



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE MECATRÓNICA

DESARROLLO DE UNA INTERFAZ VR Y UN DISPOSITIVO
PORTABLE, ENFOCADOS A PERSONAS NO VIDENTES, PARA
GENERAR UNA RETROALIMENTACIÓN HÁPTICA, PERMITIENDO
IDENTIFICAR GEOMÉTRICAS 3D REGULARES

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES: CARLOS HERNÁN PINOS SUQUISUPA
JARLY STEVEN AÑASCO FREIRE

TUTOR: ING. FERNANDO PATRICIO URGILES ORTIZ Ph.D

Cuenca – Ecuador

2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Carlos Hernán Pinos Suquisupa con documento de identificación N° 0105197735 y Jarly Steven Añasco Freire con documento de identificación N° 0705297687; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Ciudad, 7 de agosto del 2022

Atentamente,



Carlos Hernán Pinos Suquisupa
0105197735



Jarly Steven Añasco Freire
0705297687

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Carlos Hernán Pinos Suquisupa con documento de identificación N° 0105197735 y Jarly Steven Añasco Freire con documento de identificación N° 0705297687, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Dispositivo tecnológico: “Desarrollo de una interfaz VR y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes, para generar una retroalimentación háptica, permitiendo identificar geometrías 3D regulares”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Ciudad, 7 de agosto del 2022

Atentamente,



Carlos Hernán Pinos Suquisupa
0105197735



Jarly Steven Añasco Freire
0705297687

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Patricio Fernando Urgiles Ortiz con documento de identificación N° 0102137593, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DESARROLLO DE UNA INTERFAZ VR Y UN DISPOSITIVO PORTABLE, ENFOCADOS A PERSONAS NO VIDENTES, PARA GENERAR UNA RETROALIMENTACIÓN HÁPTICA, PERMITIENDO IDENTIFICAR GEOMÉTRICAS 3D REGULARES, realizado por Carlos Hernán Pinos Suquisupa con documento de identificación N° 0104525837 y Jarly Steven Añasco Freire con documento de identificación N° 0705297687, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Dispositivos Tecnológicos que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Ciudad, 7 de agosto del 2022

Atentamente,



Ing. Patricio Fernando Urgiles Ortiz, Ph.D
0102137593

Este documento fue realizado enteramente en L^AT_EX

Índice

Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación	I
Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana	II
Certificado de dirección del trabajo de titulación	III
Resumen	XII
Abstract	XIII
1. Introducción	1
2. Problema	2
2.1. Antecedentes	2
2.2. Descripción del problema	4
2.3. Importancia y alcances	4
2.4. Delimitación	5
2.4.1. Espacial o geográfica	5
2.4.2. Temporal	5
2.4.3. Sectorial o institucional	5
2.5. Problema General	6
2.6. Problemas Específicos	6
3. Objetivos	6
3.1. Objetivo General	6
3.2. Objetivos Específicos	7
4. Hipótesis	7
4.1. Hipótesis General	7
4.2. Hipótesis Específicas	7
5. Marco Teórico	8
5.1. Dispositivos e interfaces enfocados a personas no videntes	8
5.1.1. Dispositivos enfocados a personas no videntes	9
5.1.2. Interfaces enfocados a personas no videntes	9

5.2.	Dispositivos e interfaces actuales del mercado	10
5.3.	Plataforma Unity	11
5.4.	Dispositivos de seguimiento de manos	12
5.4.1.	Dispositivo Leap Motion Controller	13
5.5.	Dispositivos electrónicos de realimentación háptica	14
5.5.1.	Actuadores hápticos inerciales	16
5.5.1.1.	Actuador háptico inercial: actuador lineal resonante (LRA) .	17
5.5.1.2.	Actuador háptico inercial: masa rotatoria excéntrica (ERM)	17
5.6.	Microcontrolador ESP32	17
6.	Marco metodológico	19
6.1.	Metodología de la Investigación	19
6.2.	Metodología del proceso	20
6.2.1.	Identificar los parámetros iniciales de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.	21
6.2.1.1.	Identificar los parámetros de funcionamiento del dispositivo Leap Motion Controller (LMC) y la plataforma de desarrollo UNITY	21
6.2.1.2.	Posición del dedo índice y relación de posición con la figura	25
6.2.1.3.	Medidas antropométricas de la mano para el diseño del dispositivo portable	26
6.2.2.	Diseñar una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.	27
6.2.2.1.	Diseño de la interfaz en la plataforma de desarrollo Unity .	27
6.2.2.2.	Dimensionamiento y diseño del dispositivo portable	36
6.2.3.	Implementar el diseño de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.	46
6.2.3.1.	Construcción del dispositivo portable	46
6.2.3.2.	Comunicación del dispositivo portable	52

6.2.4.	Comprobar el funcionamiento del diseño de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.	54
7.	Resultados	63
7.1.	Identificar los parámetros iniciales de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.	63
7.1.1.	Funcionamiento del dispositivo LMC	63
7.1.2.	Compatibilidad con la plataforma UNITY	64
7.1.3.	Especificaciones mínimas del ordenador	64
7.1.4.	Posición del dedo índice y relación de posición con la figura	64
7.1.5.	Medidas antropométricas de la mano	65
7.2.	Diseñar una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.	66
7.2.1.	Interfaz UNITY	66
7.2.2.	Resultados del diseño del dispositivo portable	68
7.3.	Implementar el diseño de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.	69
7.4.	Comprobar el funcionamiento del diseño de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.	71
7.4.1.	Deformación del rastreo de las figuras virtuales en el plano real	71
7.4.2.	Dificultad al momento de identificar las geometrías	74
8.	Conclusiones	75
9.	Recomendaciones	76

Referencias

84

ANEXOS

85

Lista de Tablas

- 1. Datos de consumo energético 38
- 2. Error relativo de las medidas antropométricas de la mano usadas para el diseño del dispositivo portable 65
- 3. Medidas obtenidas del cubo en diferentes escalas. 72
- 4. Matriz de consistencia lógica. 86
- 5. Continuación de la matriz de consistencia lógica. 87
- 6. Estimación de medidas antropométricas de la mano de personas con rangos de edades de 18 a 65 años 89

Lista de Figuras

1.	Rango de detección del dispositivo LMC	14
2.	Ilustración esquemática de las interfaces hápticas basadas en la fuerza, la temperatura y la estimulación nerviosa, y las cinco dimensiones psicológicas hápticas	15
3.	Actuadores ERM y LRA	18
4.	Distribución de los pines de la tarjeta de desarrollo ESP32-WROOM32 DevKit V1	19
5.	Diagrama de flujo del método de proceso.	20
6.	Área de trabajo del dispositivo LMC	22
7.	Panel de control	23
8.	Pasos para la importación de paquetes	24
9.	Carpeta de los paquetes a instalar	24
10.	Vista wireframe de un Voxel	25
11.	Funcionamiento de un <i>collider</i>	26
12.	Leap Hand Controller	28
13.	Hand Models	29
14.	Capsule Hand Left - Capsule Hand Right	30
15.	Rigid Round Hand L - Rigid Round Hand R	31
16.	Dato de la posición del dedo	32
17.	Script de control para colliders	33
18.	Escenas con las figuras a identificar	34
19.	Pantalla de inicio	34
20.	Gameobject para el control de escenas	35
21.	Audios ocupados en la aplicación	36
22.	Circuito Regulador de Voltaje	39
23.	Circuito partidor de tensión	40
24.	Circuito partidor de tensión	41
25.	Planteamiento del circuito del motor	42
26.	Circuito del motor	43
27.	Circuito de los LEDs RGB indicadores	43
28.	Circuito del dispositivo portátil	44
29.	Diseño de la PCB	45
30.	PCB finalizada	46

31.	Medidas de la mano de hombre y mujer	47
32.	Componentes	48
33.	Caja de protección	49
34.	Primer modelo del dedal	50
35.	Segundo modelo del dedal	51
36.	Tercer modelo del dedal	52
37.	Script Control de Comunicación Serial	53
38.	Gestor de tarjetas ArduinoIDE	54
39.	Librerías para conexión Bluetooth	54
40.	Comparación de la percepción de imágenes	55
41.	Estructura para modelar la figura deseada (Cubo)	56
42.	Contacto del dispositivo portable con la cara lateral del cubo	57
43.	Contacto del dispositivo portable con la cara frontal del cubo	57
44.	Respuesta del dispositivo háptico ante un contacto inexistente	58
45.	Respuesta del dispositivo háptico ante el ingreso del dedo índice en el volumen del cubo	59
46.	Respuesta del dispositivo háptico ante la aproximación del dedo índice al centro del cubo	59
47.	Pruebas de usuario de forma asistida	60
48.	Pruebas de usuario de forma independiente	60
49.	Comandos de accesibilidad - Comandos de voz	61
50.	Barra deslizante de escala	62
51.	Barra deslizante de sensibilidad	63
52.	Variable de salida 0	66
53.	Variable de salida 1	67
54.	Variable de salida 2	67
55.	Variable de salida 3	68
56.	Vistas del dispositivo portable	69
57.	Lectura de la mano respecto al eje z de la plataforma UNITY	70
58.	Lectura de la mano respecto al plano sagital de una persona	71
59.	Enumeración de las aristas de un cubo	72
60.	Toma de medidas antropométricas de la mano	88

Resumen

El presente trabajo de titulación se realizó con el objetivo de solventar una posible necesidad para las personas con discapacidad visual, específicamente abarca la identificación de figuras tridimensionales regulares virtuales por medio de la retroalimentación háptica de un dispositivo portable. Para el desarrollo se realizó una aplicación VR en UNITY en la cual se pueden importar librerías del dispositivo Leap Motion para el rastreo de las manos, a continuación se empezó con el diseño de los circuitos y la parte física que resguarda a estos. Una vez desarrollada la parte de software y hardware se realizó la conexión inalámbrica (Bluetooth) entre la aplicación y el dispositivo portable. Comprobado el funcionamiento se realizaron pruebas para determinar el volumen que proyecta la retroalimentación háptica sobre el espacio de trabajo del dispositivo Leap Motion, lo cual derivó en una interpretación casi perfecta de la geometría analizada. Durante las pruebas de usuario con personas no videntes se pudo establecer la dificultad presente al tratar de identificar una figura con un único punto de referencia como lo es la retroalimentación en el dedo índice derecho.

Palabras clave: Retroalimentación háptica, Leap Motion, Interfaz VR, UNYTY.

Abstract

This degree work was carried out with the aim of solving a possible need for impaired people, specifically covers the identification of regular virtual three-dimensional figures through haptic feedback from a portable device. For the development, a VR application was developed in UNITY in which libraries of the Leap Motion device can be imported for hand tracking, then we started with the design of the circuits and the physical part that protects them. Once the software and hardware were developed, the wireless connection (Bluetooth) between the application and the portable device was made. Once the operation was verified, tests were carried out to determine the volume projected by the haptic feedback on the workspace of the Leap Motion device, which resulted in an almost perfect interpretation of the analyzed geometry. During the user tests with blind people, it was possible to establish the difficulty present when trying to identify a figure with a single point of reference such as the feedback on the right index finger.

Keywords: Haptic feedback, Leap Motion, VR interface, UNYTY.

1. Introducción

A lo largo de las últimas décadas el mundo ha experimentado un desarrollo significativo en el ámbito tecnológico, aunque muchos de estos avances generalmente han sido enfocados únicamente para la gran mayoría de la población, sin tomar en cuenta los grupos de personas con capacidades especiales, no obstante, en los recientes años ya se ha podido evidenciar un interés creciente por el desarrollo de tecnologías o dispositivos que benefician a personas con capacidades diferentes. En consecuencia, muchos investigadores, desarrolladores de software empresas, gobiernos e incluso organizaciones sin fines de lucro han empezado a buscar de forma activa y progresiva nuevas tecnologías, dispositivos, herramientas o métodos que faciliten la inclusión social, ya sea en actividades cotidianas o que requieran un rol más activo en la sociedad, garantizando sobre todo el bienestar de las personas con capacidades especiales.

De esta manera el presente trabajo de titulación se enfocará en personas que presenten una deficiencia visual aguda, es decir, personas cuyo grado de discapacidad visual sea del 75% al 100%, para este tipo de deficiencia ya existen varios métodos y herramientas que hacen más fácil la vida diaria de las personas que la padecen, ya sea con el desarrollo de dispositivos de ayuda hasta investigaciones médicas que pueden mejorar o curar el problema visual. Tomando en cuenta únicamente las invenciones de carácter no médico se puede hallar un sinnúmero de herramientas y dispositivos, que van desde el más simple hasta el más complejo en los cuales ya se puede ver integrada a la electrónica o el desarrollo de software, especialmente en este último se encuentran una variedad de aplicaciones orientadas de manera específica a asistir a las personas que tienen algún grado de deficiencia visual.

Tomando en cuenta los precedentes mencionados, el trabajo se centrará en el desarrollo de una interfaz o entorno de realidad virtual (VR) y un dispositivo háptico portable que permitirá generar una retroalimentación háptica en el dedo índice del usuario, el entorno virtual proporcionará elementos tridimensionales regulares con dos modos de funcionamiento, de entrenamiento y prueba. El modo entrenamiento permite a los no videntes familiarizarse con las figuras interactuando de forma libre, sabiendo desde un inicio con que figura se está trabajando, en tanto que, con el modo prueba el usuario tratará de identificar una figura al azar sin saber de antemano con que figura se está interactuando. De esta manera se abarca el objetivo principal del trabajo de titulación, el cual es la identificación de figuras regulares tridimensionales, finalmente, en cuanto al desarrollo del proyecto, este partirá de la identificación de los parámetros iniciales, el diseño e implementación del diseño de la interfaz y del dispositivo háptico, por último, se realiza una comprobación de funcionamiento con usuarios que se encuentren en el rango de deficiencia visual ya mencionado.

2. Problema

2.1. Antecedentes

Según Rodríguez Fuentes (2005) cuando se refiere a todos los padecimientos graves del sistema visual, estas se pueden deber a diferentes causas, factores innatos o externos entre los cuales están: patológicos visuales, congénitas, perinatales o adquiridas, vejez, hormonales, intervenciones quirúrgicas o accidentes, etc. La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece como una deficiencia visual cuando luego de una oportuna corrección óptica, es inferior o igual a $1/3$. Rodríguez Fuentes (2005) señala que según la OMS la ceguera o la invidencia se define como “aquel estado caracterizado por la ausencia operativa de visión”. Para determinar la agudeza visual se ocupa la escala de Snellen, siendo los valores determinados $1/60$, $2/60$ y $3/60$. En esta representación fraccionaria se representa al numerador como la distancia a la que se sitúa un individuo; por otro lado, el denominador hace referencia al tamaño del optotipo percibido correctamente. La OMS distingue tres situaciones: ceguera profunda (estado que permite contar los dedos de una mano a una distancia de tres metros), ceguera casi total (permite el conteo de los dedos a una distancia menor a un metro) y ceguera total (cuando no tiene percepción de la luz).

La OMS (2021b) en su reporte indica que en niños pequeños el deterioro de la visión grave repercute en su desarrollo: motor, lingüístico, social y cognitivo. En tanto que, si se presenta en la vida escolar se puede traducir en un bajo rendimiento académico. Referente a los casos en la población adulta indica un decaimiento en su participación en el mercado laboral y su productividad; también se puede ver afectada su parte emocional sufriendo cuadros de depresión y ansiedad. En el caso de adultos mayores las posibles repercusiones se dan en la parte social donde este puede tratar de aislarse; así como, en su integridad física, pues esto conlleva a una dificultad al caminar e incrementa el riesgo de lesiones, caídas y fracturas. En todos los casos, se puede apreciar la influencia generada por esta deficiencia, la cual implica consecuencias que los afectarán por el resto de su vida.

Según García Solano (2018) existe un alto grado de inseguridad para las personas con discapacidad en el medio urbano. De ahí la necesidad de mejorar la accesibilidad de las personas que presenten discapacidad visual, basándose en metodologías de diseño centrado en el usuario (DCU) y ergonomía participativa. Lo que conlleva a la creación de una metodología específica, permitiendo generar un banco orientativo de proyectos para el desarrollo y materialización de iniciativas que aporten una transición entre el saber metodológico y el proyectual. En el mismo documento se cita a Paz y Szyszlican (2014) quienes mencionan que en la ISO

13407:1990 se definen cuatro actividades para el diseño centrado en el usuario “primero, entender y especificar el contexto de uso; segundo, especificar los requisitos de usuario; tercero, producir soluciones de diseño; y por último, evaluar los diseños”. De tal modo que un proceso de ergonomía participativa permita la fabricación de productos mediante una metodología de DCU, es decir, proyectos orientados en facilitar las actividades de su vida cotidiana.

Los dispositivos y herramientas tecnológicas en algunos casos pueden ayudar a mejorar la vida de las personas no videntes mientras que en otros casos les cambian totalmente la manera de vivir. Cuando se piensa en personas no videntes lo primero que se vislumbra es el braille, pero en la actualidad existen un sin número tecnologías capaces de solventar las barreras a las que se enfrentan las personas no videntes. El investigador de la universidad de Oxford Hicks (2014) señala que la ceguera es continua y en retrospectiva es lo mismo que la sordera, hay muchas personas con sordera profunda, pero la mayoría de las personas que usan audífonos solo necesitan que se les amplifique. Debido a esto desarrolló unas “Smart-Glasses” capaces de mejorar la visión de personas con deficiencia visual.

Las personas no videntes o con baja visión suelen tener problemas para desplazarse en entornos poco conocidos por ello el movimiento físico representa uno de los más grandes desafíos que tienen, ya que para poder movilizarse requieren de la ayuda de un guía dependiendo del grado de ceguera este puede ser una persona o un perro guía. En la actualidad las experiencias inmersivas de realidad virtual nos permiten explorar lugares y entornos sin necesidad de desplazarnos de un entorno físico determinado, pero estas se centran en la retroalimentación visual. Debido a esto los investigadores Ed Cutrell y Mike Sinclair desarrollaron el dispositivo Canetroller el cual consta de un controlador de bastón háptico que simula las interacciones con el bastón blanco, lo que permite a las personas con discapacidades visuales navegar por un entorno virtual transfiriendo sus habilidades con el bastón al mundo virtual (Ed Cutrell, 2020).

La mayoría de las personas durante un viaje en carro observan los paisajes o el panorama que cruza por las ventanas, tomando en cuenta esto la Ford Motor Company está trabajando en una tecnología única la cual permitiría a los pasajeros ciegos o parcialmente ciegos utilizar su sentido del tacto para disfrutar de los viajes. Una tecnología basada en inteligencia artificial para ventanas de automóviles. Según Kyle Johnson redactor en la revista electrónica The News Wheel nos dice que la ventanilla inteligente cuenta con un dispositivo que toma fotografías de los paisajes que pasan junto al vehículo, esas imágenes se trasladan al cristal inteligente LED mediante vibraciones. La intensidad de la vibración le da al pasajero una idea de lo que es visible alrededor del vehículo. (Johnson, 2020)

2.2. Descripción del problema

Las personas no videntes necesitan familiarizarse con su entorno, al realizarlo deben enfrentarse al reconocimiento de un sinnúmero de objetos y obstáculos. Por esto, es necesario que desde una edad temprana o desde el momento en que se perdió la capacidad visual la persona deba reconocer los elementos de su entorno. Normalmente se realiza mediante el uso de material didáctico especializado para personas con ceguera o por medio de una estimulación del tacto con elementos que los rodean.

En la actualidad hay muchos centros dedicados a esta área de enseñanza, los cuales cuentan con aulas de estimulación sensorial táctil, que por medio de diferentes actividades y materiales la persona con ceguera puede palpar y familiarizarse con diferentes texturas formas u objetos. Se debe tener en cuenta que este proceso de enseñanza conlleva varios factores como: el diseño, el tiempo, la disponibilidad, el espacio y principalmente el costo. Se requiere de una gran variedad de objetos para lograr un adecuada abstracción y aprendizaje por parte del individuo con ceguera lo que representa un gasto significativo.

En la definición de la realidad virtual (VR) se describe como un entorno (generado por un sistema informático) que puede emular una apariencia similar al mundo real, con el que se interactúa por medio de dispositivos visuales o de inmersión (Navarro, Martinez, y Martinez, 2018). Por lo tanto, los objetos o elementos virtuales, que son la alternativa de los elementos reales, para una persona no vidente, son objetos irreconocibles e indistinguibles sin un dispositivo que haga de interfaz entre el mundo virtual y el real por medio de una estimulación sensorial adecuada (siendo el tacto y oído los más utilizados).

2.3. Importancia y alcances

Tomando como referencia los datos publicados en enero de 2022 por el Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades (CONADIS) en Ecuador hay 54397 personas con discapacidad visual de las cuales 16082 personas tienen una discapacidad visual muy grave (grado de discapacidad de 75 a 84%) y 4928 personas con discapacidad severa (grado de discapacidad mayor o igual al 85%), teniendo así un total de 21010 personas con discapacidad visual aguda (CONADIS, 2022). La integración de este sector poblacional en la inclusión social resulta bastante complicada, y aunque existen una gran variedad de formas de interactuar para personas con este tipo de discapacidad. Algunos de estos métodos permiten crear un contacto directo con el mundo físico; sin embargo, presentan algunos limitantes, principalmente en el precio y disponibilidad. Si bien se logra una estimulación táctil, por medio de elementos personalizados, así como, elementos estandarizados elaborados de venta masiva, las personas

con ceguera terminan en una interacción estática con el elemento; en tanto que, si estos presentan algún método de interacción más dinámico su precio también se eleva acorde a las prestaciones brindadas.

Por lo cual, el uso de tecnologías o dispositivos que permitan generar una interfaz en la que el individuo con ceguera pueda interactuar con elementos virtuales 3D para la estimulación táctil, puede presentar una ventaja y aporte significativo respecto a los métodos convencionales actuales, en diversidad, flexibilidad, costo y disponibilidad con resultados similares. Debido a esto el desarrollo e implementación de dispositivos tecnológicos para personas no videntes es importante ya que representan una gran ventaja en la inclusión de personas no videntes. Para el presente trabajo de titulación se delimito el grupo objetivo al Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica (*GIIB*) de la Universidad Politécnica Salesiana, con el cual se pretende desarrollar una interfaz VR y un dispositivo portable que permita la retroalimentación háptica, enfocados a personas no videntes, para la interacción entre dicho entorno virtual y el usuario.

2.4. Delimitación

El problema de estudio se delimitará en las siguientes dimensiones:

2.4.1. Espacial o geográfica

El proyecto de titulación se desarrolló en las instalaciones del grupo objetivo: Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica (*GIIB*) de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca provincia del Azuay.

2.4.2. Temporal

El tiempo para la realización del proyecto de titulación se comprende desde el primero de marzo, mes en el cual fue aprobado el trabajo de titulación hasta la ultima semana del mes de Julio que indica la culminación del periodo académico 60 (2022-2022) de la universidad, siendo tiempo de trabajo de 5 meses.

2.4.3. Sectorial o institucional

El trabajo de titulación se realizó bajo la dirección del grupo de investigación GIIB y de los requerimientos planteados por la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca para el desarrollo y presentación de proyectos de titulación.

2.5. Problema General

- ¿Se puede desarrollar una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares?

2.6. Problemas Específicos

- ¿Se puede identificar los parámetros iniciales de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares?
- ¿Se puede diseñar una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares?
- ¿Se puede implementar el diseño de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares?
- ¿Se puede comprobar el funcionamiento del diseño de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares?

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

- Desarrollar una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.

3.2. Objetivos Específicos

- Identificar los parámetros iniciales de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.
- Diseñar una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.
- Implementar el diseño de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.
- Comprobar el funcionamiento del diseño de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.

4. Hipótesis

4.1. Hipótesis General

- Se desarrolló una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.

4.2. Hipótesis Específicas

- Se identificó los parámetros iniciales de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.

- Se diseñó una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.
- Se implementó el diseño de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.
- Se comprobó el diseño de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.

5. Marco Teórico

El desarrollo continuo de nuevas tecnologías ha dado origen a muchos dispositivos que nos hacen más fácil nuestra vida diaria, dispositivos móviles como el celular se han convertido en herramientas indispensables y de uso cotidiano, a tal manera que su uso se ha habituado en casi todas las sociedades del planeta. De la misma manera se han desarrollado un sinnúmero de tecnologías capaces de habituarse en la vida diaria de personas con discapacidades, tal es el caso de las personas con ceguera. A nivel mundial, al menos 2.200 millones de personas tienen una discapacidad visual de cerca o de lejos. La mayoría de las personas con discapacidad visual y ceguera tienen más de 50 años; sin embargo, la pérdida de la visión puede afectar a personas de todas las edades (OMS, 2021a).

5.1. Dispositivos e interfaces enfocados a personas no videntes

Las tecnologías de asistencia para las personas ciegas están experimentando un rápido crecimiento, proporcionando herramientas útiles para apoyar las actividades diarias y mejorar la inclusión social. La mayoría de estas tecnologías se centran principalmente en ayudar a las personas ciegas a navegar y evitar obstáculos. Otros trabajos enfatizan en brindarles asistencia para reconocer los objetos que los rodean. Muy pocos de ellos, sin embargo, combinan ambos aspectos (Mekhalfi y cols., 2016).

Se puede identificar una diversa gama de posibilidades para ayudar a las personas que padecen ceguera como: mapas interactivos (Ducasse, Brock, y Jouffrais, 2017), dispositivos

de sustitución sensorial (Wall y Brewster, 2006), aplicaciones móviles en las que se presta asistencia en tareas cotidianas por parte de personas videntes voluntarias (Salam, 2019),

5.1.1. Dispositivos enfocados a personas no videntes

Entre la variedad de dispositivos, el dispositivo háptico más común es el bastón para no videntes, el cual consiste en una vara alargada, acorde a la necesidad de cada persona. Su finalidad consiste en permitir a las personas ciegas o con deficiencia visual desplazarse con mayor seguridad debido a que les proporciona un espacio personal, permitiendo adquirir información sobre las irregularidades del suelo, identificar los obstáculos en su camino o peatones (Guerrón, 2018). Con el paso de los años se han ido adaptando tecnologías de ultrasonido (Elchinger, 1982; Salat y Habib, 2019), sensores infrarrojos e incluso en algunos casos tecnologías láser (Guerrón, 2018). Además, se tiene a los dispositivos de estimulación acústico y hpto-acústica que provocan sonidos o vibraciones que alertan al usuario de la proximidad de los objetos. El trabajar con dos sentidos permite interiorizar la información y ayuda en el aprendizaje (Guerrón, 2018).

Otro tipo de dispositivos son los de sustitución sensorial, que, como su nombre lo indica ocurre cuando se ocupa un sentido para sustituir a otro cuya funcionalidad se ha deteriorado (Wall y Brewster, 2006). El proceso consiste en captar a información por medio de un sensor artificial, para luego traducirlo en un estímulo físico que se pueda interpretar de manera adecuada por el cerebro. Entre los mecanismos de sustitución sensorial más utilizados se hallan los que se basan en una estimulación auditiva, táctil o una combinación: dispositivos de sustitución sensorial Electro-Táctil, dispositivos de estimulación Hápto-Acústico, etc. (Kajimoto, Suzuki, y Kanno, 2014).

Entre los dispositivos más avanzados se presentan los sistemas de visión artificial. Estos usan una cámara de video para la adquisición, procesamiento y análisis de imágenes en tiempo real con lo cual envían señales táctiles o auditivas como retroalimentación (Costa, Gusberti, Graffigna, Guzzo, y Nasisi, 2007; Poggi y Mattoccia, 2016; Schwarze y cols., 2015).

5.1.2. Interfaces enfocados a personas no videntes

El desarrollo de software o interfaces ha hecho que el uso de entornos virtuales como herramientas de asistencias sea bastante común, las aplicaciones móviles tampoco se quedan atrás, pues estas también pueden ayudar a las personas con deficiencia visual o no videntes, desde realizar tareas cotidianas, hasta opciones de accesibilidad que facilitan el uso de los mismos dispositivos móviles.

Mientras que por otro lado las interfaces con entornos virtuales nos permiten generar espacios ficticios o basados en la realidad en los que se puede modelar, animar, explorar o manipular el entorno, según Richard, Tijou, Richard, y Ferrier (2006), afirman que la realidad virtual es una tecnología que hace referencia a entornos generados por ordenador, interactivos y tridimensionales en los que se sumergen los usuarios, o que añaden información gráfica al entorno natural percibido que se actualiza según los movimientos y posición del usuario. Sin embargo los entornos virtuales por lo general no ofrecen los mismos beneficios que una aplicación móvil.

La integración de dispositivos electrónicos e interfaces ha dado origen a aplicaciones como la de Picinali, Afonso, Denis, y Katz (2014) ellos implementaron un dispositivo que usaba un joystick regular para navegar en un entorno virtual que representaba un pasillo el cual conducía a algunas habitaciones, así como a varios objetos y sonidos virtuales en 3D (música, voces, etc). Para resumir la aplicación se centraba principalmente en la comprensión de un espacio arquitectónico, y no de las fuentes de sonido en el espacio.

De esta manera es fácil darse cuenta lo variado que es el desarrollo de software orientado a la asistencia de personas no videntes ya sea de manera personal o impersonal, iniciativas únicamente de software o integradas a dispositivos electrónicos.

5.2. Dispositivos e interfaces actuales del mercado

Con el avance de la ciencia estos últimos años y el incremento del interés en lograr una interacción con el mundo virtual, para fines de asistencia, aprendizaje o entretenimiento, se han desarrollado varias tecnologías. El uso de tecnologías hápticas ha permitido desarrollar dispositivos que producen una estimulación sensorial táctil, estos dispositivos se pueden clasificar en interfaces hápticas basadas en contacto, interfaces hápticas de recubrimiento, interfaces hápticas de adherencia a la piel, interfaces hápticas Mid-Air e interfaces neuro hápticas (Yang y cols., 2021), entre los cuales destacan los dos primeros. Además, existen interfaces basadas únicamente en software (aplicaciones) que permiten una asistencia virtual, por algoritmo o una persona externa (Guerrón, 2018).

