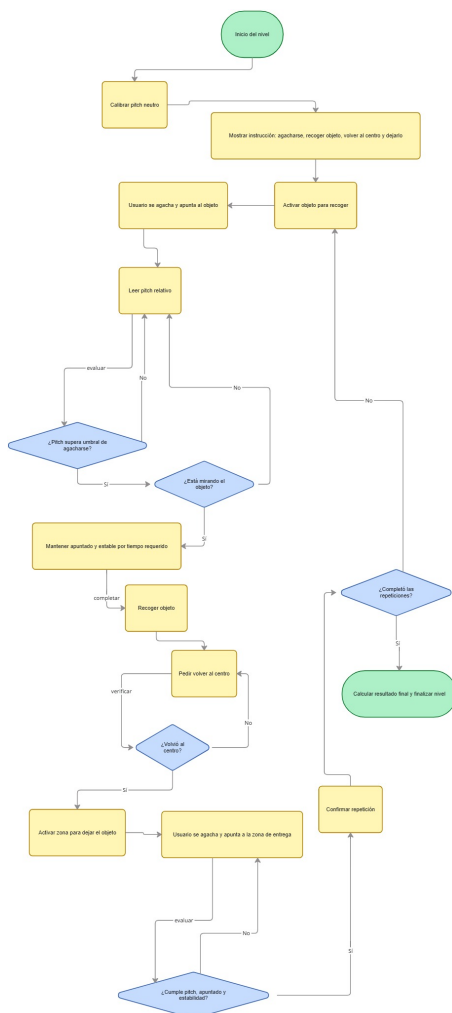


Figura 42: Diagrama de flujo del ejercicio funcional de agacharse.

Anexo K. Diagrama de flujo del control de cámara en PC

Este diagrama corresponde al script *MouseCameraLook*, utilizado para la simulación del prototipo en computador.

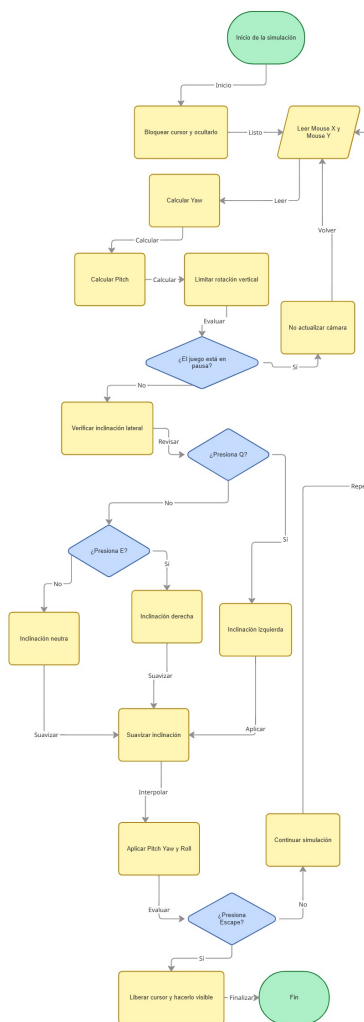


Figura 43: Diagrama de flujo del control de cámara en PC.

Anexo L. Diagrama de flujo del sistema de selección de niveles

Este diagrama corresponde al script *MenuNivelesManager*, encargado de gestionar la lógica de desbloqueo de niveles y la actualización de la interfaz de usuario. En este se incluye la inicialización del primer nivel, la verificación del estado de desbloqueo mediante almacenamiento local (*PlayerPrefs*) y la activación visual de botones, candados y estrellas según el progreso del usuario.

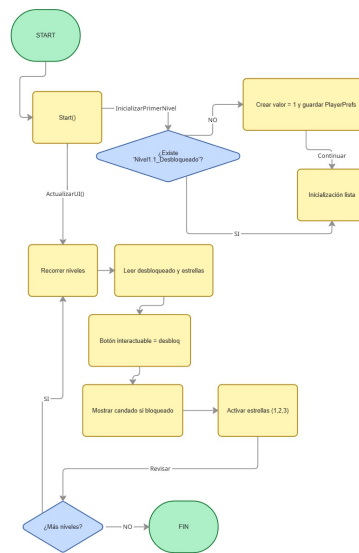


Figura 44: Diagrama de flujo de los niveles.

