



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

TEMA:

**“TECNOLOGÍA HÁPTICA PARA ESTIMULAR LA
MOTRICIDAD EN LOS DEDOS DE LA MANO”**

Autor: Milton Paúl Tituaña Tugumbango

Directora: Ing. Luz María Tobar Contenido MSc.

Ibarra – Ecuador

2023



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004016331		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Tituaña Tugumbango Milton Paúl		
DIRECCIÓN:	Natabuela, Imbabura		
EMAIL:	mptituaniat@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0986610550

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Tecnología háptica para estimular la motricidad en los dedos de la mano
AUTOR (ES):	Tituaña Tugumbango Milton Paúl
FECHA: DD/MM/AAAA	27/07/2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	Pregrado
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Mecatrónica
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Luz María Tobar Contento MSc.

CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 26 días, del mes de julio de 2023

EL AUTOR:

Firma.....

Nombre: Milton Paúl Tituaña Tugumbango

CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTERGRACIÓN CURRICULAR

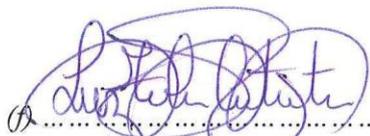
Ibarra, 26 de Julio de 2023

Ing. Luz María Tobar Subía Contenido, MSc.

DIRECTORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de titulación, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Unidad Académica de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.



Ing. Luz María Tobar Subía Contenido, MSc

C.C.: 1002449204



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Dios por darme salud y vida. Por cuidarme y brindarme la fuerza para salir adelante en mi día a día y en el transcurso de mi vida como estudiante.

A mi padre Luis Efraín Tituaña y a mi madre Luz María Tugumbango por brindarme todo su apoyo, amor y cariño incondicional, por los grandes esfuerzos que realizaron para que yo llegara hasta este punto de mi vida y por su enorme comprensión ante los errores que pude haber cometido.

A mis hermanos Marcelo Tituaña y Mauricio Tituaña por brindarme sus palabras de aliento, amistad y compañía en los momentos difíciles.

A mi abuelito Manuel Tugumbango por enseñarme el valor del día a día a pesar de las adversidades y a mi abuelita Carmen Manrique por su amor incondicional y su cuidado desde el cielo.

A mi tutora quién me ha brindado todo su apoyo, y su esfuerzo para que culmine satisfactoriamente este proyecto.

Milton Paúl Tituaña Tugumbango



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación se la dedico a mi madre Luz María Tugumbango por velar por mi bienestar día a día y me ha brindado todo su esfuerzo y dedicación que me han impulsado a seguir adelante. A mi padre Luis Efraín Tituaña que me enseñó que con esfuerzo y dedicación se obtiene grandes logros, quién siempre está pendiente en que me forme como una persona de bien y de valores. Estoy eternamente agradecido con ellos por darme el mayor regalo que es la educación.

A mis hermanos Marcelo y Mauricio quienes son las personas más maravillosas a quienes quiero y respeto enormemente.

Milton Paúl Tituaña Tugumbango

RESUMEN

Se realizó el diseño y construcción de un dispositivo háptico con la capacidad de estimular el sentido del tacto y la motricidad en los dedos de la mano, lo que lo convierte en una herramienta complementaria y alternativa para los métodos tradicionales de rehabilitación física utilizados en pacientes con problemas motrices en los dedos. En el proceso de desarrollo, se consideraron cuidadosamente criterios y restricciones de diseño con el objetivo de cumplir con las especificaciones establecidas. El resultado final es un dispositivo electrónico que integra un microcontrolador Arduino Pro Mini, un micromotor vibrador y un acelerómetro analógico ADXL 335. Además, se creó un entorno virtual de interacción para el usuario. Un logro destacable fue la estimulación del sentido del tacto a través de la variación de frecuencias mediante señales PWM que recibió el motor. Esto permitió demostrar la estrecha relación entre las vibraciones y la respuesta táctil. En conjunto, este dispositivo háptico representa una valiosa contribución en el campo de la rehabilitación física y abre nuevas posibilidades para mejorar la experiencia de los pacientes en su proceso de recuperación.