Dentro de las interfaces basadas en software se pueden encontrar aplicaciones móviles como Be My Eyes, que conectan mediante vídeo llamada a personas ciegas o con baja visión, con personas videntes voluntarias, con la finalidad de ayudarlos a realizar tareas cotidianas Salam (2019). También, se tiene asistentes de voz como Siri, Alexa o Cortana que tienen funciones que facilitan el uso de diferentes dispositivos electrónicos especialmente en los que se ejecutan dichos asistentes (S., Arun, Joseph James, y Selvakumarasamy, 2021).

El aumento generalizado de pantallas táctiles ha hecho que entre los dispositivos hápticos basados en contacto se destaquen los que proporcionan una interacción mediante pantallas hápticas. Entre estos dispositivos podemos encontrar opciones como: HAP2U perteneciente a la empresa del mismo nombre y Touch3D (Yang y cols., 2021). El primero, HAP2U (Vezzoli y Chappaz, 2020) es una pantalla que permite tener una interacción de contacto con algún dispositivo que la tenga integrada (computador, smartphone, máquinas, etc.), esto lo realiza mediante el uso de sensores piezoeléctricos, Brown (2019) indica en un artículo para Electronics360 que: "La tecnología diversifica entonces las sensaciones táctiles, como las muescas suaves, los botones, la elasticidad y otros tipos de texturas, para que cada aplicación pueda ser personalizada". En tanto que, Touch3D presenta un funcionamiento parecido al de HAP2U, es decir, una interacción por medio de una pantalla que puede producir sensaciones táctiles; sin embargo, se diferencia en el uso de tecnologías que aplica, en este caso se usa pantallas automultiscópicas 3D y pantallas electro-vibratorias (Kim y Shin, 2017).

Weareable Haptic Interfaces o interfaces hápticas portables son dispositivos que se pueden vestir (colocar o usar) en diferentes partes del cuerpo, hasta el momento, pueden recubrir manos (Hand-Worn Haptic Device), pies (Foot-Worn Haptic Device) o torso (Vest-Worn Haptic Device) (Yang y cols., 2021). En el caso de estudio se ha realizado una búsqueda de dispositivos cuyo uso se realiza en las manos, entre estos podemos encontrar el DEXMO perteneciente a la empresa DEXTAROBOTICS (Xiaochi, 2019), PLEXUS perteneciente a la empresa del mismo nombre (Hogbin, 2019), estos dispositivos permiten la interacción con un entorno virtual dedicado, presentando una emulación de agarre de diferentes objetos y restricción de movimientos al interactuar con estos. Ambos dispositivos presentan un funcionamiento a base de sensores de flexión que producen las sensaciones indicadas anteriormente.

5.3. Plataforma Unity

Desde las primeras computadoras hasta las más actuales se han desarrollado un sinnúmero de lenguajes de desarrollo o mejor conocidos como Lenguajes de programación, Ferrer Martínez (2015) los define como un lenguaje formal diseñado para expresar procesos que pueden ser llevados a cabo por máquinas como las computadoras. Pueden usarse para crear programas que controlen el comportamiento físico y lógico de una máquina, para expresar algoritmos con precisión, o como modo de comunicación humana. Con el paso del tiempo también se han desarrollado de forma paralela muchos entornos de desarrollo los cuales facilitan el uso de los lenguajes de programación, el autor Casado Iglesias (2015) los define como: "Un entorno de desarrollo integrado o IDE (Integrated Development Environment) es un programa informático

que tiene el objetivo de asistir al programador en la tarea de diseñar y codificar un software mediante la inclusión de múltiples herramientas destinadas para dicha tarea”.

Para el desarrollo de software se requiere de un lenguaje de programación y un entorno de desarrollo integrado (IDE), pero, aún detrás de estos conceptos hay un fundamento teórico sólido y complejo que se ha ido desarrollando desde el nacimiento del primero computador, e incluso antes. No obstante, falta entender el papel que cumplen las interfaces, a estas se las puede definir como una zona de frontera entre el mundo real y el virtual. También se debe diferenciar entre las interfaces de usuarios y las interfaces gráficas de usuarios, respectivamente. Las interfaces de usuario (UI) son interfaces que permiten interactuar con el programa por medio de dispositivos como: el mouse, el teclado, controles de juegos, etc. En tanto que, las interfaces gráficas de usuario (GUI) presentan una interacción mediante botones de pantalla, menús desplegable e iconos que forman parte de la interfaz gráfica (Godbold, 2018).

Entre las plataformas de desarrollo más utilizadas se encuentra Unity (Dominguez Diaz, Navarro Pulido, y Castro Gonzalez, 2017), aunque su principal campo es el desarrollo de juegos, también se lo aplica en varios campos como: Automoción, transporte, manufactura, cine animación, cinematografía, arquitectura, construcción e ingeniería (Menard y Wastaff, 2015; Unity, 2022). El uso de esta plataforma de desarrollo se debe a características como una interfaz amigable y un sencillo ambiente de desarrollo (Menard y Wastaff, 2015), versiones gratuitas, tienda de recursos y su capacidad de compilación multiplataformas (Dominguez Diaz y cols., 2017). Las plataformas para las que permite realizar desarrollar interfaces son: MAC, Linux, Windows, OS X, XBOX ONE, ANDROID, IOS, PS4, PS5, Magic Leap, entre otras (Menard y Wastaff, 2015; Ruelas, 2019; Unity, 2022).

5.4. Dispositivos de seguimiento de manos

La interacción del ser humano con el mundo que lo rodea se da de maneras variadas, tanto por medio del cuerpo como de los sentidos que este posee, como: el tacto (el cual abarca todos los receptores sensitivos en la piel), audición, vista, olfato y gusto. Ahmad, Migniot, y Dipanda (2019) señalan que:

"La gran mayoría de las actividades humanas en la vida cotidiana son interactivas. Algunas de las tareas interactivas básicas son la navegación, la manipulación y los gestos. Por ejemplo, las personas se apoyan en el plano de tierra, navegan en entornos complejos y evitan obstáculos. También usan sus manos y dedos todo el tiempo en una gran cantidad de tareas, ya sea para comunicarse con otras personas

(mediante gestos comunicativos) o para interactuar con el mundo físico que los rodea (por ejemplo, tocan, empujan, tiran, levantan, agarran, sostienen, manipulan, sueltan y arrojan objetos a su alrededor). Además, el uso colaborativo y la fuerte interacción de ambas manos también es muy común. Esto sugiere que el movimiento y la interacción con el medio ambiente están fuertemente entrelazados." (p.35-49)

La captura de movimiento es una práctica que se ha explotado en numerosos campos, pero particularmente en el análisis biomecánico de poblaciones deportivas y clínicas (Houston, Walters, Corbett, y Coppack, 2021). En la actualidad, el avance tecnológico en el campo de la computación ha permitido captar estas interacciones por medio de una cámara o de sensores.

El seguimiento de las manos (hand tracking) se basa en el análisis del movimiento que dependen directamente de las señales detectadas, señales asociadas a las manos. Respecto al monitoreo del seguimiento se puede clasificar entre con contacto y sin contacto (Chen y cols., 2020). Los dispositivos de monitorización con contacto principalmente ocupan sensores flexibles que cubren la mano, mayormente utilizados a manera de guantes o en tecnologías de sistemas micro electromecánicos basados en IMMU (Inertial and Magnetic Measurement Unit - Unidad de medición inercial y magnética) (Shen y cols., 2021). Por otro lado, los dispositivos sin contacto obtienen los movimientos de la mano en su estado natural sin interferencia. Algunas de las posibilidades actuales son mediante marcado óptico, visión de máquina o visión artificial, ultrasonido, magnético, entre otros (Shen y cols., 2021).

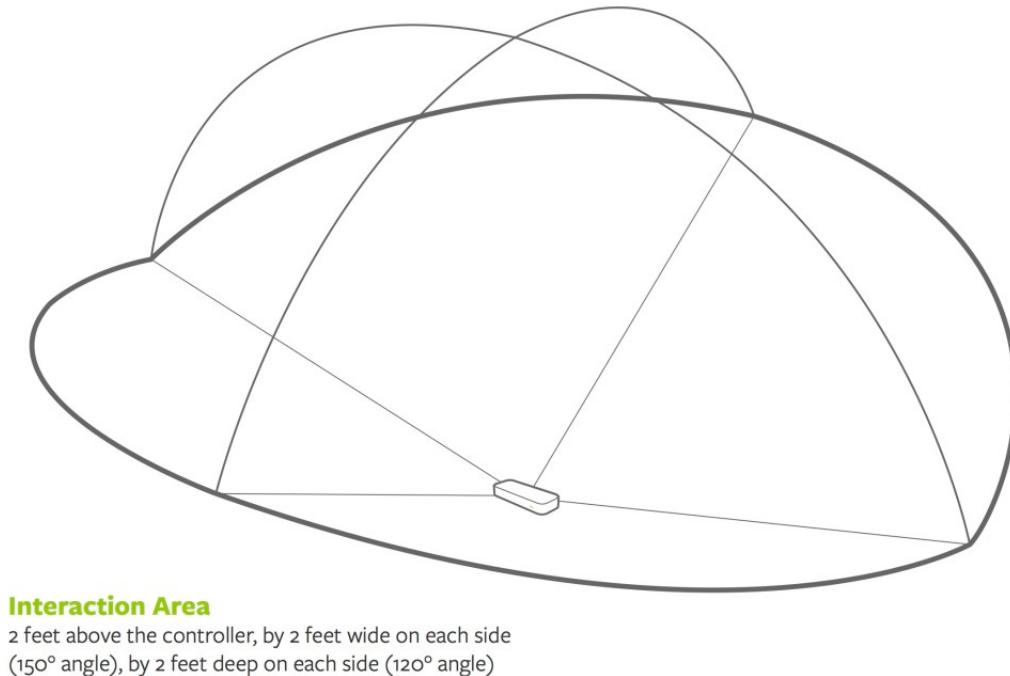
5.4.1. Dispositivo Leap Motion Controller

Leap Motion Controller (LMC) es un dispositivo de seguimiento de manos que pertenece a la empresa Ultraleap, el corazón del controlador son dos cámaras con lentes de gran ángulo que se utilizan para crear una amplia zona de interacción dentro de la cual se pueden detectar las manos del usuario y unos LEDs infrarrojos que rastrean la luz infrarroja a una longitud de onda de 850 nanómetros, que está fuera del espectro de luz visible, los LEDs pulsan en sincronización con la frecuencia de la cámara, lo que permite un uso de energía significativamente menor y una mayor intensidad. El dispositivo controlador tiene una zona de interacción que se extiende desde 10cm hasta 60cm o más, extendiéndose desde el dispositivo en un campo de visión típico de 140x120°(Ultraleap, 2020).

El alcance o rango de detección está limitado por la propagación de la luz LED emitida por los LEDs infrarrojos en el espacio, ya que a partir de cierta distancia es mucho más difícil deducir la posición de la mano en el espacio tridimensional. Mientras que la intensidad de

Figura 1

Rango de detección del dispositivo LMC



Nota: Se puede observar el espacio de trabajo del dispositivo LMC, de acuerdo a (Ultraleap, 2020).

la luz LED emitida está limitada en última instancia por la corriente máxima que se puede extraer a través de la conexión USB (Ultraleap, 2020).

5.5. Dispositivos electrónicos de realimentación háptica

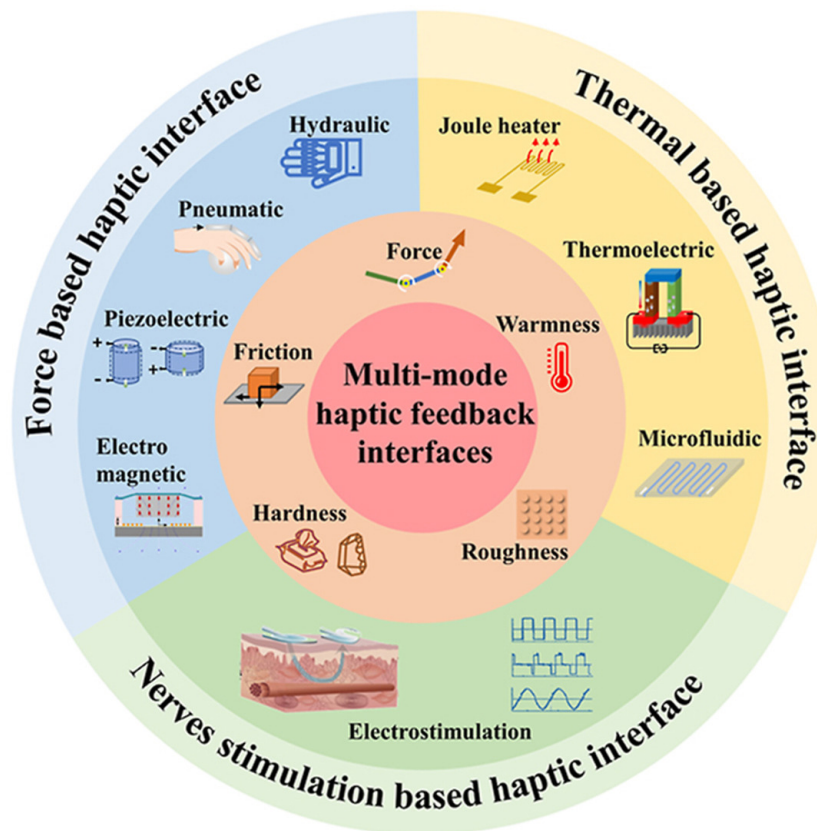
Los dispositivos electrónicos que producen una estimulación sensorial táctil buscan proporcionar una aproximación a situaciones reales. “El procesamiento de la información táctil forma parte del desarrollo humano, para diferenciar y proteger nuestro cuerpo del mundo exterior (...) No es de extrañar, pues, que el procesamiento táctil se desarrolle y alcance su plena funcionalidad mucho antes que otras modalidades sensoriales” (Gallace, 2015, p.14-19).

Al indagar entre los dispositivos que permiten este tipo de estimulación se debe diferenciar los conceptos tacto y percepción háptica. Referente al tacto se puede describir como un estímulo proporcionado en cualquier parte del cuerpo. Con háptica se define a un sistema de percepción, que se da por una sinergia entre el subsistema cutáneo y el cinestésico, que

permite una exploración manual activa. A diferencia de los sentidos de la vista y audición, los cuales adaptan la información espacial-temporal de forma concisa, el sistema háptico procesa características físicas de superficies u objetos de manera precisa. Es decir, la percepción háptica se puede generar aún cuando objetos externos, estáticos o en movimiento, actúan sobre la piel (Huang y cols., 2021; Lederman y Klatzky, 2009).

Figura 2

Ilustración esquemática de las interfaces hápticas basadas en la fuerza, la temperatura y la estimulación nerviosa, y las cinco dimensiones psicológicas hápticas



Nota: La figura muestra la clasificación de los tipos de dispositivos de realimentación háptica, según (Huang y cols., 2021).

Definidos los conceptos anteriores se puede entender el uso de los dispositivos de realimentación háptica en aplicaciones que permiten simular fenómenos como: fuerza, fricción, dureza, rugosidad, temperatura, etc. (Huang y cols., 2021) Estos fenómenos se pueden producir mediante interfaces hápticas basadas en la fuerza, estimulación de nervios y de base térmica. Las interfaces hápticas basadas en la fuerza son dispositivos (típicos sistemas mecánicos)

que aplican una fuerza en la piel y músculos lo que emula la interacción con el objeto real (Yu y cols., 2019). Las interfaces hápticas de base térmica simula la sensación de un cambio de temperatura del objeto virtual en la piel (Lee, Kim, Sul, y Ko, 2021). Por otro lado, las interfaces hápticas basadas en estimulación de nervios transmiten señales al cerebro excitando los nervios humanos mediante pulsos de corriente eléctrica, esto también se puede definir como una realimentación pseudo-háptica (Saal, Delhaye, Rayhaun, y Bensmaia, 2017).

Las interfaces hápticas basadas en la fuerza pueden proporcionar una sensación de agarre o ubicación de un objeto en el espacio. Los fundamentos básicos para este tipo de interfaces son: hidráulicos, neumáticos, piezoeléctricos y electro-magnéticos (Huang y cols., 2021); estos dos últimos se acoplan mejor a la condición de seguimiento de superficies de figuras geométricas.

Las interfaces hápticas piezoeléctricas producen una fuerza externa en la piel como realimentación háptica por medio de un actuador piezoeléctrico capaz de transformar energía eléctrica en desplazamientos mecánicos o tensión (Sorgini y cols., 2017; Yeh y cols., 2020). La realimentación háptica producida por estos dispositivos radica en la generación de una vibración, que presenta una velocidad de respuesta considerable. Una desventaja es la limitación de percepción que se genera, esto debido a que no permite emular otras sensaciones como texturas, rugosidades, entre otras. Actualmente existen varias posibilidades en lo referente a materiales bases para dispositivos piezoeléctricos usados en sensores, actuadores transductores y otros sistemas micro electro-mecánicos, MEMS por sus siglas en inglés (Huang y cols., 2021).

Las interfaces hápticas electro-magnéticas realizan una realimentación háptica por medio de presión o vibración (Martínez, García, Oliver, Molina, y González, 2016; Ozioko, Karipoth, Hersh, y Dahiya, 2020). Estos dispositivos presentan una ventaja en el tiempo de respuesta comparado con las interfaces hápticas hidráulicas y neumáticas, mientras que, respecto a las interfaces hápticas piezoeléctricas tiene una mayor desplazamiento de la fuerza y resistencia táctil (J. Zarate y Shea, 2016; J. J. Zarate, Gudozhnik, Ruch, y Shea, 2017). Como desventaja se puede señalar que los actuadores electromagnéticos presentan una dimensión mayor a la de los piezoeléctricos y una reducida frecuencia de funcionamiento (Huang y cols., 2021).

5.5.1. Actuadores hápticos inerciales

Este tipo de actuadores piezoeléctricos son comúnmente usados desde el acelerado desarrollo de los celulares, ya que forman parte integra del sistema de vibración de los mismos, pero aun existen algunas limitaciones en cuanto al desarrollo de este tipo de actuadores, Motola Barnes (s.f.) menciona que: "lo que se espera de un actuador háptico es que ocupe el menor espacio posible, sea flexible y adaptable". Entre los actuadores piezoeléctricos, y los actuadores

hápticos más tradicionales se puede encontrar a los motores de masa giratoria excéntrica (ERM), y actuadores resonantes lineales (LRA) o mas comúnmente llamados motores tipo moneda.

5.5.1.1. Actuador háptico inercial: actuador lineal resonante (LRA)

Este otro tipo de actuador inercial también se utiliza en algunos smartphones para la háptica y las alertas por vibración. El LRA tiene una construcción mecánica diferente a la del ERM, ya que consta de una masa montada en un muelle y vibra con un movimiento lineal. Cuando se aplica un voltaje al motor, causa que la bobina se comporte como un imán (debido al campo electromagnético generado) esto hace que la masa sea atraída o repelida. Este suele tener un tiempo de arranque un poco menor que el ERM, dependiendo del fabricante puede tener tiempos de encendido de entre 40 y 60ms (Ali y Liu, 2020; Rao, 2012).

5.5.1.2. Actuador háptico inercial: masa rotatoria excéntrica (ERM)

Este tipo de actuador es la tecnología háptica más antigua y mas desarrollada que se puede hallar en el mercado. Cuando se piensa en cualquier dispositivo con vibración, ya sea un celular o un mando de alguna consola de videojuego, las vibraciones son probablemente causadas por un motor ERM (Eric, 2011). Sus vibraciones se producen cuando se le aplica un voltaje positivo lo que hace que empiece a girar, produciendo vibraciones debido a su masa excéntrica. El tiempo de arranque (tiempo que tarda el motor en alcanzar el 90% de la aceleración nominal) suele oscilar entre 50 y 100 ms siendo estos tiempos similares tanto para el arranque como para el detenimiento del mismo (Rao, 2012).

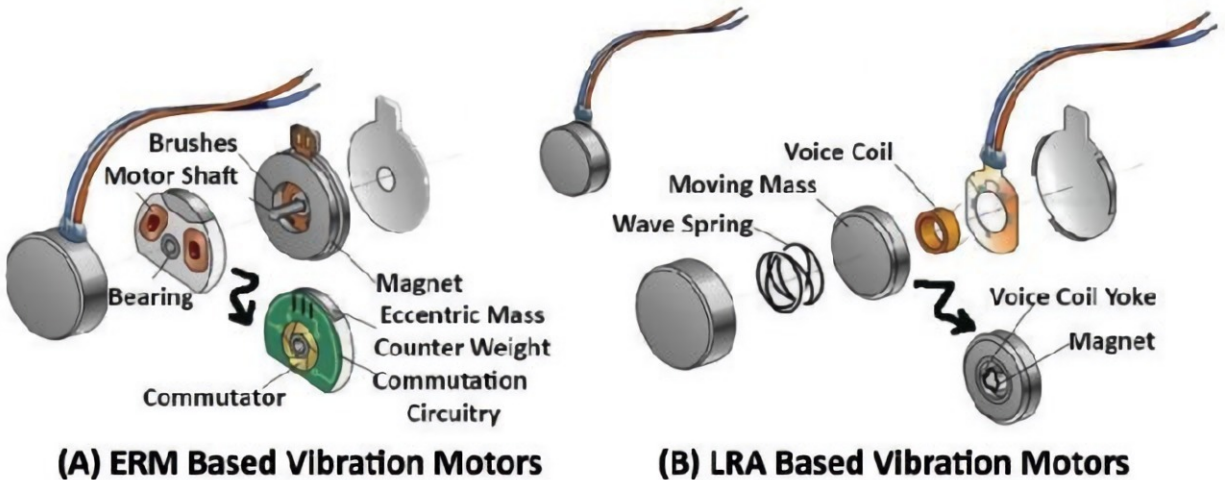
5.6. Microcontrolador ESP32

Según lo expresado por el autor Dogan (2008) "Los microcontroladores son computadoras en un solo chip que poseen una Unidad Central de Procesamiento (CPU, Central processing unit), memoria de programa y de datos, puertos de entrada/salida (E/S) serie y paralelo, temporizadores e interrupciones internas y externas, (...), además, son dispositivos programables, un programa es una secuencia de instrucciones que le indican al microcontrolador lo que debe realizar".(p.IX)

En la actualidad se ha hecho de uso extendido el desarrollo electrónico en tarjetas de desarrollo que ya traen integradas unidades de microcontrolador (MCU), tal es el caso del microcontrolador ESP32-WROOM 32 DevKit-V1, el cual es un potente módulo MCU genérico con Wi-Fi y Bluetooth integrado, que se dirige a una amplia variedad de aplicaciones. El

Figura 3

Actuadores ERM y LRA



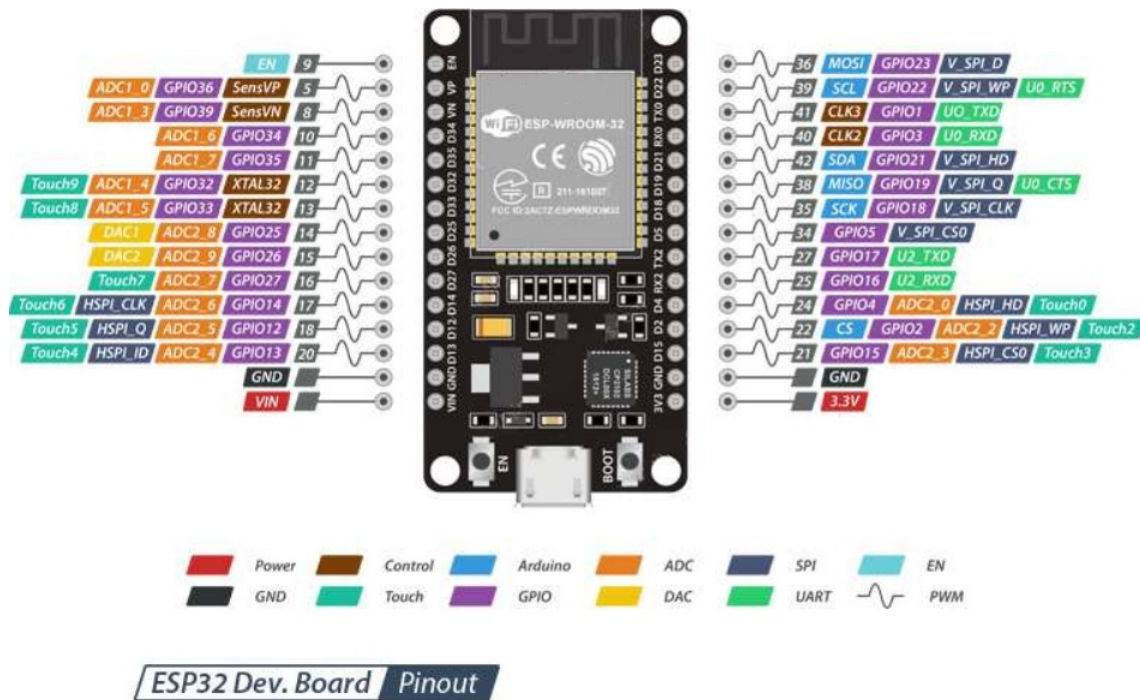
Nota: La figura muestra los dos tipos de actuadores hápticos inerciales, de acuerdo con (Ali y Liu, 2020).

núcleo de este módulo es el chip ESP32-D0WDQ6*, el mismo que, está diseñado para ser escalable y adaptable. Dispone de dos núcleos de CPU que pueden controlarse individualmente con una frecuencia de reloj ajustable de 80 MHz a 240 MHz. El chip también cuenta con un coprocesador de bajo consumo que puede utilizarse en lugar de la CPU para ahorrar energía mientras se realizan tareas que no requieren mucha potencia de cálculo, como la supervisión de periféricos. El ESP32 integra un rico conjunto de periféricos, que van desde sensores táctiles capacitivos, sensores Hall, interfaz de tarjeta SD, Ethernet, SPI de alta velocidad, UART, I2S e I2C (ESPRESSIF, 2020).

Hay muchas variantes de desarrollo que contienen el microcontrolador ESP32, de diversos fabricantes. La tarjeta ESP32-WROOM32 DevKit V1 viene con una versión de 30 pines, de los cuales 25 son de los llamados GPIO (General Purpose Input Output). También incluye pines con las funciones PWM, 1wire, I2C, SPI, UART, y convertidores A/D de 12 bits (ESPRESSIF, 2020).

Figura 4

Distribución de los pines de la tarjeta de desarrollo ESP32-WROOM32 DevKit V1



Nota: La figura muestra la distribución de pines de la tarjeta de desarrollo ESP32-WROOM32 DevKit V1, de acuerdo con (Arief Budijanto, Winardi, Susilo, y Pustaka, 2021).

6. Marco metodológico

6.1. Metodología de la Investigación

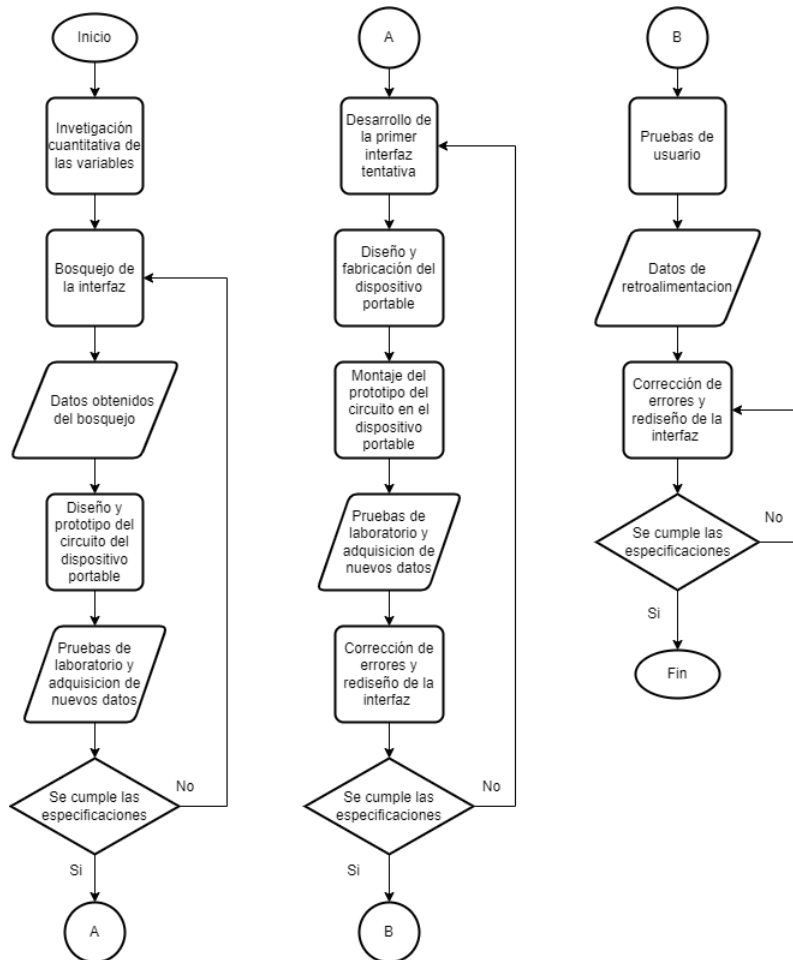
Para el presente proyecto titulado "Desarrollo de una interfaz VR y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes, para generar una retroalimentación háptica, permitiendo identificar geométricas 3d regulares" presenta una investigación con enfoque mixto ocupando módulos y tecnologías que permiten la comunicación entre la plataforma de comunicación, el LeapMotion y el ESP32; además, se identifican los parámetros necesarios para el diseño del dispositivo portable de retroalimentación háptica. El alcance investigativo es descriptivo en el cual se aplica conceptos de entornos virtuales, dispositivos portables y comunicación inalámbrica. El tipo de investigación es aplicativo puesto que el uso de tecnologías actuales permite solventar una necesidad presente en la sociedad de personas con capacidades especiales.