Anexo M. Diagrama de flujo del sistema de navegación entre escenas

Este diagrama corresponde al script *CambiarEscena*, el cual permite la navegación entre las diferentes escenas de la aplicación. Incluye funciones para acceder al menú de niveles, cargar escenas específicas según el nivel seleccionado y salir de la aplicación, facilitando la interacción del usuario con el sistema.

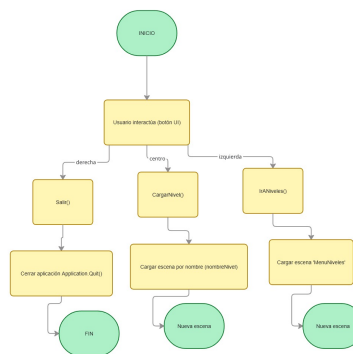


Figura 45: Diagrama de flujo de la interfaz.

4. Declaración de uso de Inteligencia Artificial

Durante el desarrollo del presente proyecto se utilizaron herramientas de inteligencia artificial (IA) como apoyo complementario en diferentes fases del proceso. Estas herramientas fueron empleadas para la elaboración de esquemas, diagramas e imágenes ilustrativas relacionadas con los procesos y sistemas propuestos, así como para apoyar la organización, estructuración y redacción de algunas partes del documento.

Es importante aclarar que el uso de dichas herramientas se limitó únicamente a un papel de apoyo instrumental. Las ideas principales, el planteamiento del problema, la formulación de los objetivos, el diseño conceptual y técnico del prototipo, la ejecución de los procedimientos experimentales, el análisis e interpretación de los resultados, así como la toma de decisiones durante el desarrollo del proyecto, corresponden al trabajo intelectual, criterio académico y formación en ingeniería biomédica de los autores.

En ningún momento las herramientas de IA reemplazaron el pensamiento crítico, la validación experimental ni el juicio técnico necesario para llevar a cabo un proyecto de esta naturaleza.

Todo el contenido desarrollado con apoyo de IA fue revisado, validado y ajustado antes de ser incluido en el documento final, garantizando su coherencia con los objetivos del proyecto, la veracidad de la información presentada y el cumplimiento de los estándares exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana Cali.

Referencias bibliográficas

- [1] Salazar-Salgado S, Escobar-Saltaren D, Cuartas-Escobar S, Calderón L, Posada-Borrero A, Henao S. Complementing Cross methodology with Human Centered Design approach: Application in the development of an assistive device. *Int J Ind Ergon.* 2025;105:103674.
- [2] National Center for Biotechnology Information. StatPearls Publishing. NCBI Bookshelf [Internet]. 2024 [citado 2026 May 9]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK441861/>

-
- [3] Han BI, Song HS, Kim JS. Vestibular rehabilitation therapy: review of indications, mechanisms, and key exercises. *Journal of Clinical Neurology*. 2011;7(4):184–196.
- [4] Brasure D. Virtual reality for VRT [Internet]. Vestibular Disorders Association; 2023 [citado 2026 May 9]. Disponible en: <https://vestibular.org>
- [5] Yeh SC, Wang PC, Hung YP, Chang CH, Chen S, Su MC, et al. An innovative VR-based vestibular rehabilitation system. *IEEE Healthcom*. 2012:213–217.
- [6] Bergeron M, Lortie CL, Guitton MJ. Use of virtual reality tools for vestibular disorders rehabilitation: a comprehensive analysis. *Advances in Medicine*. 2015;2015:916735.
- [7] Kim MK, et al. Efficacy of vestibular rehabilitation and its facilitating and hindering factors from real-world clinical data. *Frontiers in Neurology*. 2024;15:1329418.
- [8] Hazzaa NM, Manzour AF, Yahia E, Galal EM. Effectiveness of virtual reality-based programs as vestibular rehabilitative therapy in peripheral vestibular dysfunction: a meta-analysis. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*. 2023;280(7):3075–3086.
- [9] Dougherty JM, Carney M, Hohman MH, Emmady PD. Vestibular dysfunction. *StatPearls* [Internet]. 2023 [citado 2026 May 9]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK558926/>
- [10] Naciones Unidas. Objetivos de desarrollo sostenible [Internet]. [citado 2026 May 9]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [11] Young P, Castillo-Bustamante M, Almirón CJ, Bruetman JE, Finn BC, Ricardo MA, et al. Enfoque del paciente con vértigo. *Medicina (Buenos Aires)*. 2018;78(6):410–416.
- [12] Sinsamutpadung C, Kulthaveesup A. Comparison of outcomes of the Epley and Semont maneuvers in posterior canal BPPV: a randomized controlled trial. *Laryngoscope Investigative Otolaryngology*. 2021;6(4):866–871.
- [13] Vera Mandiola S. Rehabilitación vestibular: revisión de la literatura y propuesta de un protocolo de tratamiento. *Revista Médica de Chile*. 2007;135(9):1161–1170.
- [14] Gibson K, Johnson B, Rizzo A. Virtual reality as a clinical tool for vestibular rehabilitation: a review. *IEEE ICORR*. 2017:354–359.