Palabras clave: Dispositivo, mecatrónica, motricidad, tecnología háptica, software.

ABSTRACT

The design and construction of a haptic device with the ability to stimulate the sense of touch and motor skills in the fingers of the hand were carried out, which makes it a complementary and alternative tool for the traditional methods of physical rehabilitation used in patients with Motor problems in the fingers. In the development process, design criteria and constraints were carefully considered in order to meet the established specifications. The result is an electronic device that integrates an Arduino Pro Mini microcontroller, a vibrator micromotor, and an ADXL 335 analog accelerometer. In addition, a virtual environment for user interaction was created. A notable achievement was stimulating the sense of touch through frequency variation using PWM signals received by the motor. This made it possible to demonstrate the close relationship between vibrations and tactile response. Taken together, this haptic device represents a valuable contribution to physical rehabilitation and opens up new possibilities to improve patients' experience in their recovery process.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	VI
ABSTRACT.....	VII
INTRODUCCIÓN	1
Problema	1
Objetivos.....	2
Objetivo General.....	2
Objetivos Específicos.....	2
Alcance	2
Justificación	3
CAPÍTULO I	4
MARCO REFERENCIAL.....	4
1.1 Antecedentes	4
1.2 Marco Teórico.....	8
1.2.1 Motricidad	8
1.2.1.1 Motricidad fina	8
1.2.1.2 Motricidad gruesa	8
1.2.2 La mano humana	9
1.2.2.1 Anatomía de mano.....	9
1.2.2.2 Motricidad de los dedos.....	10
1.2.3 Rehabilitación física para los dedos de la mano	11
1.2.4 El sentido del tacto	12
1.2.4.1 Anatomía del tacto.....	13
1.2.5 Métodos de estimulación sensorial no farmacológicos.....	14
1.2.5.1 Respuesta del cuerpo humano a estímulos vibratorios.....	15
1.2.6 Tecnología háptica	16
1.2.6.1 Dispositivos hápticos.....	18
1.2.7 Entorno virtual.....	19
CAPÍTULO II.....	21
MARCO METODOLÓGICO.....	21
1.3 Tipo de investigación.....	21

1.4	Diseño de la investigación	21
1.4.1	Fase 1: Evaluación de los parámetros	21
1.4.2	Fase 2: Diseño de la estructura del sistema.....	22
1.4.3	Fase 3: Ensamblaje del dispositivo	22
1.4.4	Fase 4: Comprobación del funcionamiento.....	23
CAPÍTULO.....		24
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		24
1.5	Especificaciones del sistema.....	24
1.6	Selección de los elementos	25
1.6.1	Asignación de alternativas	25
1.6.2	Parámetros de evaluación de las alternativas	28
1.6.3	Evaluación de elementos utilizando matriz de pares	28
1.7	Sistema electrónico	36
1.7.1	Placa de Circuito Impreso (PCB).....	37
1.8	Diseño Mecánico	38
1.8.1	Modelado 3D del prototipo	38
1.8.2	Impresión 3D del anillo.....	39
1.9	Diseño de la Interfaz del entorno virtual.....	39
1.9.1	Escena 1 (ambientación)	40
1.9.2	Escena 2 (ejecución de acciones).....	41
1.10	Ensamblaje de los elementos	42
1.11	Protocolo de funcionamiento del dispositivo háptico.....	42
1.12	Pruebas de funcionamiento	45
1.12.1	Pruebas de funcionamiento y análisis de la escena 1 en cada paciente.....	46
1.12.2	Pruebas de funcionamiento y análisis de la escena 2 en cada paciente.....	47
1.13	Análisis y validación de los resultados	49
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		54
Conclusiones.....		54
Recomendaciones		55
REFERENCIAS.....		56
ANEXOS		61
Anexo 1: Diagrama de flujo del funcionamiento del dispositivo		61