6.2. Metodología del proceso

El proceso aplicado para el desarrollo del trabajo de titulación empezó con una investigación cuantitativa en la cual se identificó las variables que intervienen en las partes que conforman la interfaz, empezando por los valores que debe recibir el software para poder dimensionar la parte electrónica y de esta manera obtener una respuesta hacia el dispositivo portable que se desarrolló. Para esto inicialmente, se realizó una interfaz tentativa para verificar el funcionamiento. Consecuentemente, se corrigieron los errores y se repitió el proceso.

Figura 5

Diagrama de flujo del método de proceso.



Nota: La figura muestra diagrama de flujo del método de proceso empleado para el desarrollo del trabajo de titulación, (Autores).

6.2.1. Identificar los parámetros iniciales de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.

6.2.1.1. Identificar los parámetros de funcionamiento del dispositivo Leap Motion Controller (LMC) y la plataforma de desarrollo UNITY

Para la identificación de los parámetros iniciales de la interfaz VR se realiza una investigación de los requerimientos, especificaciones y módulos de desarrollo que proporciona la empresa Ultraleap para la programación de aplicaciones que ocupan el dispositivo LMC.

- Posicionamiento del dispositivo LMC

Según Kirby (2020) entre las consideraciones de configuración del dispositivo se tiene el posicionamiento del artefacto respecto a la posición de las manos. Las opciones brindadas por los desarrolladores son 3:

- Head Mounted A (montaje sobre la cabeza A): el montaje del dispositivo se realiza a una altura superior de la cabeza del usuario con una inclinación de 180 grados. El rastreo de las manos se especializa en el dorso de la palma para el manejo de las aplicaciones.
- Head Mounted B (montaje sobre la cabeza B): se diferencia del montaje sobre la cabeza tipo A, por el ángulo de inclinación ya que es diferente de 0 y 180 grados. En este caso es para las aplicaciones que ocupan manejar las manos a la altura del rostro o abajo, lejos del usuario.
- Desktop Mode A (Modo escritorio A): para este modo de uso el dispositivo se coloca de forma paralela con el suelo. Este modo rastrea las palmas de las manos.

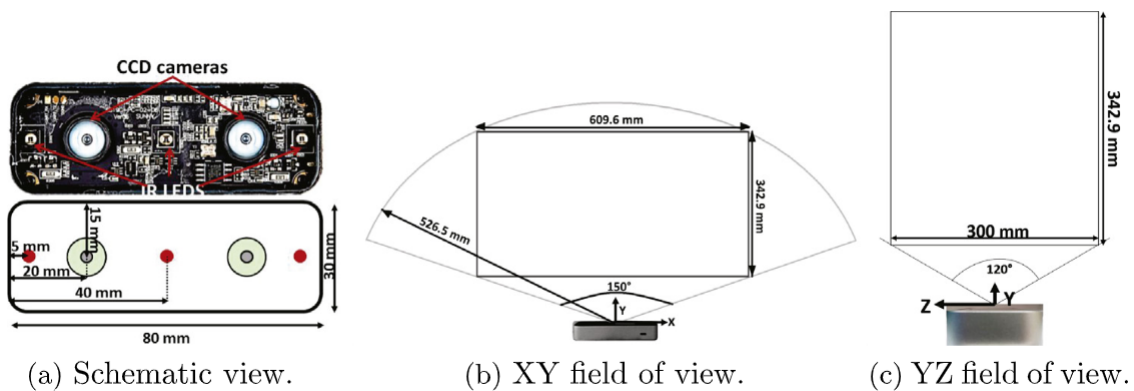
- Área de trabajo del dispositivo LMC

De acuerdo con el fabricante el LMC se centra únicamente en el reconocimiento de la posición y gestos de la mano con una precisión submilimétrica (0.01 mm), permitiendo a los usuarios interactuar con el computador a través de esos gestos o patrones, gracias a la integración de un software de seguimiento de manos y dedos de alta precisión (Curiel, Icasio, Sepúveda, Hurtado, y González, 2016; Ultraleap, 2020).

El área o espacio de trabajo del LMC esta limitada por el alcance y ángulo focal de las cámaras integradas en el dispositivo además de la intensidad de luz emitida por los LEDs infrarrojos los cuales son los encargados de detectar la proximidad de las manos con respecto al dispositivo. Según el fabricante el área de trabajo partiendo desde el centro de LMC formaría un espacio con forma de hexaedro con 60.96cm de ancho, 34.29cm de alto y 30cm de profundidad (Ultraleap, 2020).

Figura 6

Área de trabajo del dispositivo LMC



Nota: La figura (a) nos muestra la ubicación de las dos cámaras integradas en el dispositivo LMC, la imagen (b) nos muestra el campo de visión o el área del espacio de trabajo en el plano XY, mientras que la figura (c) nos muestra el campo de visión en el plano YZ, de acuerdo con (Curiel y cols., 2016).

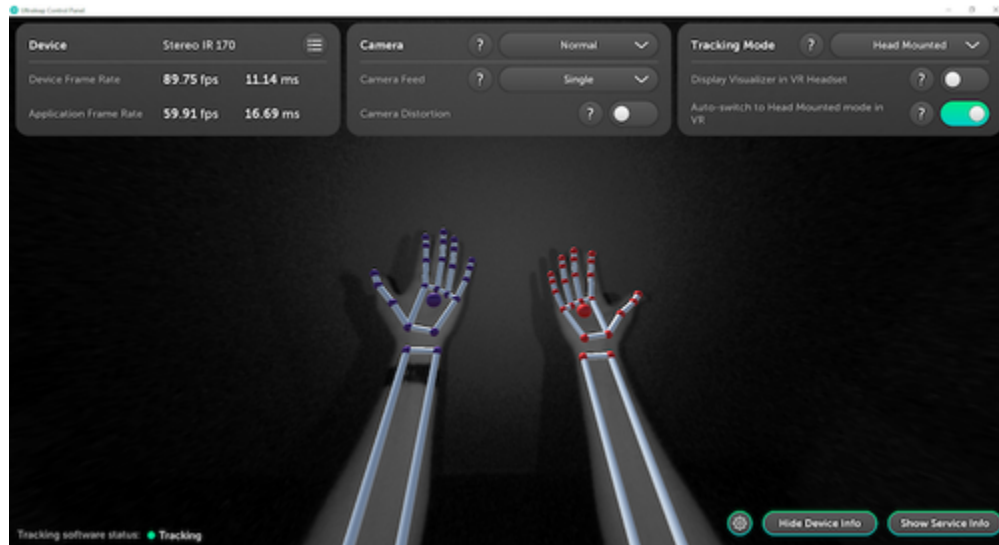
- Interconexión del LMC y la plataforma de desarrollo UNITY

- **Instalación del driver del LMC**

El driver de LMC permite que el dispositivo rastree el movimiento de las manos y transmita datos al ordenador para el posterior uso: control de la pantalla o para el desarrollo de aplicaciones. En la página oficial del producto se proporciona un instalador adecuado para cada Sistema Operativo (SO), siendo el driver Gemini V5.4.5 para el SO Windows utilizado para el presente trabajo.

Figura 7

Panel de control



Nota: La figura muestra el panel de control del programa instalado por el driver Gemini, imagen extraída de Ultraleap (s.f.-a).

- **Instalación de la plataforma UNITY**

Para la selección de la versión a instalar se revisa la página oficial del fabricante del dispositivo LMC, durante el tiempo que se realizó la instalación del completo requerido, las versiones disponibles eran compatibles con los editores de Unity 2020.3 LTS y 2021.3 LTS (Ultraleap, s.f.-b). Las condiciones mínima para el ordenador son:

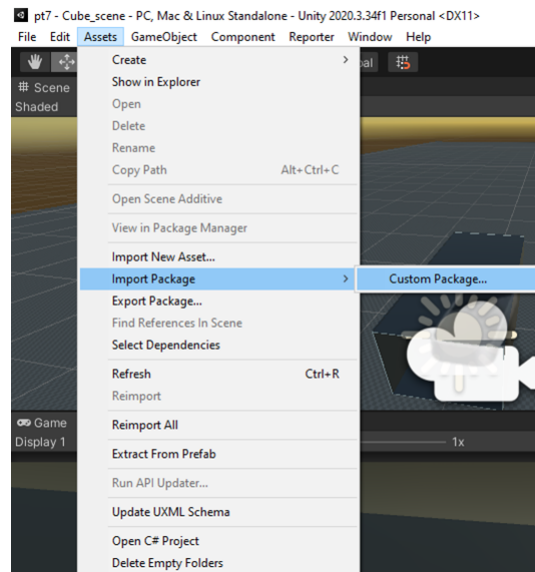
- * Windows 10, 64 bits.
- * Procesador Intel® Core™ i3 5th Gen.
- * 2 GB RAM.
- * Puerto USB 2.0.
- * Software de rastreo de manos Ultraleap Gemini (V5.2+).

- **Importación del paquete UNITY**

Una vez creado el proyecto deseado se importa el paquete UNITY, en el apartado Assets se selecciona la opción import package y finalmente custom package como se observa en la Figura 8. Se accede a la carpeta de descarga y se importan los archivos necesarios Figura 9.

Figura 8

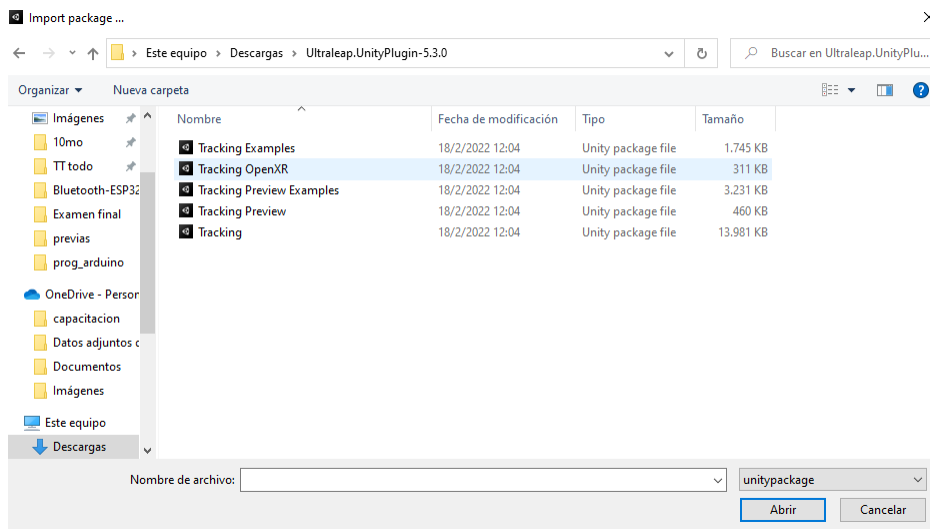
Pasos para la importación de paquetes



Nota: La figura muestra los apartados a seleccionar para la correspondiente importación de paquetes (Autores)

Figura 9

Carpeta de los paquetes a instalar



Nota: La figura muestra los paquetes proporcionados por la página oficial de Ultraleap (Autores)

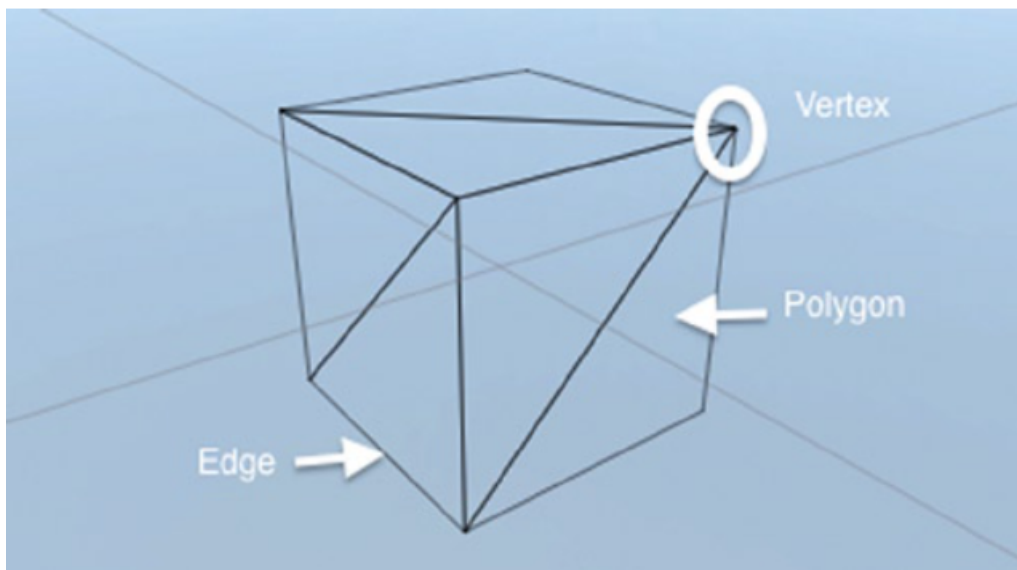
6.2.1.2. Posición del dedo índice y relación de posición con la figura

Entre las opciones para determinar una interacción entre la posición de la mano en el plano real con la figura en el plano virtual, como se ha indicado, es mediante un dispositivo para el rastreo de manos; sin embargo, no permite relacionar o lograr una interacción directa con las figuras proyectadas en la interfaz. Para lograr el objetivo mencionado se analizó el problema con base al uso de *voxels*, cuya definición se entiende como una representación tridimensional de una nube de puntos (Song y Xiao, 2016).

Esta investigación derivó en un análisis de recursos en la plataforma de desarrollo UNITY, donde se encontró la disponibilidad de construcción de *voxels* por medio de una programación secuencial o iterativa de cada uno de los vértices y caras: no obstante, el consumo de recursos computacionales es exigente en comparación con el desarrollo de mallas cuya funcionalidad es similar (Suvak, 2014), pero presenta una mejora del proceso al realizar la construcción de la figura y el renderizado únicamente de las caras y vértices visibles, como se muestra en la figura 10, pudiendo ser complementado con un componente *collider* el cual permite identificar la intrusión de un elemento en el volumen del objeto (Lidon, 2019), es decir, crea una nube de puntos en función de la forma que esta contenga. En la figura 11 se ejemplifica el funcionamiento de los *colliders*.

Figura 10

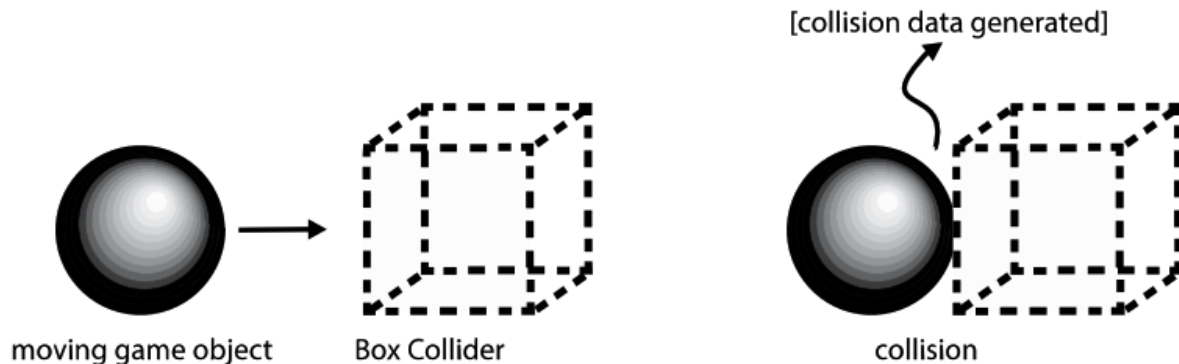
Vista wireframe de un Voxel



Nota: La figura muestra la vista wireframe de un *voxel* (Suvak, 2014)

Figura 11

Funcionamiento de un collider



Nota: La figura explica el funcionamiento de los *colliders* ante la intrusión de un objeto externo (Suvak, 2014)

6.2.1.3. Medidas antropométricas de la mano para el diseño del dispositivo portable

Como punto de partida se ha optado por seguir la normativa internacional "Definiciones de las medidas básicas del cuerpo humano para el diseño tecnológico (UNE-EN ISO 7250-1:2017, 2017)" la cual establece cuatro grupos de medidas fundamentales, siendo los últimos dos grupos los de interés para el presente trabajo.:

- **Medidas tomadas con el sujeto de pie:** como la estatura, la altura de los ojos, hombros y codo, anchura del pecho y de caderas, etc.
- **Medidas tomadas con el sujeto sentado:** aquí también se indica la altura (sentado), la altura de los ojos, hombros y codo, anchura de hombros y de cadera, espesor del muslo, altura de la rodilla, etc.
- **Medidas de segmentos específicos del cuerpo:** como la longitud de la mano, la anchura de la mano en los metacarpianos, la longitud del dedo índice, la longitud y anchura del pie, longitud y anchura de la cabeza, etc.
- **Medidas funcionales:** como el alcance del puño (hacia delante), la longitud antebrazo-punta de los dedos, longitud poplíteo-trasero (profundidad del asiento), perímetro del cuello, pecho, cintura, muslo, etc.

Debido a que existe una diversidad de medidas que pueden ser tomadas para generar registros antropométricos provoca que los anatomistas traten de clasificar la variedad de acciones que puede realizar la mano humana, tal es el caso de Pheasant y Haslegrave, quienes realizaron un estudio para estimar las medidas antropométricas de la mano, como se puede observar en el Anexo C primero se delimitó las medidas a tomar en base a las posiciones que puede ejecutar la mano y con esto se obtuvo los datos que se muestran en el Anexo D. Tomando como referencia estas medidas en las próximas secciones se diseñó el dispositivo portable.

6.2.2. Diseñar una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.

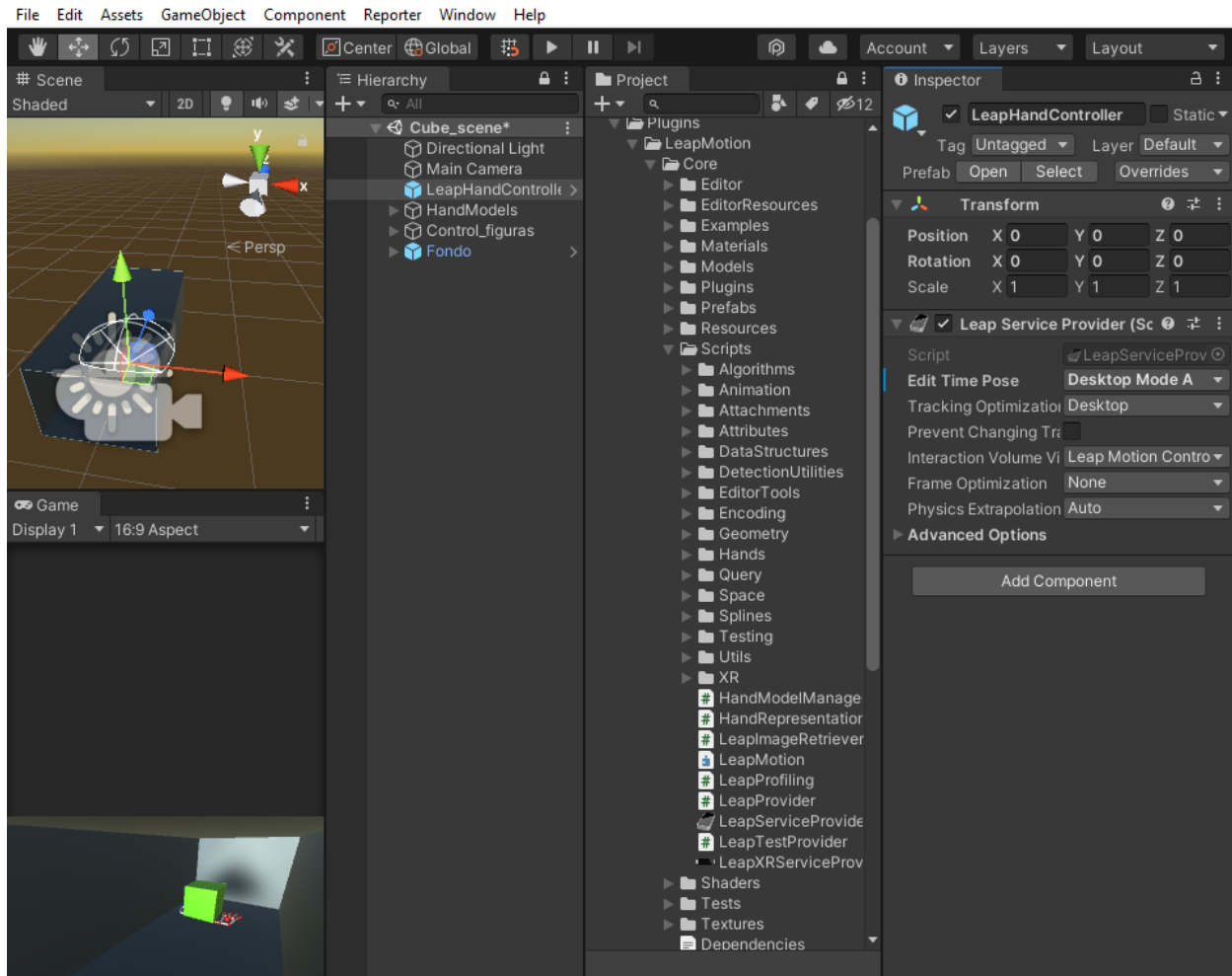
6.2.2.1. Diseño de la interfaz en la plataforma de desarrollo Unity

Para empezar con el diseño de la interfaz se optó por realizar una escena que contenga los elementos necesarios para poder identificar las figuras de manera aislada, la finalidad principal de este procedimiento se da en realizar el desarrollo simultaneo de la parte electrónica. La familiarización con módulos y scripts proporcionados por el fabricante para el desarrollo de aplicaciones puede facilitar la complejidad o reducir el trabajo ha realizar por lo que se deben aprovechar de la mejor manera. Entre los ocupados se tiene:

- **Leap Hand Controller:** Este prefabricado contiene un script denominado LeapService-Provider, este proporciona los datos del rastreo de la manos desde el dispositivo.

Figura 12

Leap Hand Controller

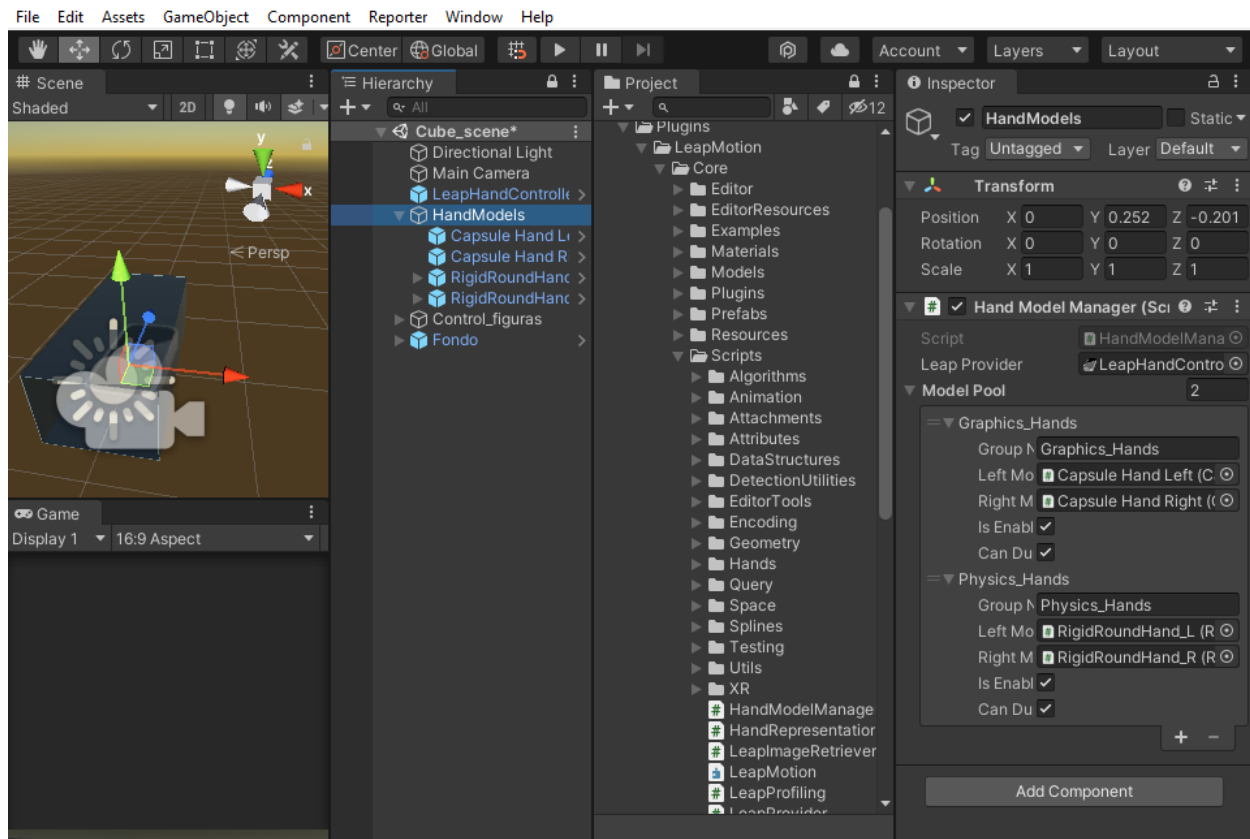


Nota: La figura muestra la configuraciones del script Leap Service Provider (Autores).

- **Hand Model Manager:** Este script permite gestionar un conjunto de modelado de las manos y representarlo en la plataforma de desarrollo, este presenta dos apartados: el primero contiene las características gráficas de las manos y la segunda se relaciona a las propiedades físicas de las manos.

Figura 13

Hand Models

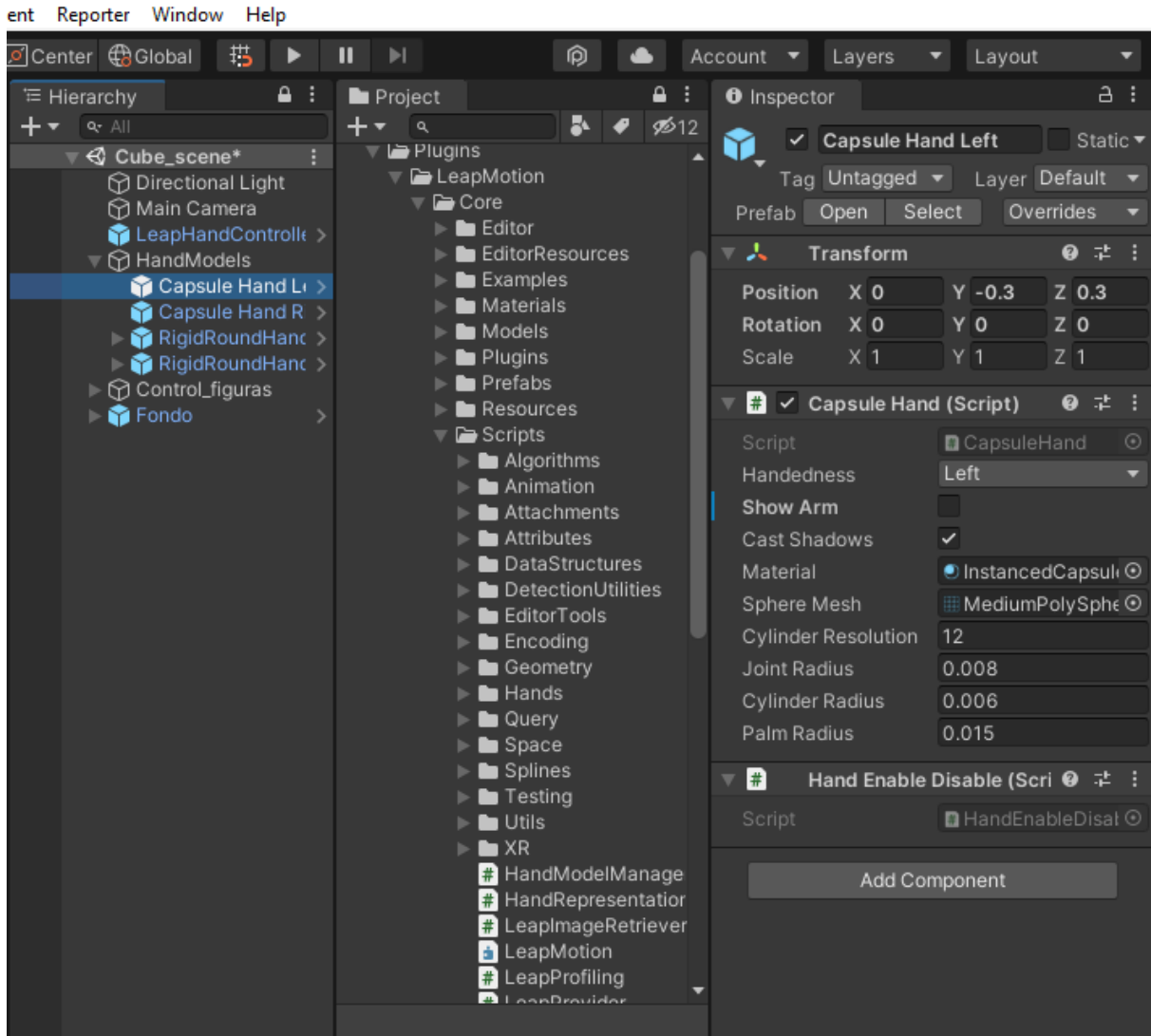


Nota: La figura muestra la configuraciones del script Hand Model Manager (Autores).