- [15] Departamento Nacional de Planeación. Barreras de acceso a servicios de salud en Colombia [Internet]. [citado 2026 May 9]. Disponible en: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/portalDNP/desarrollo-social/infografia-barreras-acceso-salud.pdf>
- [16] Bible JE, Biswas D, Miller CP, Whang PG, Grauer JN. Normal functional range of motion of the cervical spine during 15 activities of daily living. *Journal of Spinal Disorders & Techniques*. 2010;23(1):15–21. doi:10.1097/BSD.0b013e3181981632.
- [17] Diego-Mas JA. Evaluación postural mediante el método REBA [Internet]. Ergonautas, Universidad Politécnica de Valencia; 2015 [citado 2026 May 9]. Disponible en: <https://www.ergonautas.upv.es/metodos/reba/reba-ayuda.php>
- [18] Swartz EE, Floyd RT, Cendoma M. Cervical spine functional anatomy and the biomechanics of injury due to compressive loading. *Journal of Athletic Training*. 2005;40(3):155–161.
- [19] Llamas L. Medir la inclinación con IMU, Arduino y filtro complementario [Internet]. Luis Llamas Ingeniería, informática y diseño; 2016 [citado 2026 May 9]. Disponible en: <https://www.luisllamas.es/medir-la-inclinacion-imu-arduino-filtro-complementario/>
- [20] Campos Mahecha AM, Rojas Herrera LM. Perfil de uso de sedantes vestibulares para el tratamiento de vértigo periférico en Colombia. *Acta Otorrinolaringol Cir Cabeza Cuello* [Internet]. 2025 [citado 2026 May 9];53(1):31–50. Disponible en: <https://revista.acorl.org.co/index.php/acorl/article/view/758>
- [21] Mora AB. Entrena tu sistema vestibular [Internet]. Mundo Entrenamiento; 2022 [citado 2026 May 9]. Disponible en: <https://mundoentrenamiento.com/entrena-tu-sistema-vestibular/>
- [22] Lecturio. Vías auditivas y vestibulares: anatomía [Internet]. Lecturio Medical Concept Library; 2025 [citado 2026 May 9]. Disponible en: <https://www.lecturio.com/es/concepts/vias-auditivas-y-vestibulares/>
- [23] de Waele C, Tran Ba Huy P. Anatomía de las vías vestibulares centrales. *Encyclopédie Médico-Chirurgicale* [Internet]. 2002 [citado 2026 May 9];20-038-A-10:1–24. doi:10.1016/S1632-3475(02)71988-7. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1632347502719887>