Anexo 2: Código de programación de Arduino	62
Anexo 3: Dimensiones del anillo del dispositivo	80
Anexo 4: Dimensiones de la estructura protectora de la placa PCB.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Estructura ósea de la mano izquierda	10
Figura 1.2 Movimientos de los dedos	11
Figura 1.3 Ejercicios motrices para los dedos de la mano	12
Figura 1.4 Anatomía del tacto.....	14
Figura 1.5 Aplicación de la TENS para aliviar el dolor de espalda.	15
Figura 1.6 Arquitectura de un sistema háptico.....	18
Figura 1.7 Guante háptico de la compañía Xtensor	19
Figura 1.8 Entorno virtual inmersivo.....	20
Figura 3.1 Diagrama eléctrico de conexiones	36
Figura 3.2 Diseño de la placa PCB	37
Figura 3.3 Sistema electrónico del prototipo	37
Figura 3.4 Modelado 3D a) soporte del anillo y b) sección circular del anillo.	38
Figura 3.5 Modelado 3D a) estructura, b) tapa	38
Figura 3.6 Impresión 3D a) Soporte del anillo, b) sección circular del anillo	39
Figura 3.7 Impresión 3D a) estructura b) tapa	39
Figura 3.8 Escena 1 del entorno virtual	40
Figura 3.9 Bloques de programación de la escena 1	40
Figura 3.10 Escena 2 del entorno virtual	41
Figura 3.11 Bloques de programación de la escena 2.....	41
Figura 3.12 Prototipo final del Dispositivo háptico	42
Figura 3.13 Movimiento de flexión del dedo hacia adelante.....	43
Figura 3.14 Movimiento de extensión del dedo hacia atrás.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 3.15 Movimiento de rotación de la muñeca en sentido horario.....	43
Figura 3.16 Movimiento de rotación de la muñeca en sentido antihorario.....	44
Figura 3.17 Movimiento de flexión de la articulación metacarpofalángica.....	44
Figura 3.18 Pruebas de funcionamiento en la primera escena.....	46
Figura 3.19 Interacción con la segunda escena.....	48
Figura 3.20 Progreso del paciente 1 para la escena 1.	49
Figura 3.21 Progreso del paciente 2 para la escena 1.	50
Figura 3.22 Progreso del paciente 3 escena 1.	50
Figura 3.23 Progreso del paciente 1 para la escena 2.	51
Figura 3.24 Progreso del paciente 2 para la escena 2.	51
Figura 3.25 Progreso del paciente 3 para la escena 2.	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparación de características de dispositivos hápticos comerciales.....	7
Tabla 2 Niveles de frecuencia y sus efectos en el cuerpo humano.	16
Tabla 3 Requerimientos del proyecto.	24
Tabla 4 Alternativas de sensores de navegación.....	25
Tabla 5 Alternativas de tarjetas de control para la transmisión y procesamiento de datos	26
Tabla 6 Alternativas de microcontrolador para la recepción de datos	26
Tabla 7 Alternativas de actuador vibratorio.....	27
Tabla 8 Alternativas de comunicación inalámbrica.	27
Tabla 9 Alternativas de software para el desarrollo del entorno virtual.....	28
Tabla 10 Ponderaciones para el método de matriz de pares.....	29
Tabla 11 Evaluación de parámetros basada en la matriz de pares.	29
Tabla 12 Matriz de pares aplicado a la usabilidad.	30
Tabla 13 Matriz de pares aplicado a la versatilidad.	30
Tabla 14 Matriz de pares aplicado a la disponibilidad de sensores de navegación.....	30
Tabla 15 Matriz de pares aplicado a las tarjetas de control para transmisión de datos.	31
Tabla 16 Matriz de pares aplicado a la selección del microcontrolador del receptor.....	31
Tabla 17 Matriz de pares aplicado a la selección del actuador vibratorio.....	31
Tabla 18 Matriz de pares aplicado para la comunicación inalámbrica.	32
Tabla 19 Matriz de pares aplicado a la selección del software de desarrollo para entornos virtuales.....	32
Tabla 20 Matriz de pares para determinar el sensor de navegación.....	33
Tabla 21 Matriz de pares para determinar la tarjeta de control para la transmisión de datos.....	33
Tabla 22 Matriz de pares para determinar el microcontrolador del receptor	34
Tabla 24 Matriz de pares para determinar el actuador vibrador.....	34
Tabla 24 Matriz de pares para la selección de la comunicación inalámbrica.....	35
Tabla 25 Matriz de pares para determinar el software de desarrollo de entornos virtuales.	35
Tabla 26 Datos de los pacientes	45
Tabla 27 Tiempos del paciente 1 (escena 1)	47
Tabla 28 Tiempos del paciente 2 (escena 1)	47
Tabla 29 Tiempos del paciente 3 (escena 1)	47
Tabla 30 Tiempos del paciente 1 (escena 2)	48
Tabla 31 Tiempos del paciente 2 (escena 2)	49
Tabla 32 Tiempos del paciente 3 (escena 2)	49