- **Capsule Hand Left - Capsule Hand Right:** Estos prefabricados cuentan con dos scripts: Capsule Hand y Handle Enable - Disable. Capsule Hand es Un modelo básico de mano Leap construido dinámicamente frente a una geometría preexistente. Handle Enable - Disable permite suprimir las advertencias relacionadas con los cuerpos rígidos cinemáticos que no admiten la detección continua de colisiones

Figura 14

Capsule Hand Left - Capsule Hand Right

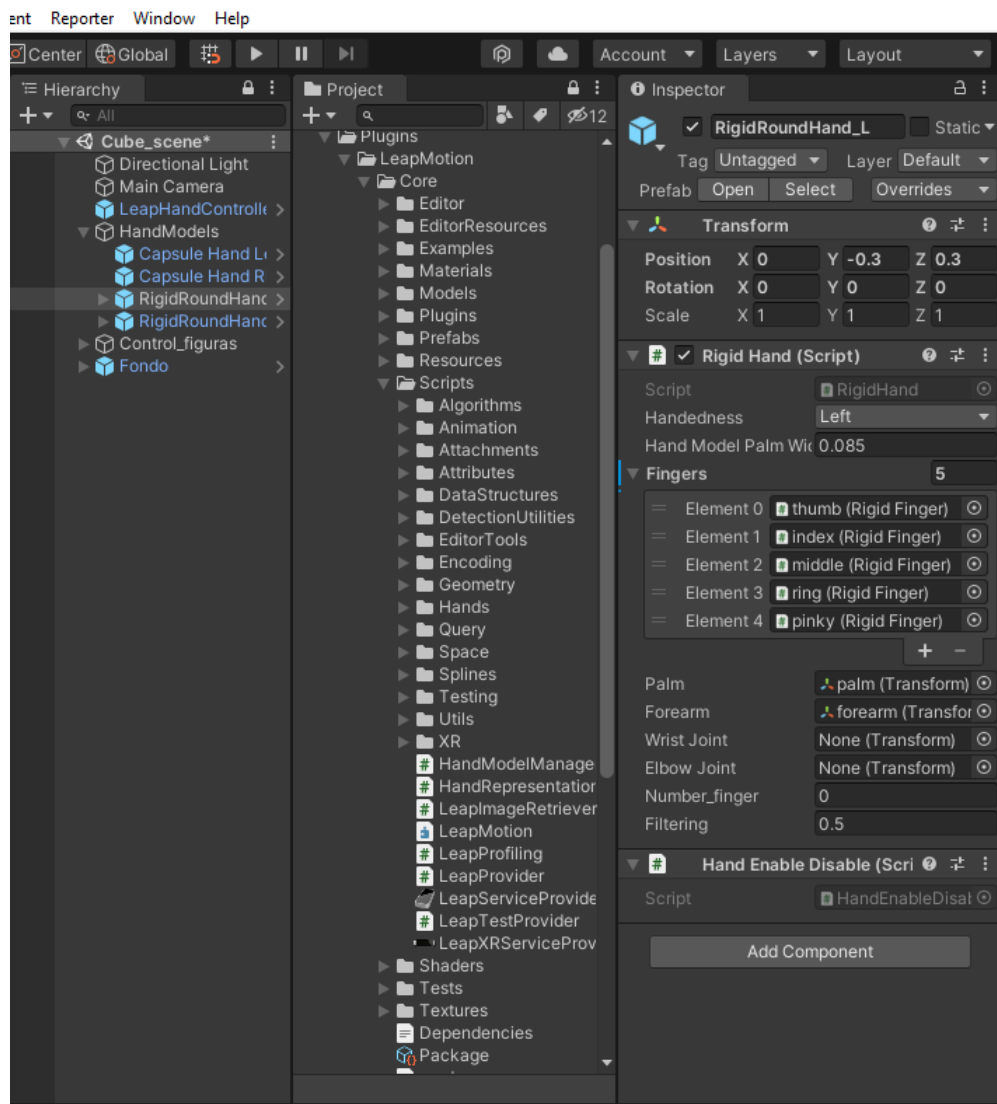


Nota: La figura muestra la configuración del script Capsule Hand, para la mano derecha solo se selecciona 'Right' en la pestaña 'Handedness' (Autores).

- **Rigid Round Hand L - Rigid Round Hand R:** Contiene un script (Rigid Hand) El cual comprende un modelo físico para la representación de la mano la cual se compone por varios *Colliders*.

Figura 15

Rigid Round Hand L - Rigid Round Hand R



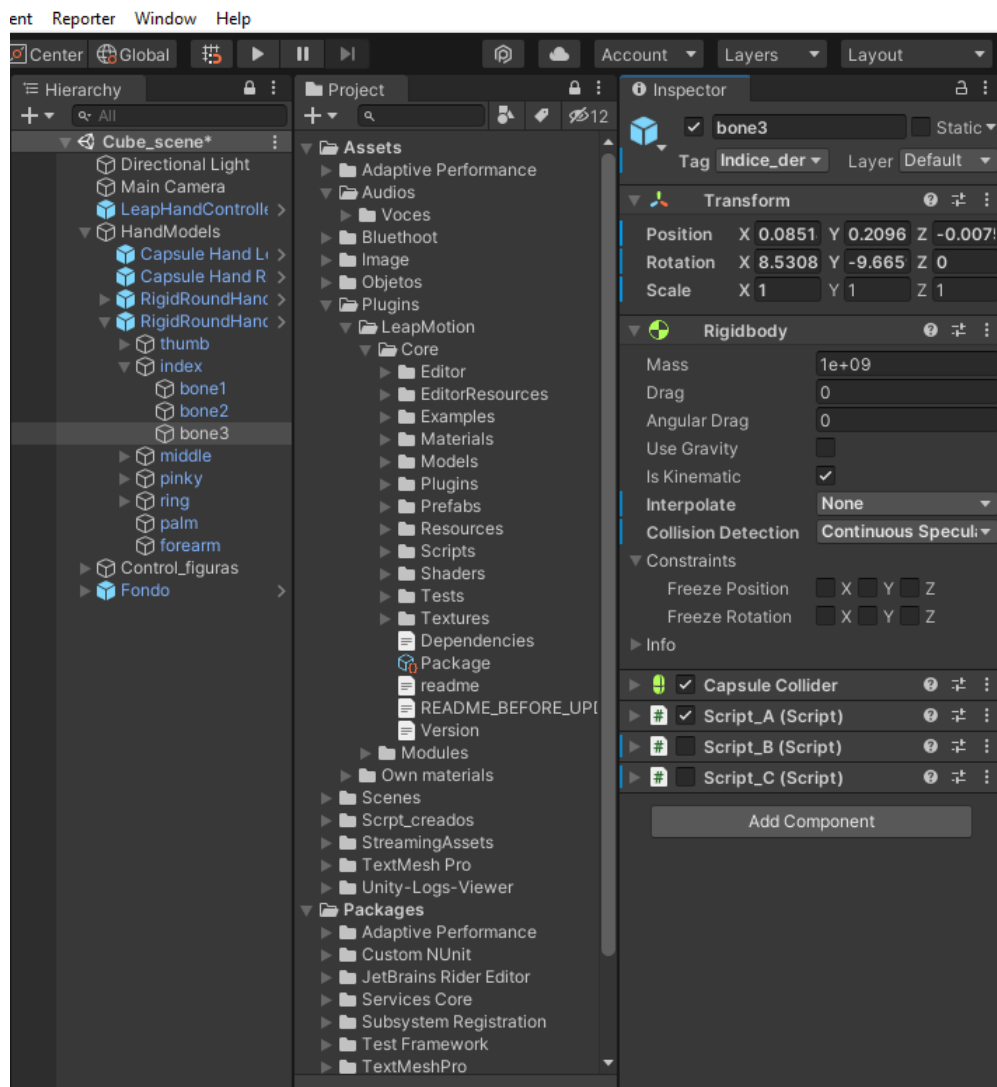
Nota: La figura muestra la configuración del script Rigid Hand, para la mano derecha solo se selecciona 'Right' en la pestaña 'Handedness' (Autores).

Para la acción o datos a enviar por comunicación inalámbrica se han desarrollado diferentes scripts y objetos, además se debe tener en consideración algunos de los planteamientos de funcionamiento iniciales. La variación de la frecuencia de vibración del dispositivo piezoeléctrico acorde a la posición del dedo respecto a la figura tridimensional virtual es de las más importantes puesto que permite a los usuarios independencia al momento de explorar el espacio de trabajo generado por el dispositivo LMC. Durante el desarrollo del primer objetivo

de definió el método a trabajar para relacionar las posiciones de la mano con la de la figura, el uso de colliders permite identificar si el dedo entra en contacto con el volumen de la figura cargada y si su posición se encuentra cerca de la periferia del objeto o más cerca del centro de la figura si la frecuencia de vibración incrementa. En la figura 16 se aprecian los script que identifican Almacenan la variable correspondiente a la posición actual del dedo, en tanto que, en la figura 17 se ubica el script ocupado para el control de colliders.

Figura 16

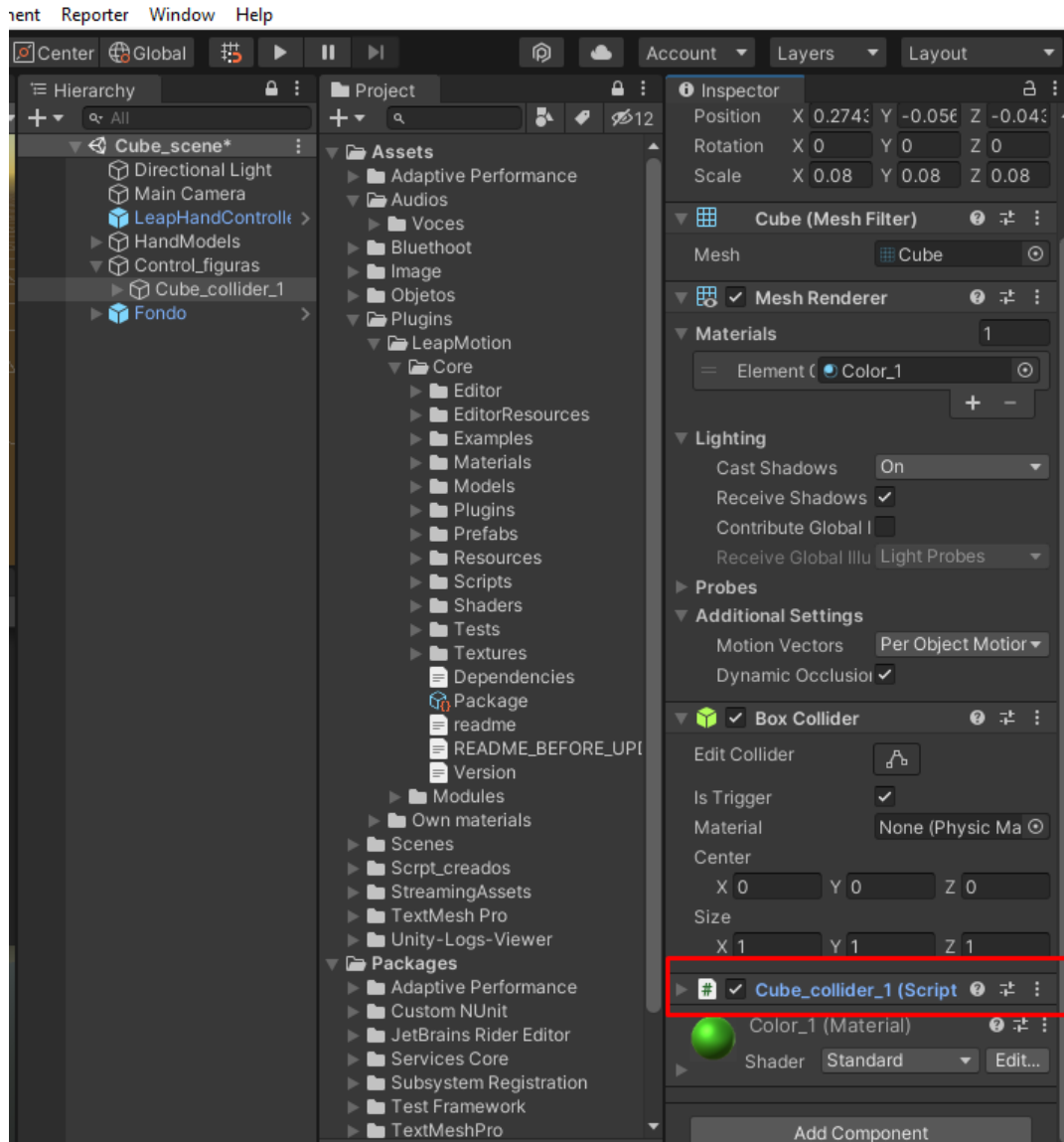
Dato de la posición del dedo



Nota: La figura muestra el script empleado para localizar la posición del dedo respecto a la figura (Autores)

Figura 17

Script de control para colliders

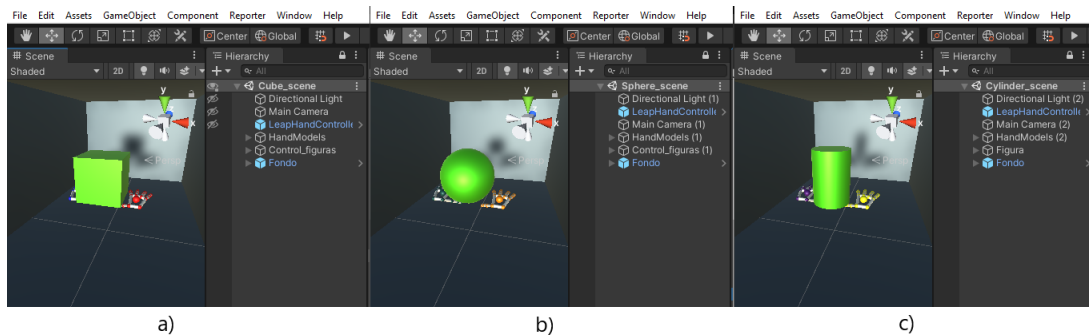


Nota: La figura muestra el script utilizado para el control de los colliders de las figuras a reconocer (Autores)

Comprobado el funcionamiento de la escena se armaron escenarios con diferentes figuras 3D regulares, siendo estas: el cubo, la esfera y el cilindro. Como se observa a continuación en la figura 18. La selección de las figuras indicadas se da debido a que permiten evaluar las tres opciones de *colliders* que brinda la plataforma UNITY: *box collider*, *sphere collider* y *mesh collider*.

Figura 18

Escenas con las figuras a identificar



Nota: La figura muestra el armado de las escenas. a) Escena del cubo (*Box Collider*). b) Escena de la esfera (*Sphere Collider*). c) Escena del cilindro (*Mesh Collider*). (Autores)

La interfaz de usuario (IU) se ha planteado para un control por cambio de escenas. Teniendo en consideración el formato planteado se ha definido dos modos de funcionamiento denominados: entrenamiento y prueba. Para realizar este control se define una escena principal llamada 'inicio' la cual consta de un objeto canvas el cual provee de las herramientas necesarias para armar una IU. En la figura 19 se puede apreciar que consta de dos botones para la selección del modo, un selector para cargar la figura deseada y un botón para cerrar la aplicación.

Figura 19

Pantalla de inicio

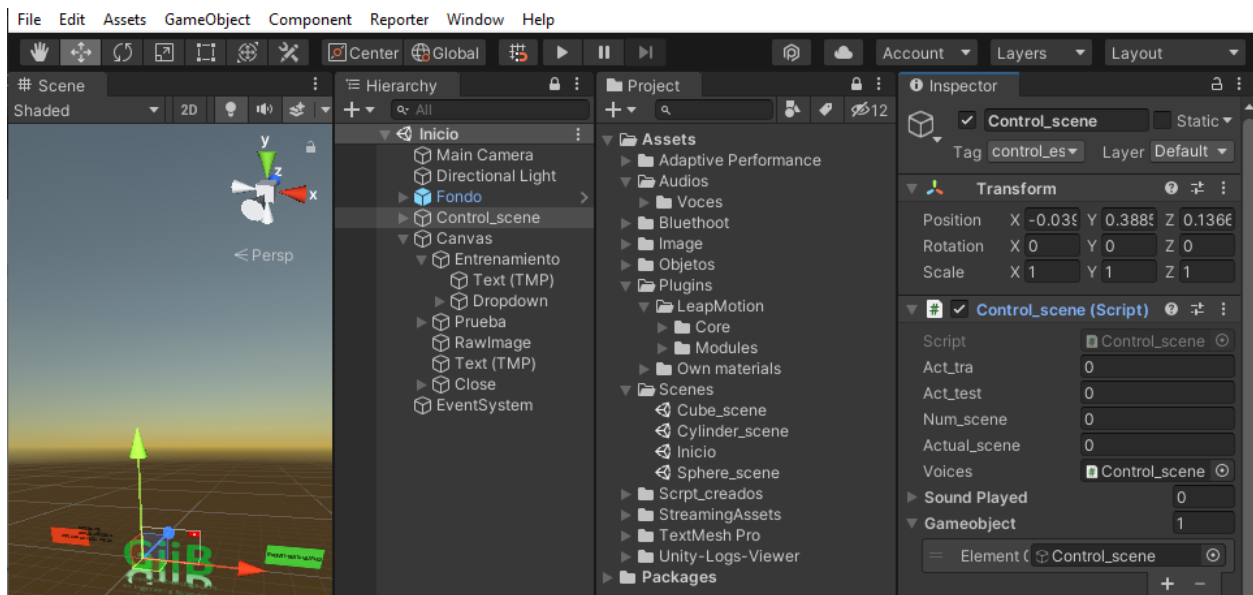


Nota: La figura muestra la pantalla de inicio del programa (Autores)

En el objeto *Control scene* se han colocado todas las *scripts* que permiten el control de la aplicación. Para este se ha tomado en cuenta el usuario al que está destinado (personas no videntes) por lo que se han programado teclas de fácil accesibilidad como las flechas de dirección presentes en todos los teclados y la tecla de escape para el retorno a la pantalla de inicio. La flecha para arriba activa el modo de entrenamiento, la flecha para abajo indica el modo prueba y las flechas derecha e izquierda permiten el cambio entre escenas.

Figura 20

Gameobject para el control de escenas

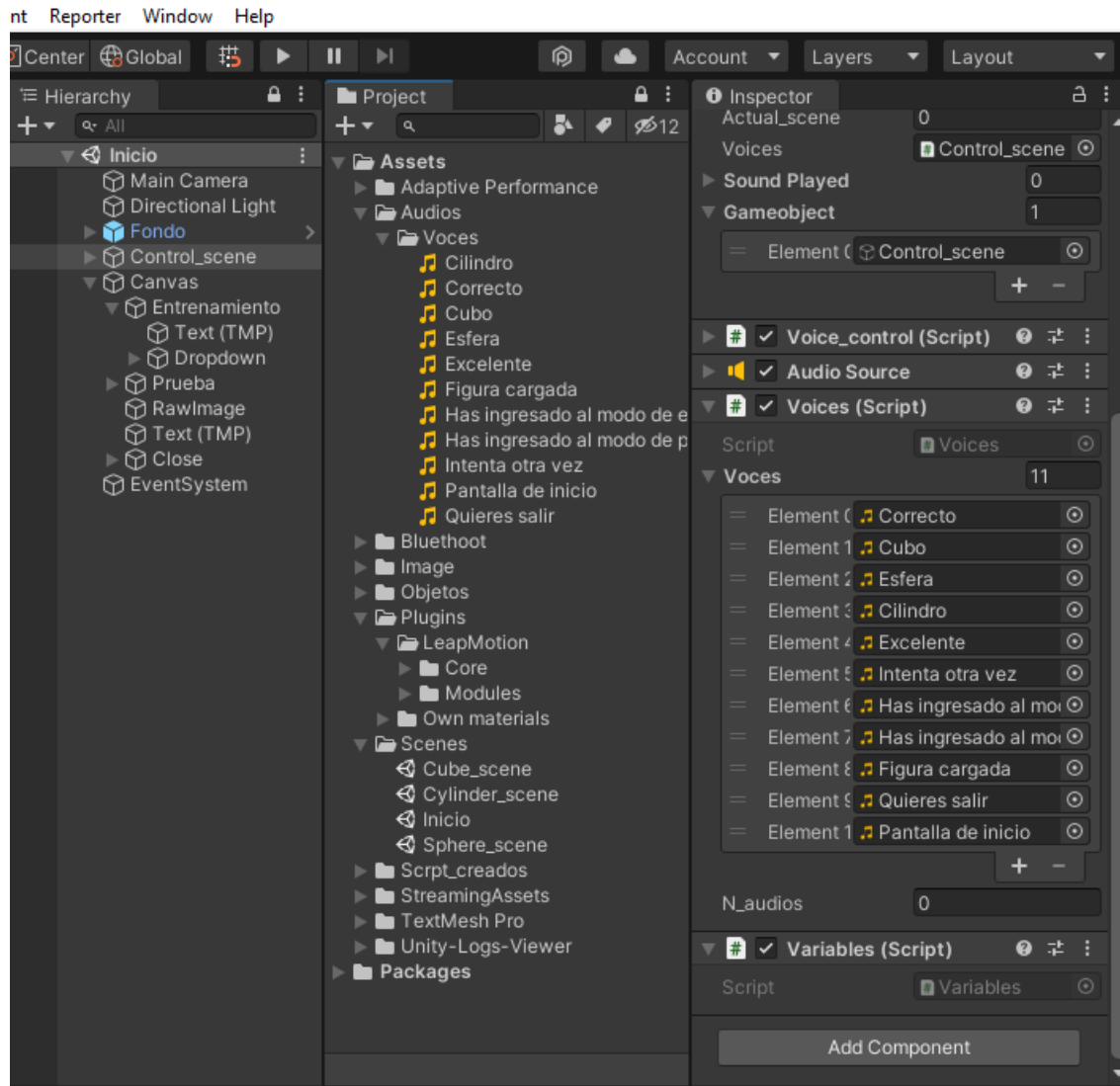


Nota: La figura muestra el Gameobject que controla las escenas y en el inspector algunas variables de funcionamiento (Autores)

Pensando en el usuario se han añadido indicadores auditivos para las escenas con la finalidad de que este pueda identificar las acciones que se han realizado. Cuando se ha seleccionado el modo en el cual se desea trabajar se reproduce un audio confirmando la acción ejecutada. En el modo de entrenamiento también se le indica la figura que está cargada para que pueda familiarizarse con el desplazamiento que hacen sus manos. En el modo prueba solo se le indica al usuario que la figura ha sido cargada y que puede proceder interactuar con la misma para su identificación.

Figura 21

Audios ocupados en la aplicación



Nota: La figura muestra los audios que se ejecutan en la aplicación acorde a las necesidades del software (Autores)

6.2.2.2. Dimensionamiento y diseño del dispositivo portable

El dispositivo portable es el encargado de generar la retroalimentación háptica, además debe ser capaz de comunicarse con la interfaz desarrollada en Unity, debido a esto se opto por el uso de la tarjeta de desarrollo ESP32, puesto que tiene integrada una antena Bluetooth, la

cual permitirá la conexión wireless entre el dispositivo LMC y la interfaz, asimismo permite el ahorro de espacio ya que no se requiere el uso de un modulo Bluetooth externo, con esta tarjeta también se activara y desactivara el actuador. En este trabajo se ha decidido usar el actuador háptico inercial ERM debido a su alta disponibilidad en el mercado local.

■ **Diseño del circuito del dispositivo portable**

La parte electrónica o circuito nos sirve para cumplir con 4 requerimientos necesarios para el funcionamiento del dispositivo portable, por lo tanto se podría dividir en cuatro partes encargadas de acciones diferentes: un circuito que suministre los 5V para la tarjeta de desarrollo ESP32, un partidor de tensión que nos permita determinar el nivel de carga de la batería, el circuito del actuador el cual sirve para activarlo y desactivarlo de manera segura sin arriesgar el pin al que va estar conectado y finalmente una conexión para los dos LEDs RGB indicadores, uno está destinado para indicar el nivel de carga de la batería mientras que el otro indica los niveles de vibración en los que va a estar funcionando el motor.

1) **Circuito regulador de voltaje**

La tarjeta de desarrollo ESP32 DevKit V1 puede ser alimentada con un voltaje de 5V o con 3.3V para aplicaciones de bajo consumo, aunque su voltaje mínimo para mantenerla encendida es de 2.55V, por otra parte el consumo de corriente es de 51mA en un modo de funcionamiento normal a 240MHz, pero cuando el Bluetooth esta activo al consumo de energía normal se suman 140mA esto según ESPRESSIF (2020), además se tiene al actuador ERM el cual tiene un consumo de 120mA mientras que los dos LEDs RGB indicadores 100mA cada uno. En definitiva habrá un consumo total de corriente de 511mA. Tomando en cuenta este requerimiento de consumo se selecciono una batería de 7.4v y 1800mAh, pero debido a que la tarjeta ESP32 recibe un voltaje máximo de 5V se requiere un circuito que regule el voltaje que se le va a suministrar, para ello se selecciono el regulador de Voltaje de 5V 511-LD29300V50 el cual tiene una tensión de entrada mínima de 2.5V y una corriente de entrada mínima de 10mA mientras que sus valores de entrada máximos de tensión y corriente son 50V y 3A respectivamente (Microelectronics, 2013).

Tabla 1*Datos de consumo energético*

Descripción	Valor	Unidad
Voltaje mínimo requerido para el funcionamiento del ESP32 y Bluetooth	3	V
Voltaje de la batería (Vb)	7.4	V
Voltaje que se va a consumir (Vc)	4.4	V
Amperaje de la batería (Ib)	1500	mAh
Corriente consumida en funcionamiento normal	51	mA
Corriente consumida con el Bluetooth en funcionamiento	140	mA
Corriente consumida por el motor ERM	120	mA
Corriente consumida por los LEDs RGB	200	mA
Corriente total Consumida (Ic)	511	mA

Nota: La tabla muestra los datos de la batería y los valores de corriente consumida por los componentes del dispositivo portable, estos datos se obtuvieron de las hojas de datos del fabricante de cada componente pero se comprobaron con pruebas de laboratorio. (Autor)

Con los datos mostrados en la Tabla 1 se puede hallar la eficiencia energética que tendrá la batería y por lo tanto el dispositivo portable, para lo cual recurrimos a un sencillo calculo de potencias:

- Potencia de la batería

$$Wb = Vc \times Ib \quad (1)$$

$$Wb = 4.4V \times 1500mAh = 6600W \quad (2)$$

- Potencia consumida

$$Wb = Vc \times Ic \quad (3)$$

$$Wb = 4.4V \times 511mAh = 2248.4W \quad (4)$$

- Eficiencia energética de la batería

$$Horas = Wb \times Wc \quad (5)$$

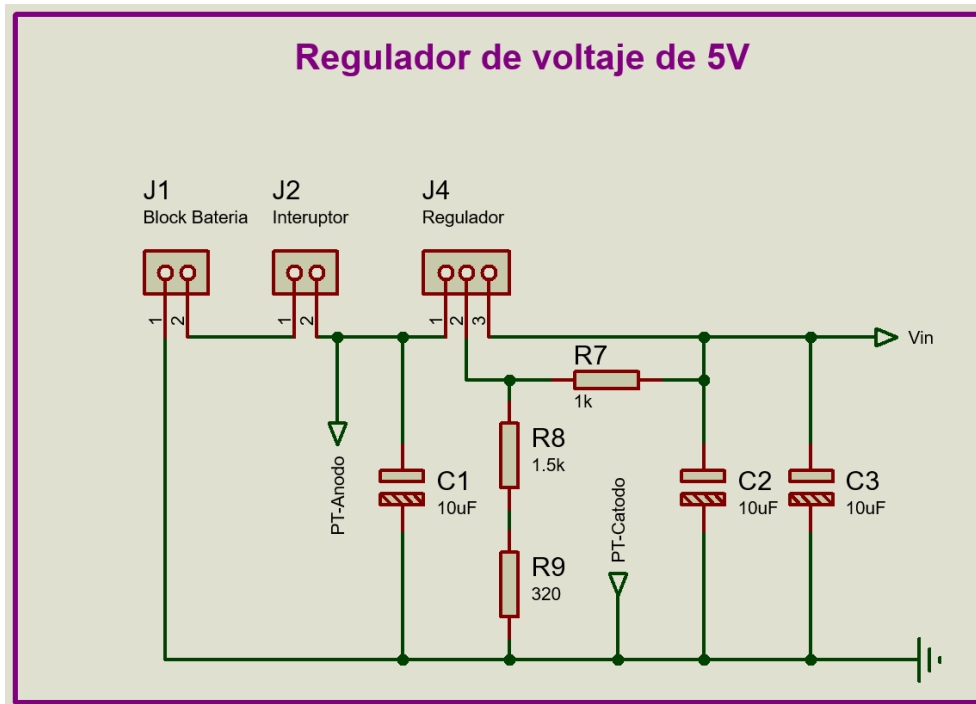
$$Horas = 6600W \times 2248.4W = 2.9Horas \quad (6)$$

Como se puede observar en el resultado obtenido de la Ecuación 6, la batería tendrá una eficiencia energética de 2.9 Horas, por lo tanto el dispositivo podrá estar en uso constante por casi 3 horas antes de apagarse completamente.

Para realizar el circuito del regulador de voltaje se recurrió directamente a la recomendación de la hoja de datos del fabricante Microelectronics (2013) quedando un circuito tal y como se muestra en la Figura 22, a este circuito se le añadió dos borneras donde se conectarán la batería y un interruptor el cual cumple con la función de abrir o cerrar el paso de energía al circuito regulador y por lo tanto encender o apagar la tarjeta ESP32.