- [24] Verdecchia DH, Mendoza M, Sanguineti F, Binetti AC. Resultados tras la rehabilitación vestibular y terapia Wii® en pacientes con hipofunción vestibular unilateral crónica. *Acta Otorrinolaringol Esp.* 2014;65(6):339–345. doi:10.1016/j.otorri.2014.02.012.
- [25] Abbott Colombia. Ejercicios de rehabilitación vestibular [Internet]. Colombia: Abbott MedicinesPro; 2023 [citado 2026 May 9]. Disponible en: <https://co.medicinespro.abbott/wp-content/uploads/2023/09/Ejercicios-de-Rehabilitacion-Vestibular-compressed.pdf>
- [26] Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia. *Registros Individuales de Prestación de Servicios de Salud – RIPS* [Internet]. Bogotá: Datos Abiertos Colombia; [citado 2026 May 11]. Disponible en: https://www.datos.gov.co/Salud-y-Proteccion-Social/Registros-Individuales-de-Prestacion-de-Servicios-/4k9h-8qiu/about_data
- [27] Ortega Chasi PM, Vega Dawoud NF. *Impacto del cibermareo en la usabilidad de la realidad virtual en terapia y educación: una revisión sistemática* [Internet]. Cuenca: Universidad del Azuay; 2025 [citado 2026 May 11]. Disponible en: <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/16218>
- [28] Reyes Gilces DR, Vera Vera IL, Velez Marcillo PA. Efectividad de la fisioterapia vestibular como tratamiento del vértigo en adultos mayores funcionales. *JGH* [Internet]. 13 de noviembre de 2025 [citado 12 de mayo de 2026];2(3):706-4. Disponible en: <https://reincisol.com/ojs/index.php/JG-H/article/view/1168>
- [29] Garcia AP, Ganança MM, Cusin FS, Tomaz A, Ganança FF, Caovilla HH. Vestibular rehabilitation with virtual reality in Ménière’s disease. *Braz J Otorhinolaryngol* [Internet]. 2013 [citado 2026 May 11];79(3):366–374. Disponible en: <https://doi.org/10.5935/1808-8694.20130064>
- [30] A. Paniagua L., D. Bedoya R. y C. Mera, “Un método para la evaluación de la accesibilidad y la usabilidad en aplicaciones móviles”, *TecnoLógicas*, vol. 23, no. 48, pp. 99–117, 2020, doi: 10.22430/22565337.1553.
- [31] Leskovský R, Kučera E, Haffner O, Matišák J, Stark E. A contribution to workplace ergonomics evaluation using multimedia tools and virtual reality. In: 2019 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS). 2019.

-
- [32] Cooksey, F. S. Rehabilitation in Vestibular Injuries. Proceedings of the Royal Society of Medicine, 39(5), 273–278, 1946. DOI: 10.1177/003591574603900523
- [33] Aeronautics, N. & Administration, S. «Technology Readiness Assessment Best Practices Guide», Office of the Chief Technologist, Washington. (D,2020)
- [34] Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, Anexo 5. Technology Readiness Levels (TRL), 2014. [En línea]. Disponible en: https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/anexo5_7.pdf
- [35] HAS-Motion. Joint rotation: joint angle rotation matrix [Internet]. Visual3D Documentation; [citado 2026 May 13]. Disponible en: <https://has-motion.com/wiki/doku.php?id=visual3d>
- [36] OpenStax. Products of vectors [Internet]. University Physics Volume 1. OpenStax; [citado 2026 May 13]. Disponible en: <https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/2-4-products-of-vectors>
- [37] Esri. ATan2 function [Internet]. ArcGIS Pro Documentation; [citado 2026 May 13]. Disponible en: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/atan2-function.htm>
- [38] Google Developers. Develop for Cardboard: Unity quickstart [Internet]. Google for Developers; [citado 2026 May 13]. Disponible en: <https://developers.google.com/cardboard/develop/unity/quickstart?hl=es-419>
- [39] Brunnström K, Dima E, Qureshi T, Johanson M, Andersson M, Sjöström M. Latency impact on Quality of Experience in a virtual reality simulator for remote control of machines. Signal Processing: Image Communication. 2020;89:116005. doi:10.1016/j.image.2020.116005.
- [40] Google Developers. VR Performance best practices [Internet]. Google VR; 2019 [citado 2026 May 14]. Disponible en: <https://developers.google.com/vr/develop/best-practices/perf-best-practices>
- [41] Nielsen J. 10 usability heuristics for user interface design [Internet]. Nielsen Norman Group; 1994 [actualizado 2024 Jan 30; citado 2026 May 14]. Disponible en: <https://www.nngroup.com/articles/ten-usability-heuristics/>

- [42] Physiopedia. Cervical spine range of motion [Internet]. Physiopedia; [citado 2026 May 14]. Disponible en: https://www.physio-pedia.com/Cervical_Spine_Range_of_Motion
- [43] Biomec Limitada. BioPosture sistema de análisis postural: laboratorio de biomecánica [Internet]. Biomec; [citado 2026 May 14]. Disponible en: <https://www.biomec.com.co/bioposture-laboratorio-de-biomecanica.html>
- [44] CEI. ¿Qué es low poly? [Internet]. Madrid: CEI; s.f. [citado 2026 Jun 3]. Disponible en: <https://cei.es/que-es-low-poly/>