Figura 22

Circuito Regulador de Voltaje



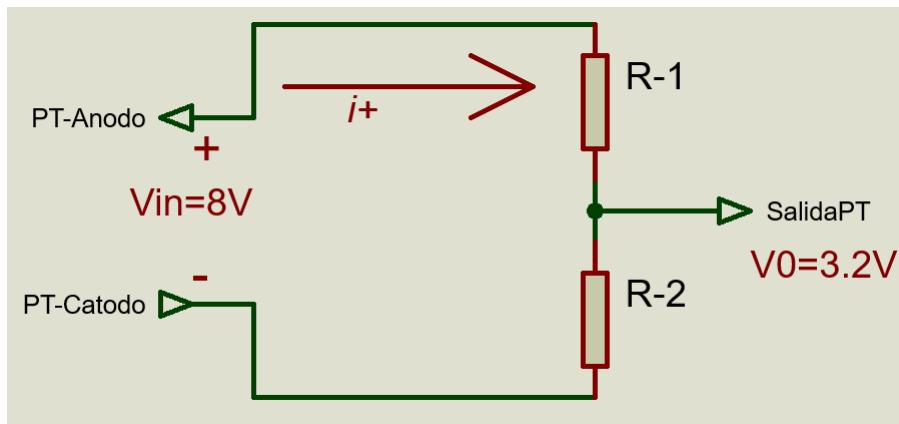
Nota: La figura muestra el circuito para la regulación de voltaje, (Autores)

2) Circuito partidor de tensión

El divisor de tensión cumple con la función de disminuir el voltaje en la salida del mismo con el objetivo de que el voltaje de salida máximo de la batería de 7.4V se reduzca a 3.3V para así obtener un valor analógico que pueda ser leído por uno de los pines de la tarjeta ESP32 y de este modo poder determinar el nivel de carga de la batería.

Figura 23

Circuito partidor de tensión



Nota: La figura muestra el circuito partidor de tensión que permite medir el nivel de carga de la batería, (Autores)

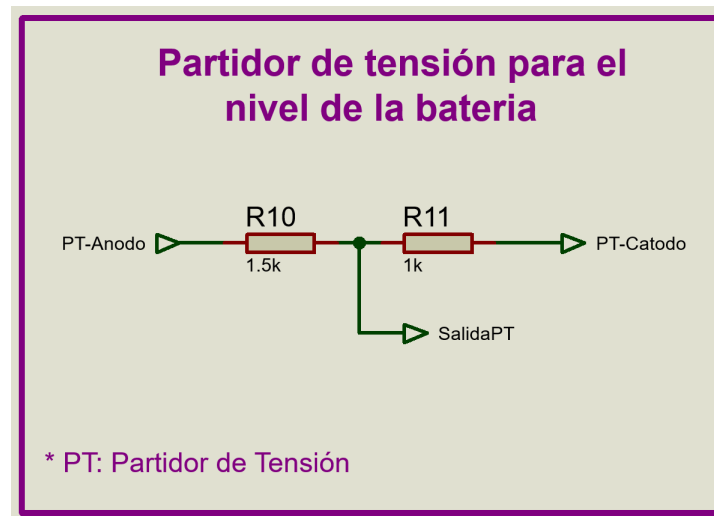
Tal y como se observa en la Figura 23 para realizar el cálculo del partidor de tensión se trabajó con un voltaje de entrada de 8V para obtener una tensión de salida de 3.2V, debido a que el voltaje de la batería cuando esta cargada totalmente llega hasta los 8V y no 7.4V como menciona el fabricante en su hoja de datos. Aplicando la Ecuación 7 del partidor de tensión:

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (7)$$

Se obtuvo los valores de $R_1 = 1.5k\Omega$ y $R_2 = 1k\Omega$, de tal forma el circuito nos quedaría tal y como se muestra en la Figura 24

Figura 24

Circuito partidor de tensión



Nota: La figura muestra el circuito partidor de tensión que permite medir el nivel de carga de la batería, (Autores)

3) Circuito del motor

Para que el motor empiece a funcionar se necesita una corriente de 50mA como mínimo de acuerdo con las pruebas de laboratorio realizadas, y alcanza entre 100mA y 120mA cuando llega a la velocidad de funcionamiento máxima que puede alcanzar cuando se suministra 3.3V. Para el circuito del motor se colocó una resistencia y un capacitor en paralelo al motor para controlar que no se generen picos de tensión y controlar que la corriente suministrada no sea mayor a 120mA.

En la Figura 25 se muestra el planteamiento del circuito para hallar el valor de las corrientes i_t , i_c e i_m y el valor de la resistencia R_{12} .

- Se inició por hallar el valor de i_t

$$i_t = i_m + i_c$$

$$i_t = 120mA + i_c = 120mA \quad (8)$$

- Se calculó el voltaje que pasa al motor

$$V_c = V_m$$

$$V_m = 3V$$

- Se calculó el voltaje que pasa por la resistencia R_{12} .

$$V_t = V_{R12} + V_c$$

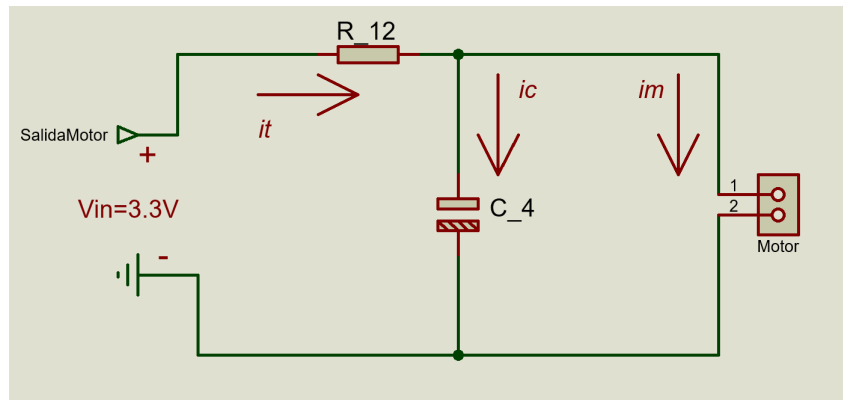
$$V_{R12} = V_t + V_m = 0.3V \tag{9}$$

- Y finalmente se halló el valor de la resistencia R_{12} .

$$R_{12} = \frac{V_{R12}}{i_t} = 2.5\Omega$$

Figura 25

Planteamiento del circuito del motor

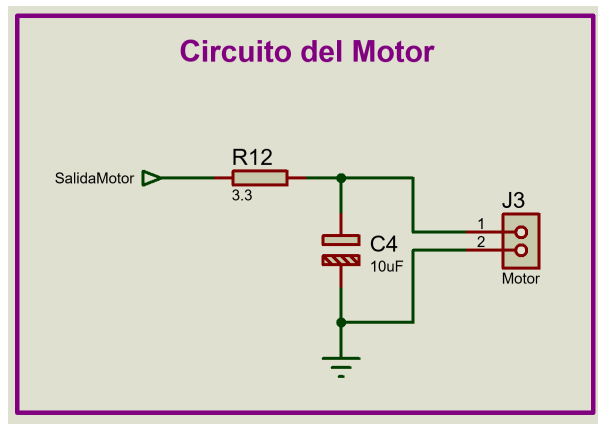


Nota: La figura muestra el planteamiento del circuito requerido para motor, (Autores)

Reemplazando los valores nos quedó el circuito mostrado en la Figura 26, ya que no hay resistencias de 2.5Ω se usa una resistencia que mas se acerque al valor calculado, en consecuencia se ha usado una resistencia de 3.3Ω

Figura 26

Circuito del motor



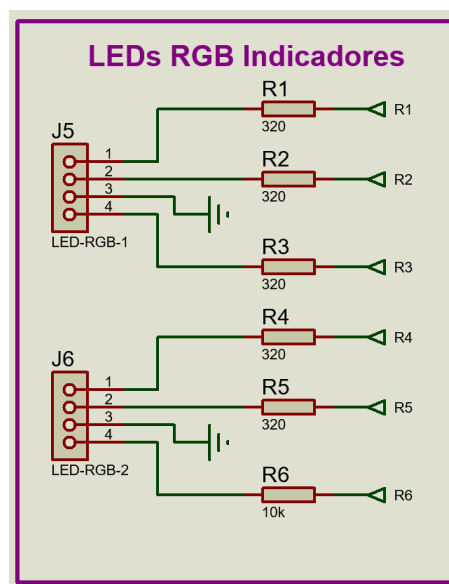
Nota: La figura muestra el circuito para la activación y desactivación del motor, (Autores)

4) LEDs indicadores

Finalmente en el caso de los LEDs RGB indicadores se ha colocado un valor estándar de 320Ω .

Figura 27

Circuito de los LEDs RGB indicadores



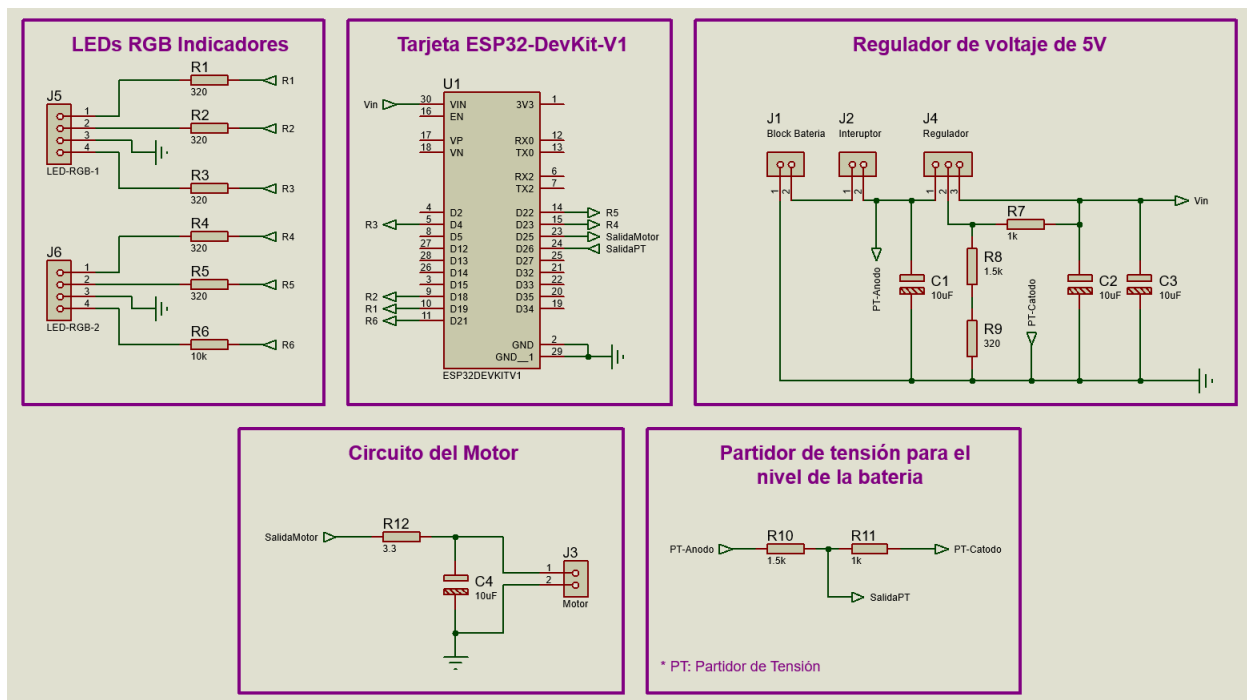
Nota: La figura muestra los circuitos de conexión de los LEDs RGB indicadores (Autores)

- **Diseño de la placa del circuito impreso (PCB) del dispositivo portable**

Una vez realizados todos los cálculos necesarios para la obtención de los valores de los componentes del circuito, se pasa al desarrollo de la PCB para esto se hizo uso el software Proteus8. Para iniciar el desarrollo se debe tener el circuito ordenado y con cada componente etiquetado o nombrado de forma adecuada así como el mostrado en la Figura 29.

Figura 28

Circuito del dispositivo portátil

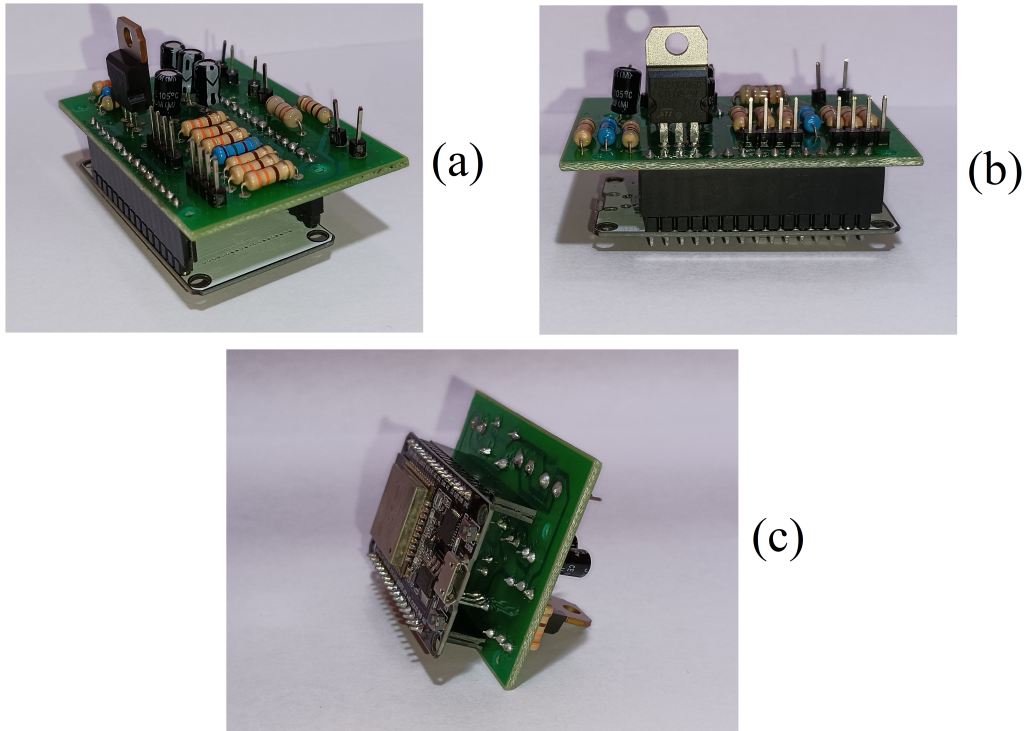


Nota: La figura muestra el circuito completo del dispositivo portable (Autores)

Para el desarrollo de la PCB se requiere que la placa resultante tenga el menor tamaño posible, tomando como referencia la Tabla 6 del Anexo D se tiene que la parte dorsal de la mano (parte opuesta a la palma) tiene unas dimensiones de $116 \times 95 [mm]$ por lo cual la placa no debe superar estas dimensiones para asegurar que el dispositivo sea ergonómico, de esta manera se obtuvo

Figura 30

PCB finalizada



Nota: Las figuras (a), (b) y (c) muestran diferentes ángulos de la PCB armada con todos los componentes. (Autores)

6.2.3. Implementar el diseño de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.

6.2.3.1. Construcción del dispositivo portable

El dispositivo portátil está formado por tres partes: la caja de protección de la PCB, el dedal que sostiene al motor ERM y un guante en el que se apoya la caja de protección. Para el caso de la caja y del dedal se tomara como referencias las medidas dadas por la Tabla 6 del Anexo D mientras que para el guante se ha recurrido a comprar un guante de ciclismo al cual se lo adaptó para que se pueda unir a la caja mediante el uso de velcro el cual mantendrá unido a ambas partes. Basándose en la Tabla 6 se tiene que:

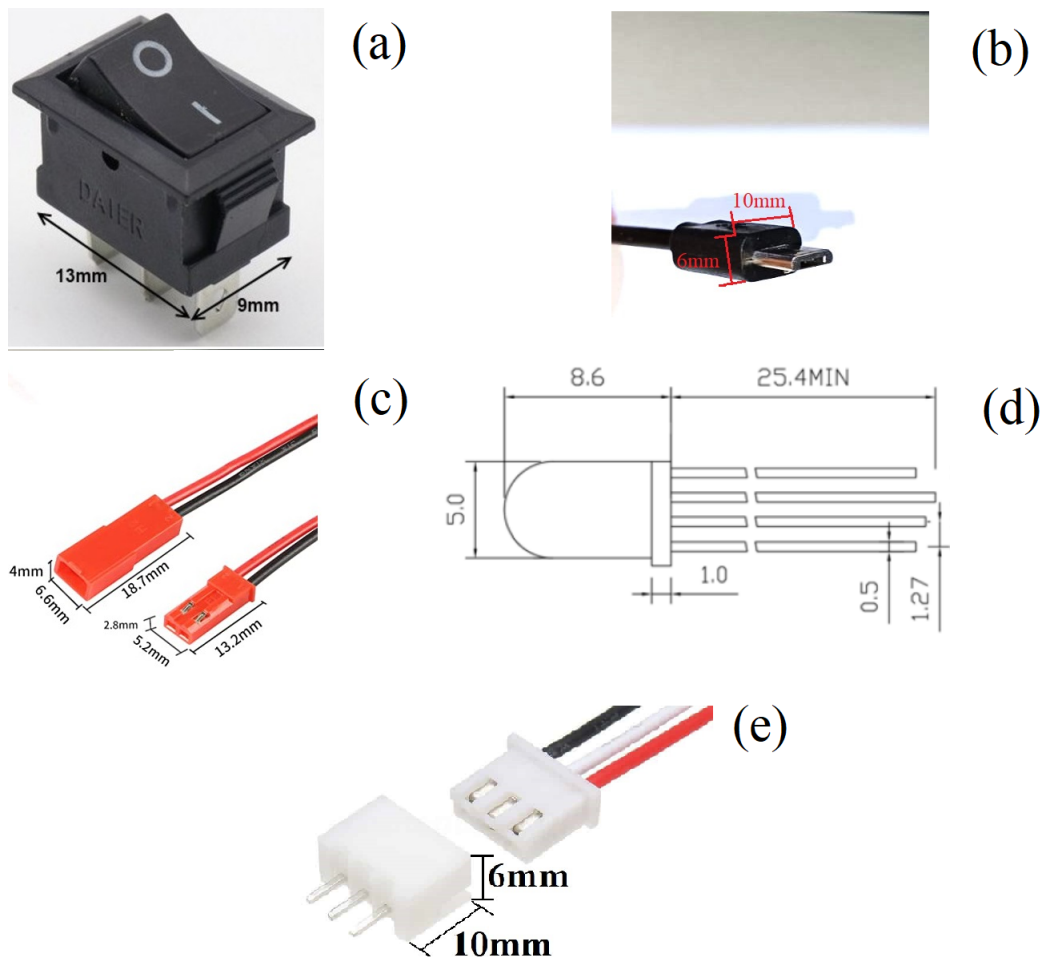
- 1 La longitud del dedo índice en hombres es de 79mm mientras que en mujeres es de

- **Diseño y construcción de la caja de protección para la PCB**

La caja de la PCB no solo mantiene protegida a la PCB si no también a la batería además de que se debe tener en cuenta los agujeros o aberturas para colocar los LEDs RGB indicadores, el interruptor, el plug de conexión tipo hembra al cual se conecta el dedal y una abertura para el cable que sirve para cargar o actualizar el software a la tarjeta de desarrollo ESP32. Por lo tanto todas estas dimensiones debieron ser tomadas en cuenta al momento de dimensionar y modelar la caja de protección.

Figura 32

Componentes

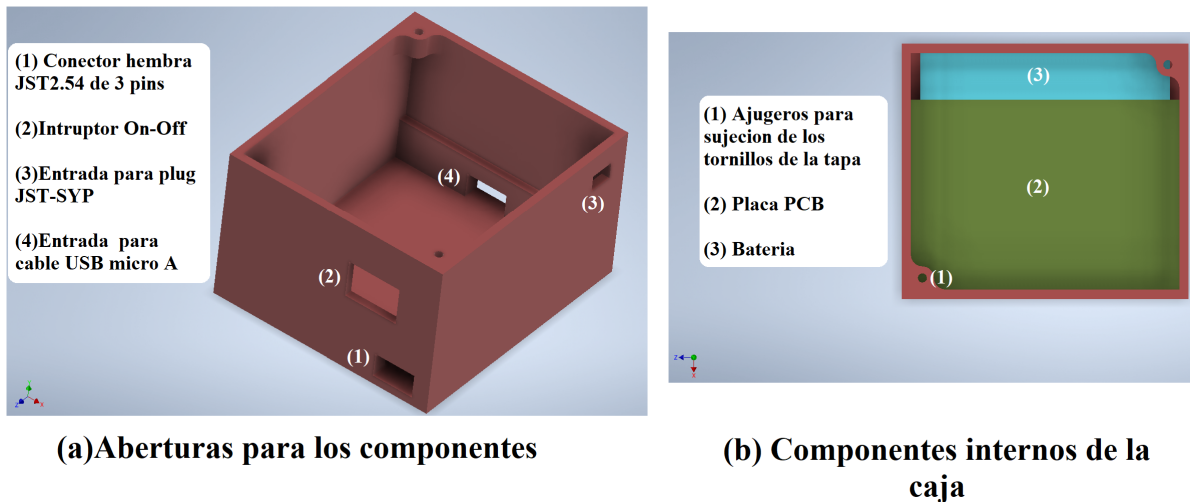


Nota: La figura (a) muestra las medidas del interruptor, la figura (b) muestra las medidas del cable tipo micro a, la figura (c) muestra el cable de conexión hembra y macho tipo JST-SYP, la figura (d) muestra las dimensiones del LED-RGB y finalmente la figura (e) muestra las dimensiones del conector hembra JST 2.54 de 3 pines (Autores)

Finalmente las medidas de la PCB y de la batería son las que mas espacio ocupan, ya que el espacio ocupado por la PCB forma un cubo con 59mm de largo 41mm de ancho y 37mm de alto mientras que el de la batería 50mm de largo 28mm de ancho y 12mm de alto. Tomando en cuenta todas las medidas mencionadas se dimensionó la caja de protección tratando de que no sobrepasara las medidas de la parte dorsal de la mano, debido a esto de se trató de acomodar la PCB y la batería de tal manera que no superen las medidas establecidas. Finalmente cabe recalcar que aunque se tiene las medidas de la mano tanto de hombre como de mujer se trabajará únicamente con las medidas de hombre.

Figura 33

Caja de protección



Nota: La figura (a) muestra donde se colocaran los componentes mencionados en la Figura 32 mientras que la figura (b) muestra como quedaron distribuidos los componentes que mas espacio ocupan dentro de la caja. (Autores)

■ **Diseño y construcción del dedal**

En el diseño del dedal se tomó en cuenta las dimensiones del dedo mencionadas en la Figura 31 de las cuales se utilizó el ancho del dedo índice y la largura del dedo a la palma, ya que no se tiene la medida de la longitud de la falange distal (primer falange del dedo donde se encuentra la uña) del dedo se trabajó con una medida estimada empíricamente.

- **Primer modelo**

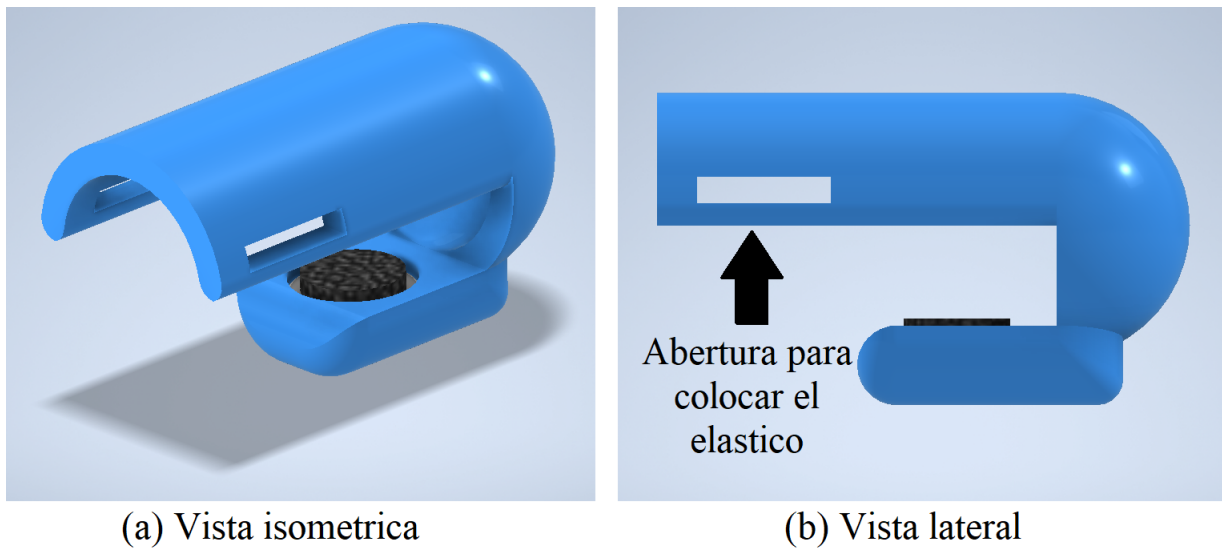
Para el modelo del primer dedal se trabajo con las siguientes medidas:

- Ancho del dedo: $20mm$
- longitud del dedo: $79mm$
- longitud estimada de la falange distal: $30mm$

Con estas dimensiones se obtuvo el modelo mostrado en la Figura 34, como se puede observar en la imagen existe una abertura para colocar un elástico, el cual tendrá la función de apretar o sujetar el dedal al dedo, ya que, aunque se halla tomado como referencia un estudio de medidas antropométricas, estas dimensiones siguen siendo estimaciones que en algunos casos podría aproximarse a la realidad mientras que en otros casos estaría muy lejos de acercarse a la medida real, por lo que el dedal siempre tendrá una holgura que provocando que se caiga del dedo con facilidad.

Figura 34

Primer modelo del dedal



Nota: La figura muestra el primer modelo de dedal con el que se trabajó. (Autores)

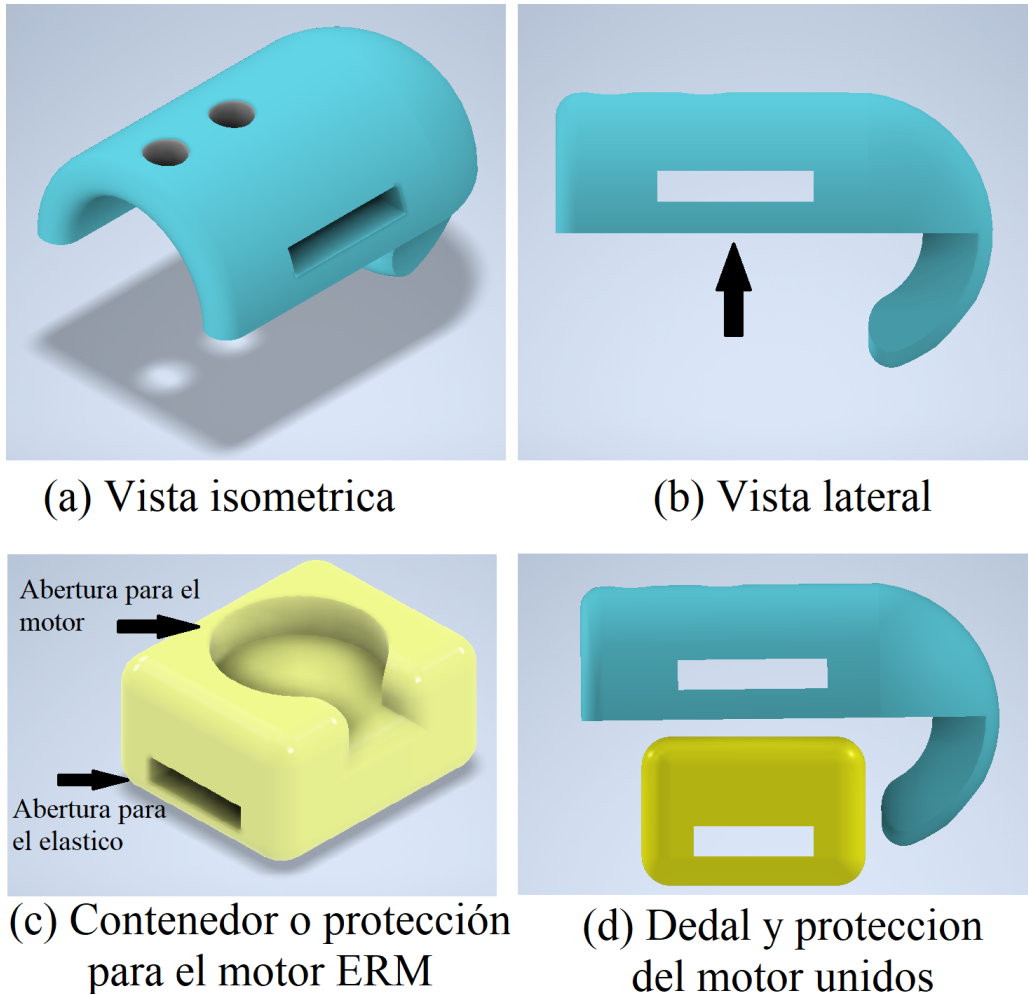
- Segundo modelo

Una vez realizado el primer modelo se pudo observar que el dedal estaba con sobredimensionado, además de que el motor ERM quedaba en una posición en la que no hacia contacto con la yema del dedo, por lo que se procedió a reducir las

dimensiones y separar la parte que soportaba al motor ERM de la que se sujeta al dedo, por lo cual el dedal paso a tener dos partes.

Figura 35

Segundo modelo del dedal



Nota: La figura muestra el segundo modelo de dedal con el que se trabajó. (Autores)

Con el modelo mostrado en la Figura 35 es mas fácil ajustar la ubicación del actuador a la yema del dedo además de que también se ajusta a diferentes dimensiones de dedos en lo que respecta a la distancia entre la yema del dedo a la uña.

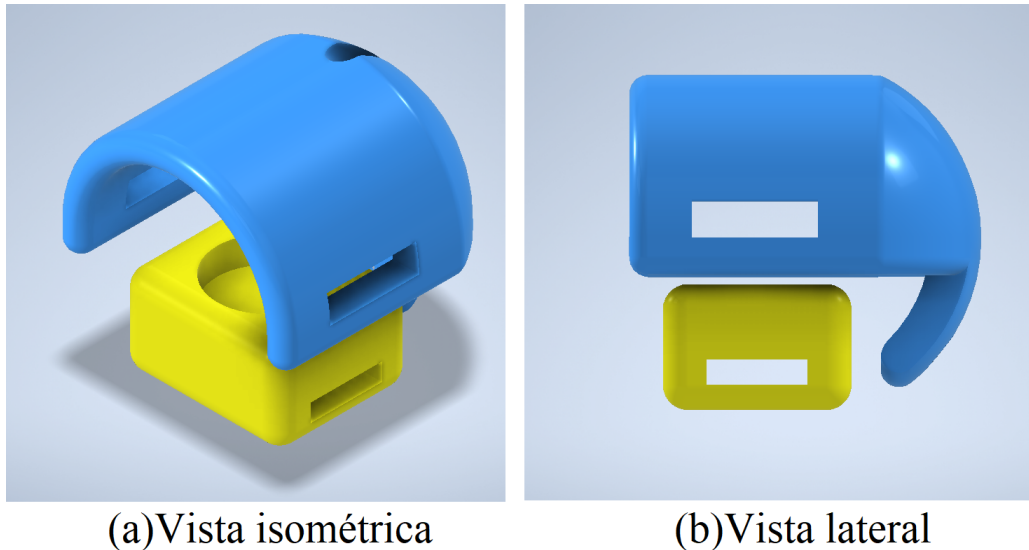
- **Tercer modelo**

Con el segundo modelo se pudo determinar que aun presenta un inconveniente ya que la longitud que cubre la falange distal sigue siendo muy grande por lo que se

procedió a reducir el largo del dedal con lo cual se obtuvo un tercer modelo que se ajustaba mejor al dedo.

Figura 36

Tercer modelo del dedal



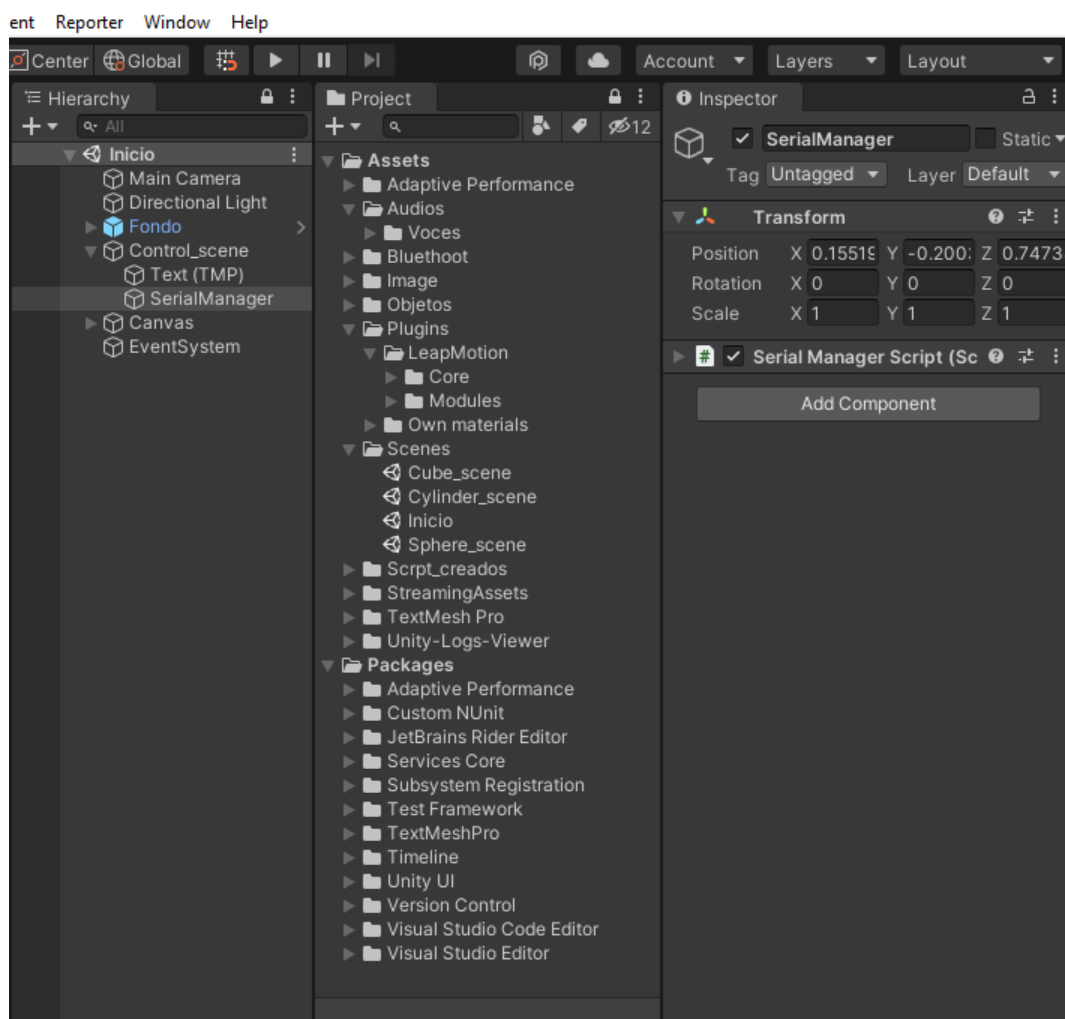
Nota: La figura muestra el tercer modelo de dedal con el que se trabajó. (Autores)

6.2.3.2. Comunicación del dispositivo portable

Para la comunicación Bluetooth se realiza un script en el que se ocupan las librerías IO.Ports y Threading que permiten el control de la velocidad de transmisión, el tiempo de retraso entre la comunicación en tiempo real y la apertura y cierre de los puertos COM del ordenador acorde a las necesidades. Para el caso planteado se ha utilizado una velocidad de comunicación de 9600 baudios, además un retraso en la comunicación de 0.1s. En la Figura 16 como se indicó se ubica el valor que se desea enviar al controlador ESP32 para ejecutar las acciones pertinentes, para esto se llama la función programada para enviar datos.

Figura 37

Script Control de Comunicación Serial

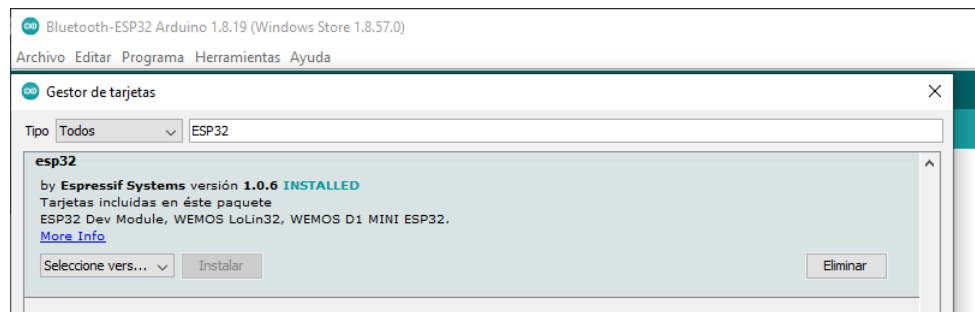


Nota: La figura muestra el script utilizado para el control de la comunicación serial y el envío de información inalámbrica (Autores)

Por otro lado la programación del ESP32 se realizó en el entorno de desarrollo ArduinoIDE el cual presenta la opción de gestionar una gran variedad de placas por medio del gestor de tarjetas, como se indica en la Figura 38, permitiendo la programación del controlador indicado. Otra ventaja de usar el entorno de programación de arduino es la librería de comunicación Bluetooth existente y su fácil uso, en la Figura 39 se puede apreciar las librerías ocupadas para el funcionamiento requerido en este prototipo inicial.

Figura 38

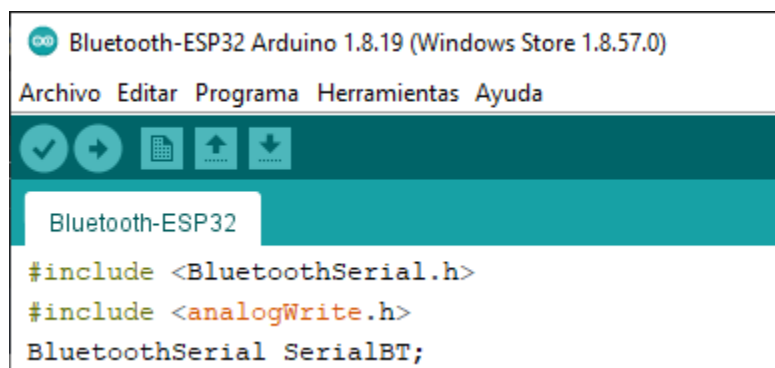
Gestor de tarjetas ArduinoIDE



Nota: La figura muestra el Gestor de Tarjetas de ArduinoIDE y la opción instalada para el controlador ESP32 (Autores)

Figura 39

Librerías para conexión Bluetooth



Nota: La figura muestra las librerías importadas para la conexión inalámbrica del dispositivo portable con el ordenador (Autores)

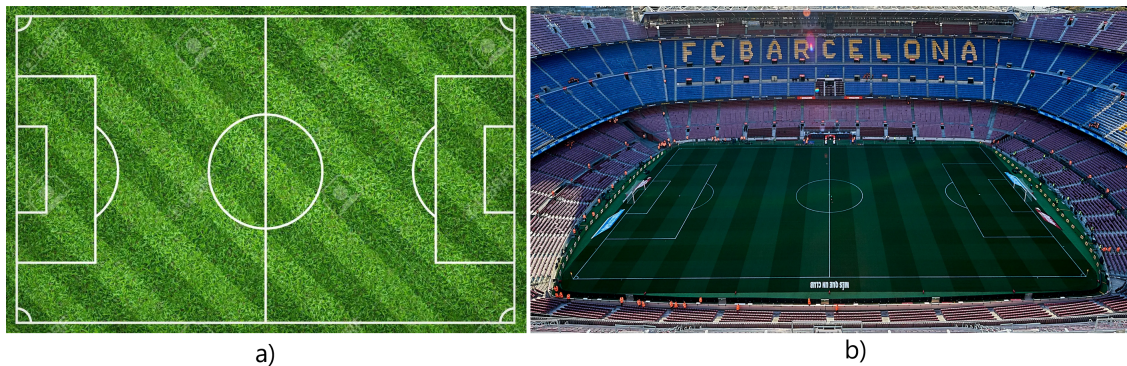
6.2.4. Comprobar el funcionamiento del diseño de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.

Entre las anomalías o fenómenos a analizar está la posible deformación del seguimiento de la figura por el ángulo de lectura presente en el dispositivo LMC. En la figura 40 se puede apreciar una percepción distinta de la figura de acuerdo al ángulo de inclinación del lente que toma la fotografía y el objetivo, es decir, si se observa la figura desde la vista superior se ve la

forma rectangular del estadio, pero si se observa con un ángulo de inclinación como en b) la percepción del gramado no es un rectángulo, es un polígono diferente (trapezio). Extrapolando esta suposición al presente trabajo se procedió a analizar si existe alguna deformación existente de las figuras del entorno virtual con el seguimiento de estas en el mundo real por efecto de los sensores ópticos del dispositivo LMC.

Figura 40

Comparación de la percepción de imágenes



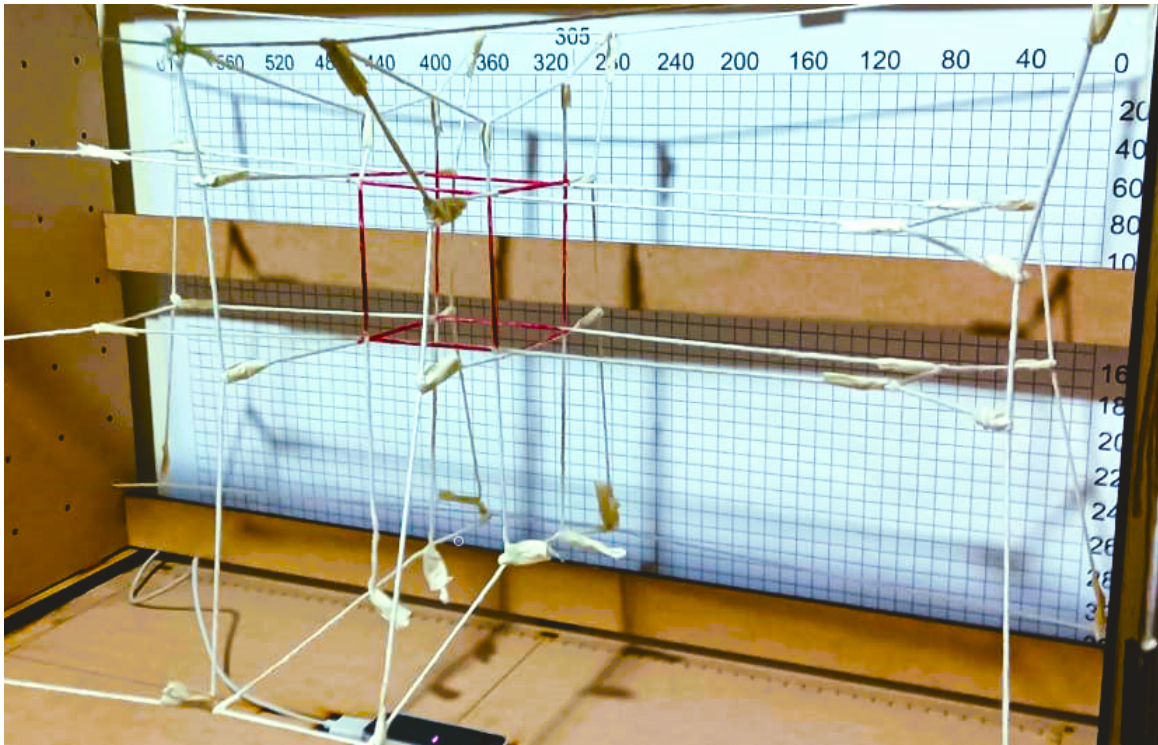
Nota: La figura muestra una comparación de percepción de figuras de acuerdo al ángulo de inclinación de la fotografía. a) Cancha de fútbol observada desde la vista superior (praewpailin, 2021), b) Cancha de fútbol observada desde uno de los laterales con un ángulo de inclinación (Vergara, s.f.)

La evaluación de las posibles deformaciones entre el rastreo de la figura en el entorno virtual y el real se realizó de manera empírica mediante de mediciones por medio de regletas y planos cuadrículados los cuales delimitan el espacio de trabajo del LMC. Para ello se procedió a localizar el dedo en el plano real focalizándose en los vértices o extremos de las figuras y comparar las medidas obtenidas con el tamaño de las geometrías en el entorno virtual para comprobar la existencia o no de una desviación en el rastreo y por consiguiente una deformación de estas.

El proceso para comprobar si el ángulo de visión del dispositivo LMC provoca una deformación en la geometría, parecido al descrito, se realizó por medio de un modelo que permitió representar la retroalimentación por parte del dispositivo portable al interactuar en el espacio de trabajo del LMC. En la figura 41 se visualiza la estructura utilizada para este procedimiento, el uso de cuerdas deslizables permitió definir la forma que produce el rastreo de las manos. En este caso se evaluó la geometría del cubo al ser un objeto sencillo y que proporciona una relación directa con la efectividad de la aplicación.

Figura 41

Estructura para modelar la figura deseada (Cubo)

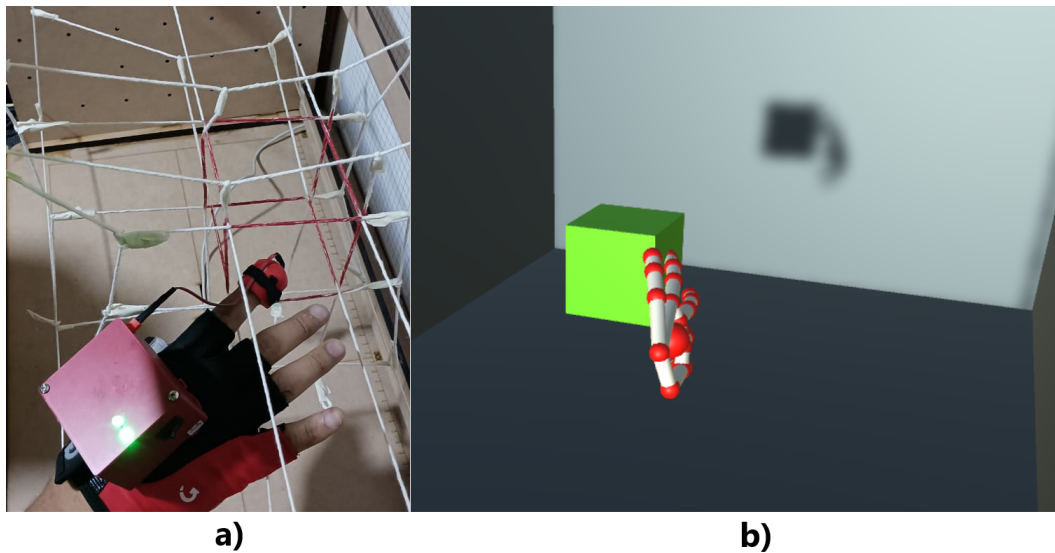


Nota: La figura muestra la estructura diseñada para visualizar la geometría resultante por el rastreo de las manos del LMC (Autores)

En las figuras 42 y 43 se observa parte del proceso, el cual consistió en establecer un contacto con las aristas, caras o vértices y desplazar las cuerdas, lo que consecuentemente fue delimitando el volumen de la figura que se percibe en el plano real. Cabe recalcar que para el procedimiento se presentaron dificultades al momento de realizarlo debido a la discontinuidad de lectura de la posición de las manos que producen las cuerdas localizadas encima del espacio de trabajo del LMC.

Figura 42

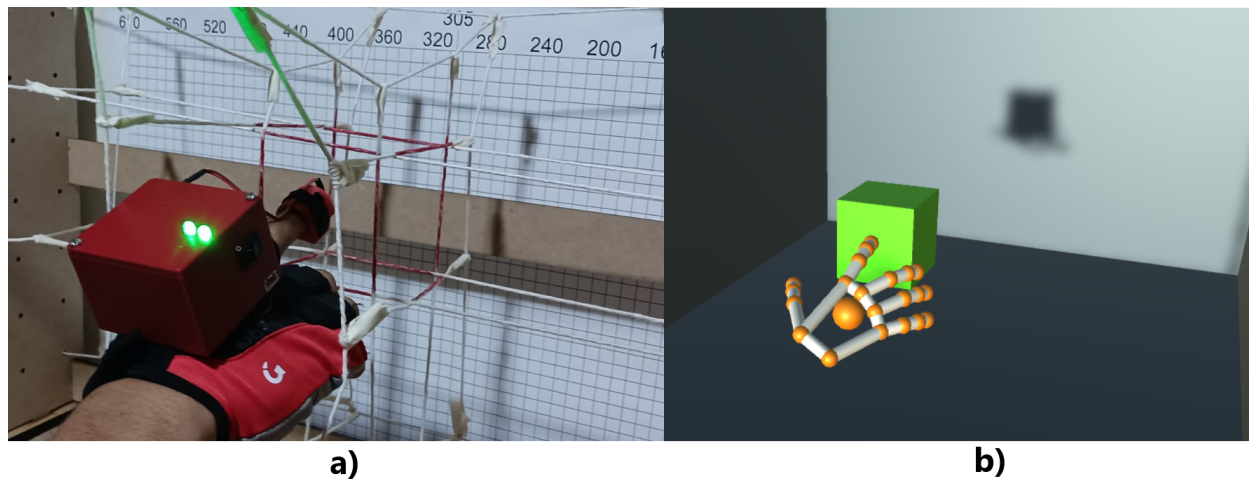
Contacto del dispositivo portable con la cara lateral del cubo



Nota: La figura muestra la respuesta del dispositivo portable ante el contacto del dispositivo portable con la cara derecha del cubo, véase el primer LED (desde la izquierda), en color verde indica un contacto con la periferia de la figura (Autores)

Figura 43

Contacto del dispositivo portable con la cara frontal del cubo

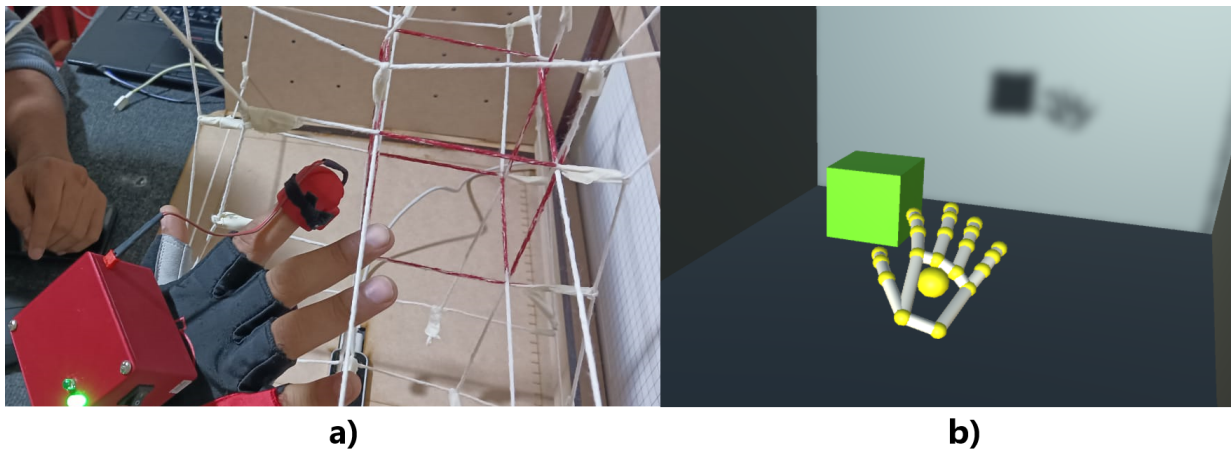


Nota: La figura muestra la respuesta del dispositivo portable ante el contacto del dispositivo portable con la cara frontal del cubo (Autores)

Luego de establecer el volumen reconocido durante el proceso anterior se evaluó las respuestas obtenidas por parte del dispositivo portable al interactuar como interfaz entre el dispositivo LMC y el entorno virtual de la aplicación desarrollada en la plataforma UNITY. En las imágenes posteriores se visualiza, por medio del LED indicador la interacción de la proyección de las manos ante el volumen de la geometría cargada. En la figura 44 denota que ante la no existencia de contacto el LED indicador permanece apagado y no existe retroalimentación háptica por parte del motor ERM; en tanto que si el dedo entra en contacto con la periferia este se enciende en color verde y por su parte el motor empieza a vibrar para denotar este, figura 43. En las figuras 45 y se denota el encendido del LED en color azul y rojo, además de un aumento de intensidad en la vibración del actuador háptico. El color azul y una intensidad media en la frecuencia del motor indica que el dedo ingresó en el volumen de la geometría; mientras que el color rojo y una vibración aumentada da a entender que el desplazamiento se está dando en dirección al centro de la figura.

Figura 44

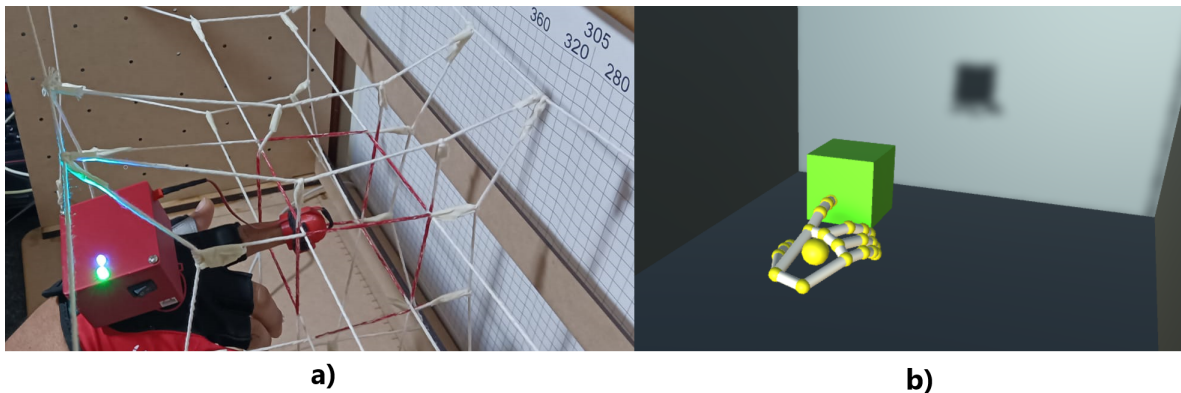
Respuesta del dispositivo háptico ante un contacto inexistente



Nota: La figura muestra como reacciona el dispositivo, LED indicador apagado, si la proyección del dedo se encuentra fuera del volumen del cubo (Autores)

Figura 45

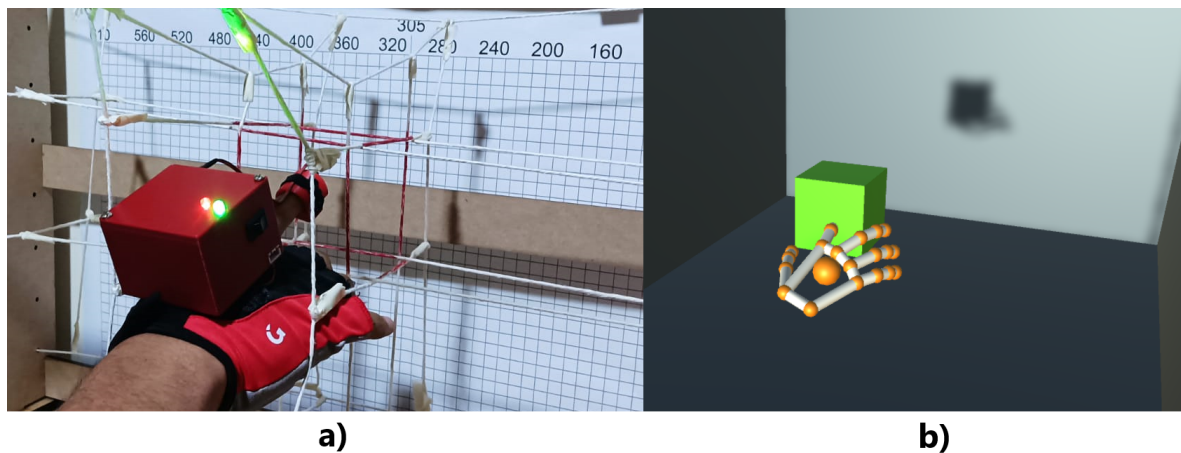
Respuesta del dispositivo háptico ante el ingreso del dedo índice en el volumen del cubo



Nota: La figura muestra como reacciona el dispositivo, LED indicador en color azul, si la proyección del dedo ingresa en el volumen del cubo (Autores)

Figura 46

Respuesta del dispositivo háptico ante la aproximación del dedo índice al centro del cubo



Nota: La figura muestra como reacciona el dispositivo, LED indicador en color rojo, si la proyección del dedo se desplaza al centro del volumen de la geometría (Autores)

Las pruebas de usuario del presente trabajo se realizaron en dos etapas. La primera corresponde a la realizada por los autores de la presente, para verificar y corregir fallos técnicos. La segunda etapa corresponde a las pruebas realizadas por el usuario objetivo con la finalidad de recibir una retroalimentación que permita mejorar el uso para ellos.

Figura 47

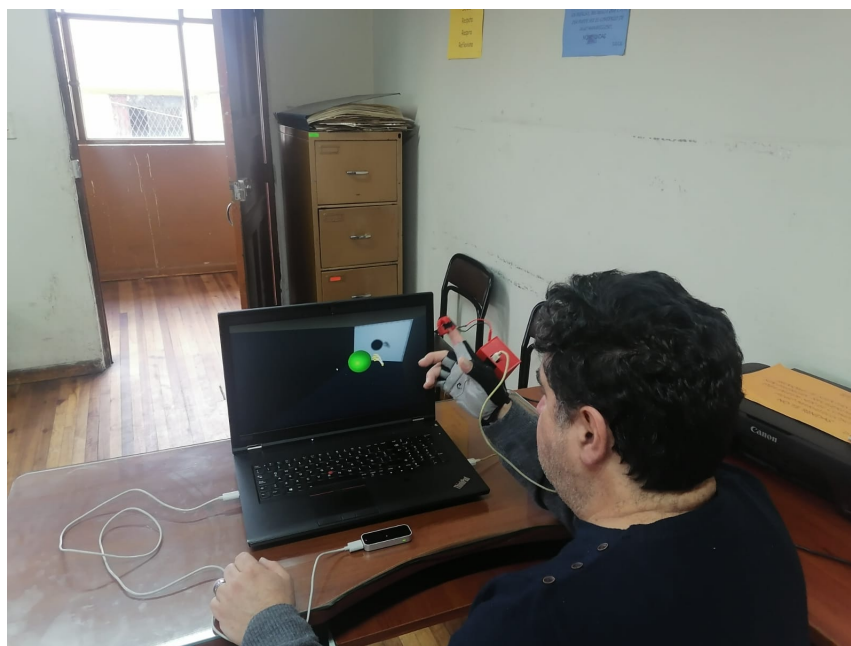
Pruebas de usuario de forma asistida



Nota: La figura muestra las pruebas de usuario realizadas a una persona con discapacidad visual del 80% (Autores)

Figura 48

Pruebas de usuario de forma independiente

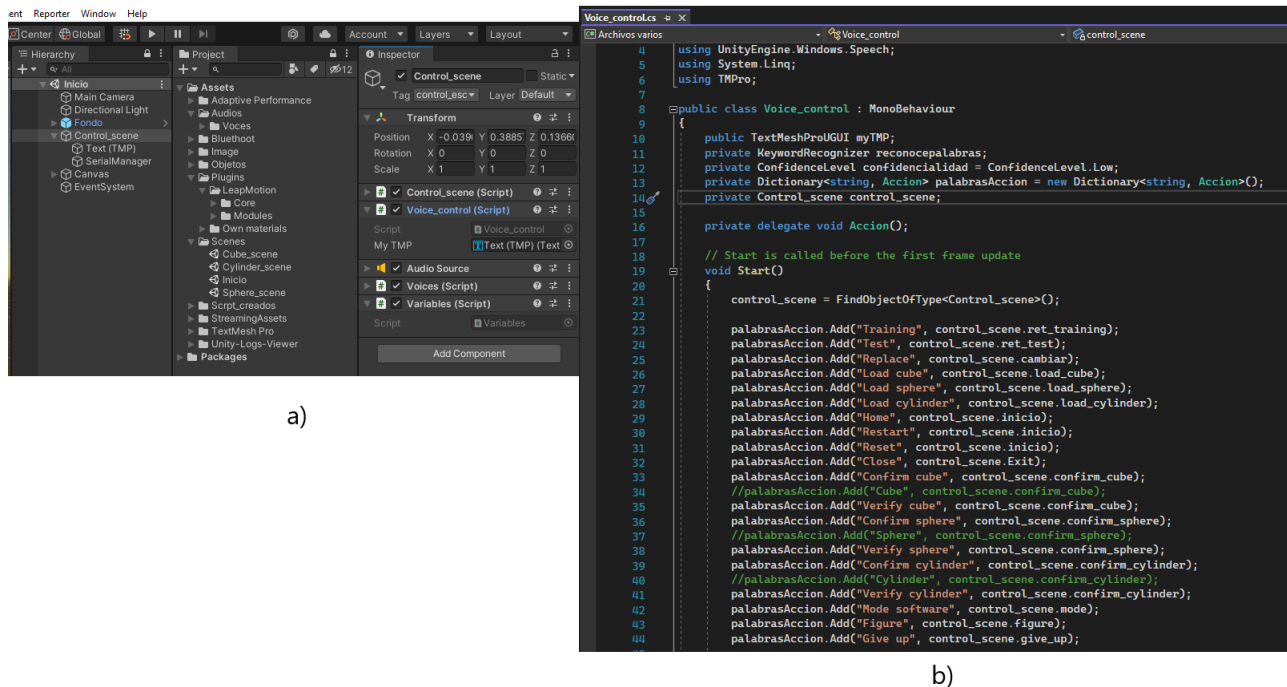


Nota: La figura muestra las pruebas de usuario realizadas a una persona con discapacidad visual del 80% (Autores)

Luego de realizadas las pruebas de usuario en personas no videntes se obtuvo como retroalimentación la necesidad de comandos de accesibilidad, siendo evidente una carencia de comandos por voz para el control de la aplicación. Teniendo en cuenta sus recomendaciones se investigó sobre la disponibilidad prestada por la plataforma UNITY para este fin, pudiendo encontrar la posibilidad de importar una librería proporcionada por Microsoft para el reconocimiento de voz; sin embargo, aunque presenta la desventaja de no contar con una traducción al idioma español esta se puede adaptar para un reconocimiento de bajo nivel el cual identifica las palabras tal cual se escriben por lo cual se logró el uso de palabras en la lengua requerida.

Figura 49

Comandos de accesibilidad - Comandos de voz

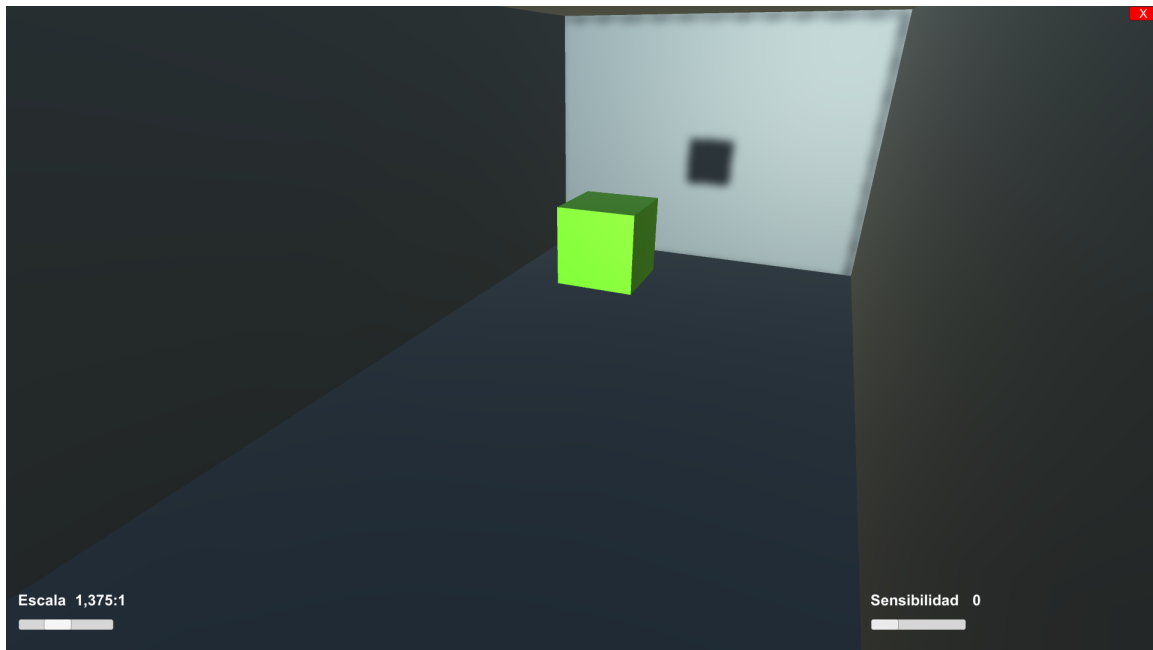


Nota: La figura muestra a) el objeto que contiene el script de reconocimiento de voz, b) el script que permite el reconocimiento de los comandos de voz (Autores)

Otra de las características que se pudieron añadir a la interfaz inicial fue la posibilidad de cambiar la escala de la figura con la intención de por poder proporcionar al usuario una diversidad de posibilidades al momento de interactuar con la geometría que seleccionen. Como se puede observar en la figura 50, la escala puede tomar valores intermedios comprendidos entre 1:1 y 2:1 para variar las dimensiones de cada elemento cargado.

Figura 50

Barra deslizante de escala

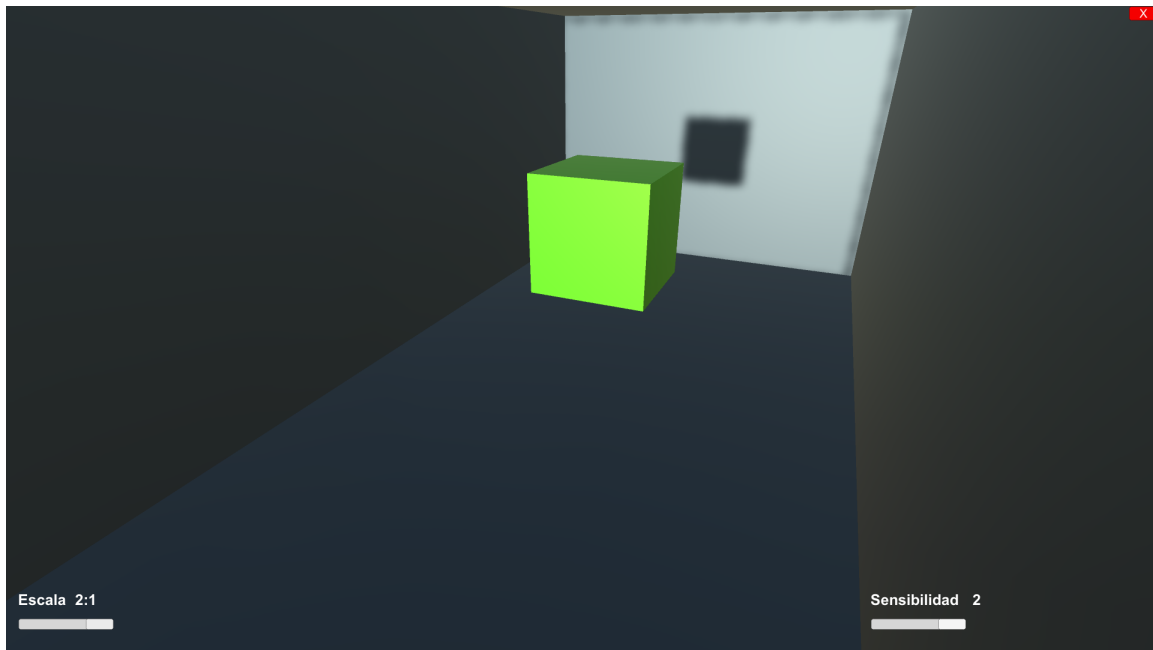


Nota: La figura muestra un cubo ajustado a una escala de 11:8 con la barra de desplazamiento identificada con la palabra escala (Autores)

Finalmente, la barra de desplazamiento etiquetada con la palabra sensibilidad, como se observa en las figuras 50 y 51 permite ajustar la intensidad con la que el motor ejercerá su retroalimentación háptica en el dedo del usuario. Se puede seleccionar entre las tres opciones, siendo: la sensibilidad 0 permite un rango de frecuencia comprendido entre 0 y 200 Hz; la sensibilidad 1 con una variación de entre 0 y 175 Hz, y la sensibilidad 2 disminuye el rango de frecuencia a valores entre 0 y 150 Hz. Esta característica permite ajustar la intensidad de la vibración acorde a las condiciones del usuario para evitar interacciones bruscas con el dispositivo que puedan incomodar al portador del dispositivo.

Figura 51

Barra deslizante de sensibilidad



Nota: La figura muestra un cubo ajustado a una escala de 2:1 y una sensibilidad seleccionada de 2 (Autores)

7. Resultados

7.1. Identificar los parámetros iniciales de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.

El primer objetivo específico permitió definir el funcionamiento del dispositivo LMC, su compatibilidad con la plataforma de desarrollo UNITY y las especificaciones necesarias para el ordenador que ejecute la aplicación desarrollada.

7.1.1. Funcionamiento del dispositivo LMC

La posición en la que trabaja el controlador es una consideración importante puesto que las variaciones de funcionamiento brindadas por el fabricante están diseñadas para un uso

específico. En el trabajo descrito se utiliza el modo escritorio debido a que la posición del usuario será una postura sentada enfrente del ordenador. Además con la identificación del área de trabajo, como indica la figura 6, se puede definir una distancia mínima entre la pantalla y el dispositivo LMC, mayor a 30cm, para con ello poder establecer unas dimensiones mínimas y máximas para las geometrías ocupadas en la aplicación: el cubo con una distancia de entre 100mm y 200mm por lado, la esfera con un diámetro mínimo de 100mm y un máximo de 200mm, y finalmente el cilindro con un rango de radio y altura de 35 a 70mm y 120 a 240mm, respectivamente.

7.1.2. Compatibilidad con la plataforma UNITY

El revisar la información proporcionada por la página oficial permite definir los SO con los que se puede trabajar, presentando una disponibilidad, inicial, para todo tipo de SO. Al considerar las opciones y los equipos con los que se cuenta al momento de realizar el presente trabajo se opta por el SO Windows 10.

7.1.3. Especificaciones mínimas del ordenador

Siendo el driver de control para el LMC la principal preocupación se establece un requerimiento mínimo para el uso del dispositivo LMC:

- * Windows 10, 64 bits.
- * Procesador Intel® Core™ i3 5th Gen.
- * 2 GB RAM.
- * Puerto USB 2.0.

7.1.4. Posición del dedo índice y relación de posición con la figura

El análisis de posibilidades para relacionar la posición del dedo con la nube de puntos que abarca la figura (*voxels*) permitió establecer una búsqueda más cerrada sobre las opciones que presenta el software siendo la más viable el uso de *colliders* para lograr el objetivo planteado. Además de la disponibilidad que presenta para figuras regulares como el cubo y la esfera cuyos *colliders* ya viene prefabricados y la disponibilidad de los **mesh colliders** que se adaptan al mallado de los objetos, en el presente trabajo se ocupó para la escena del cilindro.

7.1.5. Medidas antropométricas de la mano

A pesar de que se uso como referencias un estudio que recopila medidas antropométricas estándar de la mano estas siguen siendo estimaciones, ya que no se pueden conglomerar y representar a la población ecuatoriana y debido a que no existe un estudio que aglutine un banco de datos sobre las medidas antropométricas de la población de Ecuador se tuvo que inferir de manera empírica las medidas. Por lo cual las medidas de referencia usadas inicialmente en comparación con las medidas usadas en el modelo final difieren bastante, en la Tabla 2 podemos observar que para el caso del ancho y longitud del dedo índice, el porcentaje de error es de 35% y 24% respectivamente.

Tabla 2

Error relativo de las medidas antropométricas de la mano usadas para el diseño del dispositivo portable

	Medidas de referencia usadas inicialmente	Medidas usadas en el modelo final	Error absoluto	Error relativo
Ancho del dedo índice	23	15	8	35%
Longitud del dedo índice	79	60	19	24%
Longitud de la palma de la mano	116	106	10	9%
Anchura de la palma de la mano en el metacarpo	95	87	8	8%
Anchura de la palma de la mano hasta el dedo pulgar	114	106	8	7%

Nota: Tabla de las medidas de la mano usadas inicialmente como referencia contra las medidas usadas en los modelos finales junto con su porcentaje de error. (Autores)

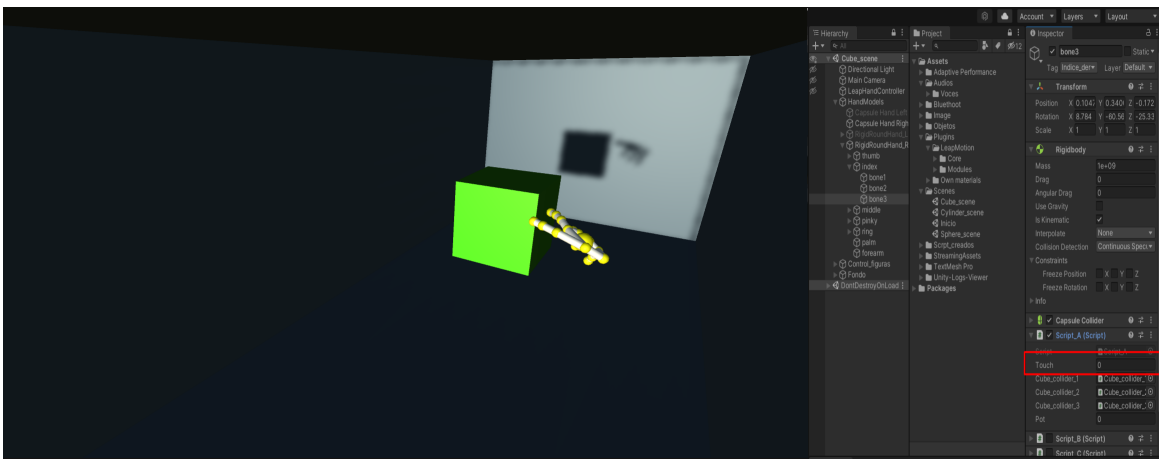
7.2. Diseñar una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.

7.2.1. Interfaz UNITY

La identificación y lectura de la documentación proporcionó los medios adecuados para la creación de una interfaz funcional y las variables de salida al dispositivo portable, como se observa en las figuras 52, 53, 54 y 55. En tanto que en la imagen 19 se aprecia la pantalla de inicio del programa.

Figura 52

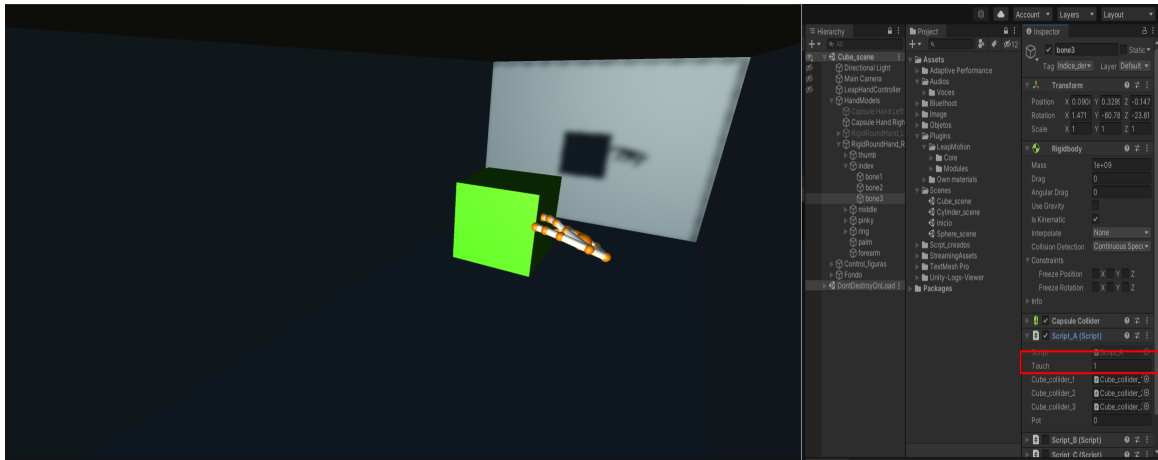
Variable de salida 0



Nota: La figura muestra la variable de salida cuando la mano está fuera de la figura virtual cargada (Autores)

Figura 53

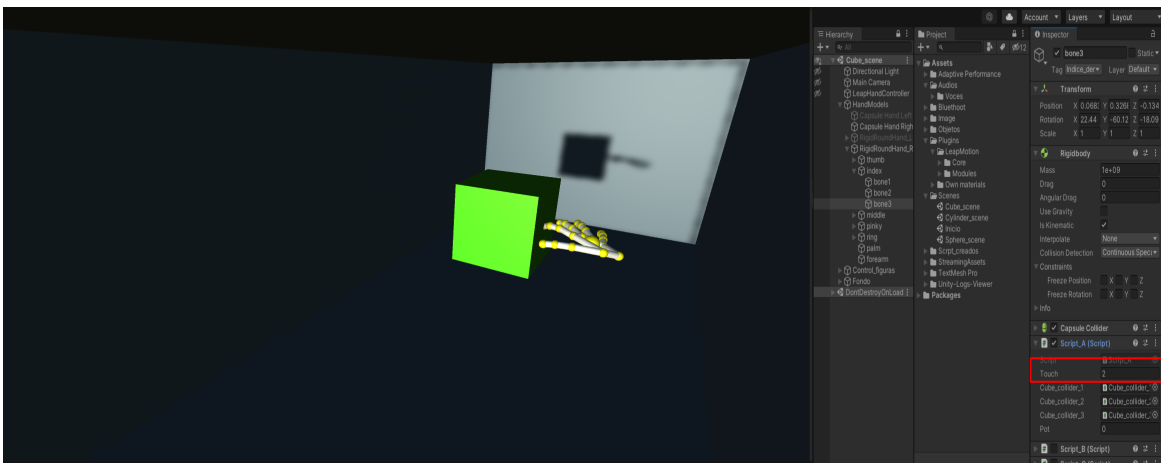
Variable de salida 1



Nota: La figura muestra la variable de salida cuando la mano está en la periferia de la figura virtual cargada (Autores)

Figura 54

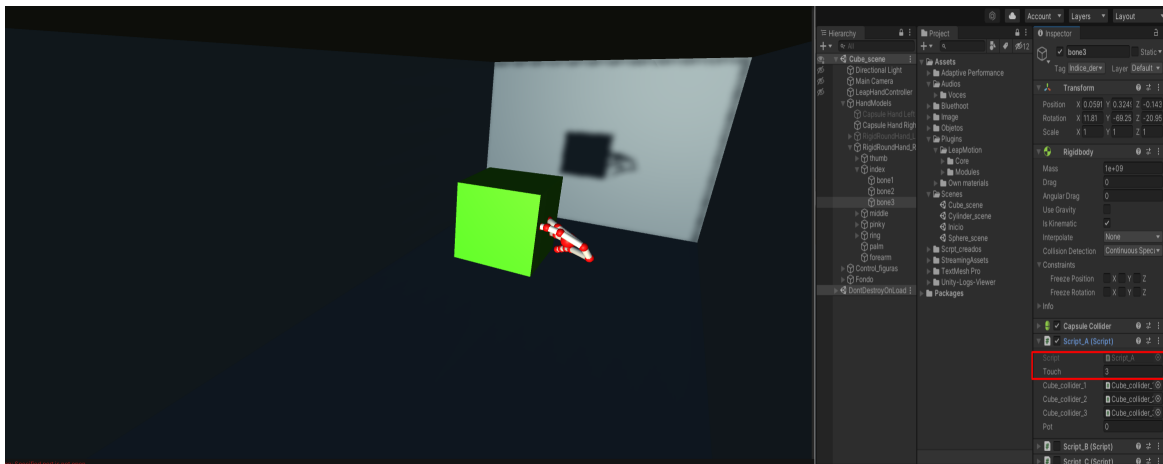
Variable de salida 2



Nota: La figura muestra la variable de salida cuando la mano está ingresando a la figura virtual cargada (Autores)

Figura 55

Variable de salida 3



Nota: La figura muestra la variable de salida cuando la mano está dentro de la figura virtual cargada (Autores)

7.2.2. Resultados del diseño del dispositivo portable

Luego de haber realizado la placa PCB se pudo observar que esta estaba ocupando un espacio rectangular de $58mm \times 1mm$ lo que sería equivalente a una área igual a $2378mm^2$ lo cual representaría un 26% del área total de la parte dorsal de la mano, sin embargo cuando se une todo dentro de la caja de protección el área total ocupada por el dispositivo representa el 35%. No obstante las medidas antropométricas usadas como referencia no se acercaban a la media real de los ecuatorianos por lo que el área total ocupada por la caja en la parte dorsal de la caja esta mas en un rango del 80% al 90% y en el caso de personas con manos pequeñas este porcentaje podría alcanzar e incluso sobrepasar el 100% del espacio por lo que el dispositivo resultaría poco ergonómico. En la Figura 56 se puede observar las diferentes imágenes del dispositivo portátil y como todas las partes que lo conforman se unen.

Figura 56

Vistas del dispositivo portable



Nota: La figura muestra varias vistas del dispositivo portable (Autores)

7.3. Implementar el diseño de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.

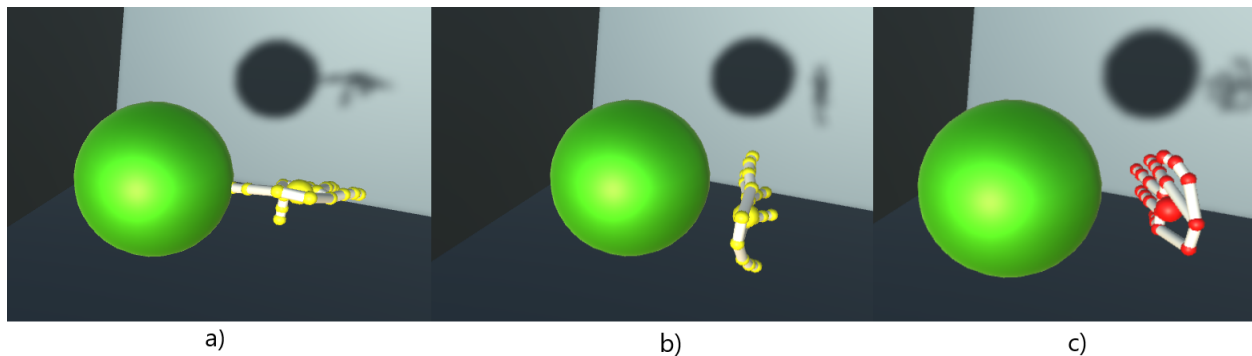
Una vez obtenidas las variables de salida y adaptar la comunicación Bluetooth, tanto para la aplicación como para el ESP32 se logró completar un prototipo funcional del objetivo propuesto el cual pudo ser ocupado para las pruebas de usuario que se realizaron a posterior.

Si bien el funcionamiento cumple con su objetivo se observan algunas limitaciones intrínsecas del dispositivo LMC, acorde a la posición de este, como es el rastreamiento de las manos

si tiene una posición que coloca el dorso en dirección al lector del LMC o si el ángulo de la mano sobrepasa un ángulo aproximado a los 90 grados. También se observa una contracción de los dedos al contacto con un elemento que contenga un componente de cuerpo rígido motivo por el cual se tuvo que retirar dicho componente de las figuras puesto que el usuario objetivo no podría denotar este acontecimiento. Con esto mencionado se determina un rango de inclinación necesario para que la mano pueda ser reconocida de manera adecuada, tomando en cuenta como 0 grados una posición paralela de la palma de la mano con el LMC se tiene el rango de inclinación permisible, con respecto al eje z de la plataforma UNITY, de entre 90 y -90 grados para una lectura más acertada del movimiento de las manos como se muestra en la figura 57.

Figura 57

Lectura de la mano respecto al eje z de la plataforma UNITY



Nota: La figura muestra la lectura de la posición de la mano respecto a un eje z presente en la aplicación, siendo esta la profundidad del mismo, en a) 0°, b) 90° y c) -90° (Autores)

De la misma forma si la mano toma una posición antinatural de 90 grados la lectura de esta solo se reconoce sin errores cuando se ubica en el lado derecho si es la mano de el lado indicado y viceversa tomando como como referencia el plano sagital de una persona, como se observa en la figura 58.

Figura 58

Lectura de la mano respecto al plano sagital de una persona



Nota: La figura muestra la lectura de la mano derecha respecto al plano sagital de una persona, a) lado derecho del plano sagital y b) lado izquierdo del plano sagital (Autores)

7.4. Comprobar el funcionamiento del diseño de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.

En las pruebas de usuarios realizadas por los autores de este trabajo se obtuvo un resultado positivo en cuanto a la interacción y cumplimiento de las especificaciones iniciales planteadas para el funcionamiento de la aplicación realizada en UNITY en conjunto con el dispositivo portable; sin embargo, se tenía que comprobar que la geometría generada por la retroalimentación háptica sea igual a la figura de la aplicación puesto que como se especificó en la sección 6.2.4 existe la posibilidad de una deformación en el rastreamiento de la figura a causa del ángulo de visión del LMC.

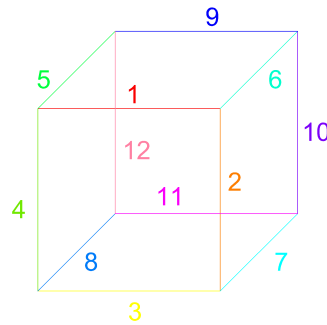
7.4.1. Deformación del rastreo de las figuras virtuales en el plano real

Durante las pruebas realizadas se tomaron las mediciones correspondientes de cada una de las aristas formadas por las cuerdas, las tablas a continuación presentan los resultados de estas, evaluadas en las escalas: 1:1, 3:2 y 2:1, teniendo como dimensiones (para las aristas

del cubo), previstas en la plataforma UNITY, de: 100, 150 y 200mm, respectivamente. En la figura 59 se enumeran las aristas para una fácil identificación de las medidas realizadas.

Figura 59

Enumeración de las aristas de un cubo



Nota: La figura muestra la enumeración, impuesta, de las aristas para una identificación eficaz de las medidas correspondientes de cada una (Autores)

Tabla 3

Medidas obtenidas del cubo en diferentes escalas.

Arista	Escala 1:1	Escala 3:2	Escala 2:1
A1	82	137	186
A2	83	136	185
A3	83	136	185
A4	82	135	185
A5	84	136	186
A6	83	137	185
A7	82	136	185
A8	82	135	187
A9	83	137	187
A10	82	136	185
A11	82	137	185
A12	84	137	187

Nota: La tabla muestra los valores medidos en milímetros (mm) de cada una de las aristas que conforman el cubo con una escala 1:1, 3:2 y 2:1 (Autores)

Como se aprecia en la tabla 3, la longitud de las aristas es menor de la esperada y oscilante. La diferencia de longitud entre las aristas se debe a la carencia de instrumentos de precisión para medir y una estructura que proporcione mayor rigidez durante la medición. Posterior a la obtención de los datos se procedió a sacar una longitud media de las aristas para analizar una posible disminución constante de las medidas esperadas.

Ecuación para encontrar la media de las aristas:

$$L_{ap} = \frac{\sum_{i=1}^{12} L_{ai}}{12} \quad (10)$$

Donde:

L_{ap} = Longitud promedio de las aristas.

L_{ai} = Longitud de la arista i.

Ecuación para determinar el error generado de la longitud de la arista:

$$E_a = L_{ao} - L_{ap} \quad (11)$$

Donde:

E_a = Error en la longitud de la arista.

L_{ao} = Longitud de la arista dimensionada en la plataforma UNITY.

Media de la arista del cubo de escala 1:1

$$L_{ap} = \frac{82 + 83 + 83 + 82 + 84 + 83 + 82 + 82 + 83 + 82 + 82 + 84}{12}$$

$$L_{ap} = 82.667mm \approx 83 \quad (12)$$

Error de la arista del cubo de escala 1:1

$$E_a = 100 - 83$$

$$E_a = 17mm \quad (13)$$

Media de la arista del cubo de escala 3:2

$$L_{ap} = \frac{137 + 136 + 136 + 135 + 136 + 137 + 135 + 137 + 137 + 136 + 137 + 137}{12}$$

$$L_{ap} = 136.333 \approx 136 \quad (14)$$

Error de la arista del cubo de escala 3:2

$$E_a = 150 - 136$$

$$E_a = 14mm \quad (15)$$

Media de la arista del cubo de escala 2:1

$$L_{ap} = \frac{186 + 185 + 185 + 185 + 186 + 185 + 185 + 187 + 187 + 185 + 185 + 187}{12}$$

$$L_{ap} = 185.667 \approx 186 \quad (16)$$

Error de la arista del cubo de escala 2:1

$$E_a = 200 - 186$$

$$E_a = 14mm \quad (17)$$

En las ecuaciones 13, 15 y 17 se aprecia la diferencia generada entre las medidas en el software y las dimensiones de seguimiento en el espacio de trabajo del LMC. En estas ecuaciones se nota una diferencia considerable en cuanto a rango de desplazamiento de la mano; sin embargo, la geometría no presenta una deformación perceptible de las diferencias, aún cuando ya sea ha mencionado las posibles causas de esta variación.

7.4.2. Dificultad al momento de identificar las geometrías

Las consideraciones que se tienen al momento de evaluar resultados como la limitación del seguimiento de la mano por parte del dispositivo LMC respecto a la posición de la mano y al ángulo de inclinación de esta da a denotar de por sí un resultando no tan favorable. A lo mencionado se le debe añadir la dificultad que presenta el tener un solo punto de referencia (dedo índice de la mano derecha) al momento de intentar identificar una geometría. Por esto no se logró identificar las figuras por parte de la persona no vidente. Sin embargo, se

obtuvo una aceptación favorable sobre el trabajo realizado y el uso de la aplicación para la retroalimentación háptica en el modo de entrenamiento.

8. Conclusiones

Se identificó los parámetros computacionales mínimos para el funcionamiento de la aplicación y la instalación de drivers del LMC, además de determinar el área de trabajo máximo del dispositivo (500 x 300 x 300 mm) permitiendo definir una distancia mínima entre la pantalla del computador y el dispositivo LMC de 300 mm. Entre las opciones de posicionamiento para el LMC se seleccionó el modo escritorio por la facilidad de montaje y por que la lectura de rastreamiento se ajusta a las necesidades del software. Por otro lado, los parámetros de las medidas antropométricas delimitó el dimensionamiento para el dispositivo portable proporcionando la base del diseño.

El uso de módulos y scripts proporcionados por parte del fabricante brinda una facilidad al momento de realizar el desarrollo de aplicaciones que ocupan el LMC. No obstante, presenta limitaciones y complicaciones al momento de ensamblar o realizar un funcionamiento conjunto de las mencionadas, también en la documentación proporcionada sobre las funciones se indica que algunas no funcionan de manera adecuada por lo que se debe tener precaución al momento de considerar alguna como una opción. La determinación de las variables de salida da las pautas para diseñar los circuitos que se necesitan para el dispositivo portable, lo que por consiguiente permite el cálculo de consumo energético que demandan los componentes, 2248.4 [W], para la selección de la alimentación se optó por una batería LIPO de 7.4 [V] con un consumo permisible de funcionamiento de 4.4 [V] se obtiene una durabilidad de 2.9 Horas.

Para la construcción del dispositivo portable se uso como referencia un estudio de estimación de las medidas antropométricas promedio de la mano de las cuales se uso únicamente como guía las medidas de un hombre adulto, teniendo entonces que la longitud del dedo índice (79mm) y su anchura (23mm) para el diseño del dedal; en tanto que para el dimensionamiento de la caja que porta el circuito y la batería tiene como base las dimensiones de la longitud de la palma de la mano (116mm) y la anchura de esta (114mm). Sin embargo una finalidad coherente radicó en lograr que el dispositivo portable ocupe el menor espacio posible en la parte dorsal de la mano, sin embargo esta finalidad no se logro ya que las medidas usadas como referencia no se acercaron a la realidad, debido a esto resultó un sobre-dimensionamiento del dispositivo el cual termino ocupando un rango del 80% al 90% del espacio disponible en la parte dorsal de la mano.

La comunicación Bluetooth del dispositivo con una velocidad de 9600 baudios y un retardo de salida de 0.1 s, es adecuada permitiendo obtener una retroalimentación en tiempo real al momento de comunicar el dispositivo portable con la interfaz para el seguimiento de la figura tridimensional cargada. Esto permitió determinar de forma práctica y visual la existencia de una deformación imperceptible en la geometría de la figura cargada. Un hecho notable es la disminución del volumen al momento de realizar el seguimiento de la periferia de la figura en el área de trabajo del LMC. Como se aprecia en la ecuación 13 el error en la longitud de las aristas en una escala 1:1 es de 17mm; mientras que en la ecuación 15 se observa como si la figura se escala el error disminuye aproximadamente 14mm en la longitud de las aristas; finalmente en la dimensión máxima de las figuras, es decir, escalada en un factor de 2:1, como se analizó en la ecuación 17, el error se mantiene en una reducción aproximada de 14mm por arista. Aún cuando se nota una diferencia en las longitudes la deformación de la geometría es prácticamente nula o imperceptible lo que corrobora el funcionamiento conjunto de la aplicación desarrollada en la plataforma UNITY, el LMC y el dispositivo portable. Por último cabe recalcar la dificultad encontrada por parte del usuario no vidente que colaboró con las pruebas realizadas al momento de identificar las figuras al contar únicamente con un punto de referencia y complementado por las limitaciones de rastreo presentes al momento de cruzar la mano su respectivo lado del plano sagital, provocando la necesidad de el uso de la mano contraria (izquierda) para el escaneo del lado izquierdo de la geometría.

9. Recomendaciones

- Como principal punto a tomar en cuenta es la ergonomía del dispositivo portable ya que es fundamental al momento de usarlo, debido a esto para futuros desarrollos se debe priorizar la disminución del tamaño de la placa PCB del circuito que lleva el dispositivo, buscando que logre tener el menor tamaño posible, además también se debe revisar de manera minuciosa el consumo de energético para tratar de optimizarlo y así poder usar una batería de menor tamaño lo cual de la misma manera reduciría el tamaño del dispositivo portable.
- Aplicar el uso de visión artificial o asistencia visual por computadora para economizar el uso de equipos y evaluar la efectividad al momento de realizar el rastreo de las manos en diferentes posiciones.
- Adaptar alguna librería de reconocimiento de voz en lenguaje español a UNITY para permitir un mejor reconocimiento de frases o palabras y evitar fallos por acentos

demasiado marcados o errores de pronunciación de las letras. Además de incluir un diccionario de sinónimos para lograr una mejor fluidez al momento de interactuar con el programa.

- Realizar un circuito para el control de carga de la batería de Litio debido a que en las pruebas se determinó que el cargador no controla este aspecto y puede deteriorar o en el peor de los casos dañar la batería y la sustitución de la misma.
- Para una mejor relación de deformación de las geometrías realizar un modelo que no genere interferencia en la lectura del LMC y que puede ser rígido a la hora de realizar mediciones; además del uso de instrumentos con mayor exactitud.

Referencias

- Ahmad, A., Migniot, C., y Dipanda, A. (2019). Hand pose estimation and tracking in real and virtual interaction: a review. *Image and Vision Computing*, 89, 35-49. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0262885619300861> doi: <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2019.06.003>
- Ali, K., y Liu, A. (2020, julio). *Fine-grained vibration based sensing using a smartphone*.
- Arief Budijanto, S. T. M. T., Winardi, S., Susilo, K. E., y Pustaka, S. M. (2021). *Interfacing esp32*. SCOPINDO MEDIA PUSTAKA. Descargado de https://books.google.com.hk/books?id=JPQ4EAAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=ESP32&hl=zh-CN&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=ESP32&f=false
- Brown, P. (2019, dec). *Ces 2020: Haptic feedback smartphone to debut*. Descargado de <https://electronics360.globalspec.com/article/14373/ces-2020-haptic-feedback-smartphone-to-debut>
- Casado Iglesias, C. (2015). *Entornos de desarrollo*. RA-MA Editorial.
- Chen, W., Yu, C., Tu, C., Lyu, Z., Tang, J., Ou, S., ... Xue, Z. (2020). A survey on hand pose estimation with wearable sensors and computer-vision-based methods. *Sensors*, 20(4). Descargado de <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/4/1074> doi: 10.3390/s20041074
- CONADIS. (2022). *Estadísticas de discapacidad*. Descargado de <https://www.consejodiscapacidades.gob.ec/estadisticas-de-discapacidad/> (Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades)
- Costa, G., Gusberti, A., Graffigna, J. P., Guzzo, M., y Nasisi, O. (2007, nov). Mobility and orientation aid for blind persons using artificial vision. *Journal of Physics: Conference Series*, 90, 012090. Descargado de <https://doi.org/10.1088/1742-6596/90/1/012090> doi: 10.1088/1742-6596/90/1/012090
- Curiel, Y., Icasio, O., Sepúveda, G., Hurtado, J., y González, J. (2016, 01 de Nov). Leap motion controller three dimensional verification and polynomial correction. *Measurement*, 93, 258-264. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224116303761>
- Dogan, I. (2008). *Programacion de microcontroladores pic*. Marcombo. Descargado de <https://elibro.net/es/lc/bibliotecaups/titulos/45918>
- Dominguez Diaz, A., Navarro Pulido, F., y Castro Gonzalez, J. M. (2017). *Unity 2017.x: curso practico*. RA-MA Editorial. Descargado de <https://elibro.net/es/lc/bibliotecaups/titulos/106501>

- Ducassee, J., Brock, A., y Jouffrais, C. (2017). *Accessible interactive maps for visually impaired users*.
- Ed Cutrell, M. S. (2020). *Enabling people with visual impairments to navigate virtual reality with a haptic and auditory cane simulation*. Descargado de <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/enabling-people-visual-impairments-navigate-virtual-reality-haptic-auditory-cane-simulation-2/> (Microsoft. Recuperado el 20 de Noviembre de 2021, de)
- Elchinger, G. M. (1982). Mobility cane for the blind incorporating ultrasonic obstacle sensing apparatus. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 71(1), 237-237. Descargado de Conelpasodelosa~nossehanidoadaptandotecnologiasdeultra-sonido doi: 10.1121/1.387283
- Eric, S. (2011, julio). *Haptics technology: picking up good vibrations*. Descargado de <https://www.eetimes.com/haptics-technology-picking-up-good-vibrations/>
- ESPRESSIF. (2020). *Esp32wroom32 datasheet*. Descargado de https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf (Accedido el 24 de julio de 2022)
- Ferrer Martinez, J. (2015). *Desarrollo de interfaces*. RA-MA Editorial.
- Gallace, A. (2015). Tactile processing. En J. D. Wright (Ed.), *International encyclopedia of the social behavioral sciences (second edition)* (Second Edition ed., p. 14-19). Oxford: Elsevier. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080970868231760> doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097086-8.23176-0>
- Garcia Solano, H. E. a. (2018). *Diseno y discapacidad visual: metodologia y orientaciones de proyectos para la accesibilidad*. Editorial UPTC. Descargado de <https://elibro.net/es/lc/bibliotecaups/titulos/131456>
- Godbold, A. (2018). Mastering ui development with unity : An in-depth guide to developing engaging user interfaces with unity 5, unity 2017, and unity 2018. *Packt Publishing, Limited*. Descargado de <https://www.proquest.com/legacydocview/EBC/5379698?accountid=32861>. (ProQuest Ebook Central,)
- Guerrón, N. (2018). *Estudio y desarrollo de interfaces sensitivas de realidad virtual y aumentada para invidentes en dispositivos portátiles*. Descargado de <http://oa.upm.es/52644/>
- Hicks, S. (2014). *Seeing the light: smart glasses boost vision for partially sighted people (ver la luz: las gafas inteligentes mejoran la visión de las personas con deficiencia visual*. Descargado de <https://www.theguardian.com/business/2014/aug/31/seeing-light-inventor-smart-glasses-vision-blind-people> (S. Hickey, Entre-

- vistador) Recuperado el 2 de Noviembre de 2021, de)
- Hogbin, M. (2019, enero). *HAND WORN INTERFACE DEVICE* (n.º 16631831). San Francisc, California. Descargado 2022-01-08, de <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=W02019018702>
- Houston, A., Walters, V., Corbett, T., y Coppack, R. (2021). Evaluation of a multi-sensor leap motion setup for biomechanical motion capture of the hand. *Journal of Biomechanics*, *127*, 110713. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021929021004814> doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110713>
- Huang, Y., Yao, K., Li, J., Li, D., Jia, H., Liu, Y., ... Yu, X. (2021). Recent advances in multi-mode haptic feedback technologies towards wearable interfaces. *Materials Today Physics*, 100602. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542529321002637> doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2021.100602>
- Johnson, K. (2020). *Feel the view*. Descargado de <https://thenewswheel.com/ford-feel-the-view-smart-window/> (thenewswheel. Recuperado el 20 de 11 de 2021, de)
- Kajimoto, H., Suzuki, M., y Kanno, Y. (2014). Hamsatouch: Tactile vision substitution with smartphone and electro-tactile display. En (p. 1273–1278). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. Descargado de <https://doi.org/10.1145/2559206.2581164> doi: 10.1145/2559206.2581164
- Kim, J. R., y Shin, S. (2017). Touch3d: Touchscreen interaction on multiscopic 3d with electro-vibration haptics. En *Acm siggraph 2017 posters*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. Descargado de <https://doi.org/10.1145/3102163.3102196> doi: 10.1145/3102163.3102196
- Kirby, D. (2020). *Should i choose head mounted a or b in the leap service provider script?* Descargado de <https://support.leapmotion.com/hc/en-us/articles/360005851378-Should-I-choose-Head-Mounted-A-or-B-in-the-Leap-Service-Provider-script->
- Lederman, S., y Klatzky, R. (2009, 10). Haptic perception: A tutorial. *Attention, perception psychophysics*, *71*, 1439-59. doi: 10.3758/APP.71.7.1439
- Lee, J., Kim, D., Sul, H., y Ko, S. H. (2021). Thermo-haptic materials and devices for wearable virtual and augmented reality. *Advanced Functional Materials*, *31*(39), 2007376. Descargado de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adfm.202007376> doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202007376>
- Lidon, M. (2019). *Unity 3d*. Marcombo.
- Martínez, J., García, A., Oliver, M., Molina, J. P., y González, P. (2016). Identifying virtual 3d geometric shapes with a vibrotactile glove. *IEEE Computer Graphics and Applications*,

36(1), 42-51. doi: 10.1109/MCG.2014.81

- Mekhalfi, M. L., Melgani, F., Zeggada, A., De Natale, F. G., Salem, M. A.-M., y Khamis, A. (2016). Recovering the sight to blind people in indoor environments with smart technologies. *Expert Systems with Applications*, 46, 129-138. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417415006831> doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.09.054>
- Menard, M., y Wastaff, B. (2015). *Game development with unity*. CENGAGE Learnin.
- Microelectronics, S. (2013). *Ld29300*. Descargado de https://www.mouser.ec/datasheet/2/389/stmicroelectronics_cd00003208-1205287.pdf
- Motola Barnes, M. (s.f.). *Overview of haptic actuators*. Descargado de <https://blog.piezo.com/haptic-actuators-comparing-piezo-erm-lra>
- Navarro, F., Martinez, A., y Martinez, J. M. (2018). *Realidad virtual y realidad aumentada: desarrollo de aplicaciones*. RA-MA Editorial.
- OMS. (2021a). *Blindness and vision impairment*. Descargado de <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment>
- OMS. (2021b). *Ceguera y discapacidad visual*. Descargado de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment>
- Ozioko, O., Karipoth, P., Hersh, M., y Dahiya, R. (2020). Wearable assistive tactile communication interface based on integrated touch sensors and actuators. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 28(6), 1344-1352. doi: 10.1109/TNSRE.2020.2986222
- Pheasant, S., y Haslegrave, C. M. (2018). *Anthropometry, ergonomics and the design of work* (Tercera ed.). CRC Press. Descargado de <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781315375212/body-space-christine-haslegrave-stephen-pheasant> doi: <https://doi.org/10.1201/9781315375212>
- Picinali, L., Afonso, A., Denis, M., y Katz, B. F. (2014). Exploration of architectural spaces by blind people using auditory virtual reality for the construction of spatial knowledge. *International Journal of Human-Computer Studies*, 72(4), 393-407. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1071581913002036> doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2013.12.008>
- Poggi, M., y Mattoccia, S. (2016). A wearable mobility aid for the visually impaired based on embedded 3d vision and deep learning. En *2016 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC)* (p. 208-213). doi: 10.1109/ISCC.2016.7543741
- praewpailin. (2021). *Campo de fútbol o campo de fútbol para el fondo. cancha de césped verde para crear un juego deportivo*. Descargado de <https://www.admagazine.com/>

- editors-pick/el-estadio-de-barcelona-de-lego-20210902-8969-articulos
- Rao, S. (2012, julio). *High-definition haptics: Feel the difference!* Descargado de <https://www.ti.com/lit/an/slyt483/slyt483.pdf>
- Richard, E., Tijou, A., Richard, P., y Ferrier, J.-L. (2006, 01 de Dec). Multi-modal virtual environments for education with haptic and olfactory feedback. *Virtual Reality*, 10(3), 207-225. Descargado de <https://doi.org/10.1007/s10055-006-0040-8> doi: 10.1007/s10055-006-0040-8
- Rodriguez Fuentes, A. (2005). *Como leen los niños con ceguera y baja visión?* Ediciones Aljibe. Descargado de <https://elibro.net/es/lc/bibliotecaups/titulos/60479>
- Ruelas, L. (2019). *Unity y c# desarrollo de videojuegos*. Ediciones de la U. Descargado de <https://elibro.net/es/lc/bibliotecaups/titulos/127122>
- S., K., Arun, C., Joseph James, S., y Selvakumarasamy, S. (2021). Virtual personal/voice based assistant for an institution through alexa's skill. *Materials Today: Proceedings*. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321006350> doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.544>
- Saal, H., Delhayé, B., Rayhaun, B., y Bensmaia, S. (2017, 07). Simulating tactile signals from the whole hand with millisecond precision. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114, E5693-E5702. doi: 10.1073/pnas.1704856114/-/DCSupplemental
- Salam, E.
I tried be my eyes, the popular app that pairs blind people with helpers. . Descargado de <https://www.theguardian.com/lifeandstyle/2019/jul/12/be-my-eyes-app-blind-people-helpers>
- Salat, S., y Habib, M. A. (2019). Smart electronic cane for the assistance of visually impaired people. En *2019 IEEE International Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE)* (p. 1-4). doi: 10.1109/WIECON-ECE48653.2019.9019932
- Schwarze, T., Lauer, M., Schwaab, M., Romanovas, M., Bohm, S., y Jurgensohn, T. (2015). An intuitive mobility aid for visually impaired people based on stereo vision. En *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops* (pp. 17-25).
- Shen, H.-M., Lian, C., Wu, X.-W., Bian, F., Yu, P., y Yang, G. (2021). Full-pose estimation using inertial and magnetic sensor fusion in structured magnetic field for hand motion tracking. *Measurement*, 170, 108697. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224120312057> doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108697>
- Song, S., y Xiao, J. (2016). Deep sliding shapes for amodal 3d object detection in rgb-d

- images. En *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (p. 808-816). doi: 10.1109/CVPR.2016.94
- Sorgini, F., Mazzoni, A., Massari, L., Calì, R., Galassi, C., Kukreja, S. L., ... Oddo, C. M. (2017). Encapsulation of piezoelectric transducers for sensory augmentation and substitution with wearable haptic devices. *Micromachines*, 8(9). Descargado de <https://www.mdpi.com/2072-666X/8/9/270> doi: 10.3390/mi8090270
- Suvak, J. (2014). *Learn unity 3d programming with unityscript: Unity's javascript for beginners*. Apress.
- Ultraleap. (s.f.-a). *Tracking software download*. Descargado de <https://developer.leapmotion.com/tracking-software-download>
- Ultraleap. (s.f.-b). *Ultraleap plugin for unity*. Descargado de <https://developer.leapmotion.com/unity>
- Ultraleap. (2020, septiembre). *How hand tracking works*. Descargado de <https://www.ultraleap.com/company/news/blog/how-hand-tracking-works/>
- UNE-EN ISO 7250-1:2017 (Ratificada) (Normativa). (2017). Asociación Española de Normalización. Descargado de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0059144>
- Unity. (2022, jan). *Unity real-time development platform*. Descargado de <https://unity.com/>
- Vergara, F. (s.f.). *El estadio del barcelona ahora está hecho de piezas de lego*. Descargado de https://es.123rf.com/photo_121360367_campo-de-f%C3%BAtbol-o-campo-de-f%C3%BAtbol-para-el-fondo-cancha-de-c%C3%A9sped-verde-para-crear-un-juego-deportivo.html?vti=mhrgdn3kbng4aq2p3q-1-5
- Vezzoli, E., y Chappaz, C. (2020). *Touch-sensitive interface comprising a force sensor (interfaz sensible al tacto que incluye un sensor de fuerza)* (patent n.º 10860107). Descargado de <https://patents.justia.com/patent/10860107>
- Wall, S. A., y Brewster, S. (2006). Sensory substitution using tactile pin arrays: Human factors, technology and applications. *Signal Processing*, 86(12), 3674-3695. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165168406001411> (Special Section: Multimodal Human-Computer Interfaces) doi: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2006.02.048>
- Xiaochi, G. (2019, sep). *Hand exoskeleton force feedback system* (n.ºs 10,423,227). Nanjing. Descargado 2022-01-08, de <https://patents.justia.com/patent/10423227#history>
- Yang, T.-H., Kim, J. R., Jin, H., Gil, H., Koo, J.-H., y Kim, H. J. (2021). Recent advances and opportunities of active materials for haptic technologies in virtual and augmented

reality. *Advanced Functional Materials*, 31(39). Descargado de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adfm.202008831> doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202008831>

Yeh, C.-H., Su, F.-C., Shan, Y.-S., Dosaev, M., Selyutskiy, Y., Goryacheva, I., y Ju, M.-S. (2020, 03). Application of piezoelectric actuator to simplified haptic feedback system. *Sensors and Actuators A: Physical*, 303, 111820. doi: 10.1016/j.sna.2019.111820

Yu, X., Xie, Z., Yu, Y., Lee, J., Vazquez-Guardado, A., Luan, H., . . . Rogers, J. A. (2019, noviembre). Skin-integrated wireless haptic interfaces for virtual and augmented reality. *Nature*, 575(7783), 473–479.

Zarate, J., y Shea, H. (2016, 07). Using pot-magnets to enable stable and scalable electromagnetic tactile displays. *IEEE Transactions on Haptics*, 10, 1-1. doi: 10.1109/TOH.2016.2591951

Zarate, J. J., Gudozhnik, O., Ruch, A. S., y Shea, H. (2017). Keep in touch: Portable haptic display with 192 high speed taxels. En (p. 349–352). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. Descargado de <https://doi.org/10.1145/3027063.3052957> doi: 10.1145/3027063.3052957

ANEXOS

Anexo A: Matriz de consistencia lógica

Tabla 4

Matriz de consistencia lógica.

Desarrollo de una interfaz VR y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes, para generar una retroalimentación háptica, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.				
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	MARCO TEÓRICO
¿Se puede desarrollar una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares?	Desarrollar una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.	Se desarrollará una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.		Interfaces o dispositivos enfocados a personas no videntes con y sin estimulación sensorial táctil.
ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS	ESPECÍFICAS		
¿Se puede identificar los parámetros iniciales de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares?	Identificar los parámetros iniciales de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.	Se identificará los parámetros iniciales de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.	VI: Retroalimentación háptica VD: Desarrollar un interfaz VR	Dispositivos de interacción sin contacto.
¿Se puede diseñar una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares?	Diseñar una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.	Se diseñará una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.		Plataforma Unity y el desarrollo de interfaces.

Nota: Matriz de consistencia lógica (Autores)

Anexo B: Continuación de la matriz de consistencia lógica

Tabla 5

Continuación de la matriz de consistencia lógica.

Desarrollo de una interfaz VR y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes, para generar una retroalimentación háptica, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.			
ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS	ESPECÍFICAS	MARCO TEÓRICO
¿Se puede implementar el diseño de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares?	Implementar el diseño de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.	Se implementará el diseño de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.	Dispositivos electrónicos para estimulación sensorial táctil.
¿Se puede comprobar el funcionamiento del diseño de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares?	Comprobar el funcionamiento del diseño de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.	Se comprobará el diseño de una interfaz VR con un módulo de seguimiento de manos y un dispositivo portable, enfocados a personas no videntes. Para generar una retroalimentación háptica al dedo índice del usuario, permitiendo identificar geometrías 3D regulares.	Dispositivos e interfaces actuales del mercado

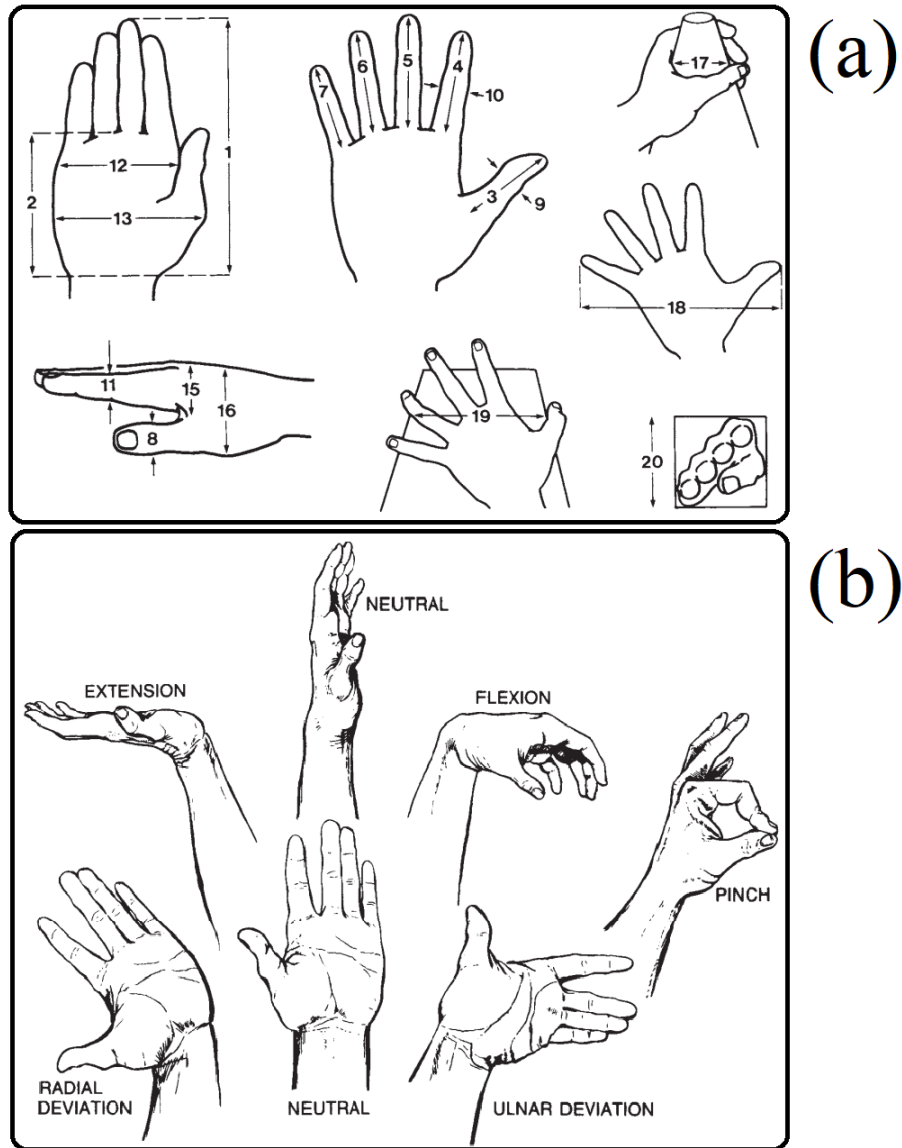
VI:
Retroalimentación háptica
VD: Desarrollar un interfaz VR

Nota: Continuación de la matriz de consistencia lógica (Autores)

Anexo C: Medidas realizadas y posiciones de la mano

Figura 60

Toma de medidas antropométricas de la mano



Nota: La figura (a) muestra la toma de las medidas antropométricas mientras que la figura (b) las posiciones de la mano, de acuerdo con Pheasant y Haslegrave (2018)

Anexo D: Medidas antropométricas de la mano

Tabla 6

Estimación de medidas antropométricas de la mano de personas con rangos de edades de 18 a 65 años

Dimension	Men				Women			
	5th %ile	50th %ile	95th %ile	SD	5th %ile	50th %ile	95th %ile	SD
1. Hand length	173	189	205	10	159	174	189	9
2. Palm length	98	107	116	6	89	97	105	5
3. Thumb length	44	51	58	4	40	47	53	4
4. Index finger length	64	72	79	5	60	67	74	4
5. Middle finger length	76	83	90	5	69	77	84	5
6. Ring finger length	65	72	80	4	59	66	73	4
7. Little finger length	48	55	63	4	43	50	57	4
8. Thumb breadth (IPJ) ^a	20	23	26	2	17	19	21	2
9. Thumb thickness (IPJ)	19	22	24	2	15	18	20	2
10. Index finger breadth (PIPJ) ^b	19	21	23	1	16	18	20	1
11. Index finger thickness (PIPJ)	17	19	21	1	14	16	18	1
12. Hand breadth (metacarpal)	78	87	95	5	69	76	83	4
13. Hand breadth (across thumb)	97	105	114	5	84	92	99	5
14. Hand breadth (minimum) ^c	71	81	91	6	63	71	79	5
15. Hand thickness (metacarpal)	27	33	38	3	24	28	33	3
16. Hand thickness (including thumb)	44	51	58	4	40	45	50	3
17. Maximum grip diameter ^d	45	52	59	4	43	48	53	3
18. Maximum spread	178	206	234	17	165	190	215	15
19. Maximum functional spread ^e	122	142	162	12	109	127	145	11
20. Minimum square access ^f	56	66	76	6	50	58	67	5

Notes:

^a IPJ is the interphalangeal joint, i.e. the articulations between the two segments of the thumb;

^b PIPJ is the proximal interphalangeal joint, i.e. the finger articulation nearest to the hand;

^c as for dimension 12, except that the palm is contracted to make it as narrow as possible;

^d measured by sliding the hand down a graduated cone until the thumb and middle fingers only just touch;

^e measured by gripping a flat wooden wedge with the tip end segments of the thumb and ring fingers;

^f the side of the smallest equal aperture through which the hand will pass.

Fuente:

Nota: La tabla muestra una recopilación de medidas antropométricas tomadas en personas adultas. Pheasant y Haslegrave (2018)