INTRODUCCIÓN

Problema

En la actualidad, los procesos de rehabilitación física siguen desarrollándose de manera tradicional, de tal manera que el paciente tiene que presentarse en cada sesión en el centro de salud, en un horario preestablecido. La terapia es realizada por el médico tratante mediante movimientos repetitivos utilizando aparatos mecánicos o a su vez interactuando directamente con el terapeuta, con el objetivo de recuperar la movilidad de la extremidad o parte del cuerpo que haya sufrido algún tipo de trauma y por tal motivo tuvo que ser inmovilizada [1].

En el Ecuador, existen muchos centros de rehabilitación física que ya han adoptado el sistema de rehabilitación mediante el uso de un entorno virtual y de igual manera existen otros que continúan usando los métodos tradicionales. Sin embargo, estos dos métodos, a pesar de ser los más conocidos no garantizan que se obtenga el resultado esperado, por factores psicológicos como el aburrimiento al realizar un número limitado de ejercicios de manera repetitiva o por la falta de retroalimentación que responda a los estímulos visuales y auditivos [2].

Algunos centros de rehabilitación física en el Ecuador, realizan su trabajo con elementos mecánicos los cuales, debido a su tiempo de uso, están expuestos a sufrir desgaste volviéndolos inservibles e inapropiados para cumplir con su trabajo de rehabilitación. Para evitar esto, el terapeuta debe invertir tiempo en el mantenimiento de su equipo de trabajo convirtiéndose esto en una carga extra en su jornada de labores.

Es importante tomar en cuenta que muchos de los centros de rehabilitación física tienen un espacio muy limitado de trabajo y como resultado de ello, los pacientes deben esperar su turno en un ambiente aglomerado. En época de crisis sanitaria no es recomendable acudir a lugares en los

cuales exista gran afluente de personas; sin embargo, los pacientes que reciben el servicio de rehabilitación física no deben suspender sus terapias.

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente, se propone implementar la tecnología háptica al proceso de rehabilitación física dentro de un entorno virtual, mediante el uso de elementos electrónicos y manejo de software libre, para complementar el trabajo de rehabilitación tradicional.

Objetivos

Objetivo General

- Desarrollar un dispositivo háptico para estimular la motricidad en los dedos de la mano.

Objetivos Específicos

- Investigar los diferentes dispositivos hápticos y su eficiencia dentro de la rehabilitación física.
- Seleccionar los elementos electrónicos del dispositivo háptico.
- Diseñar un dispositivo háptico capaz de estimular el sentido del tacto.
- Validar el funcionamiento del dispositivo.

Alcance

El proyecto está enfocado en el diseño de un dispositivo háptico con capacidad de generar estímulos de manera no invasiva para el cuerpo humano. En la programación se utilizará software libre.

El dispositivo utilizará un entorno virtual enfocado principalmente en la rehabilitación física de pacientes que tengan problemas de motricidad en los dedos de la mano.

El dispositivo mecatrónico será construido utilizando tecnologías de fabricación por adición y posteriormente se realizarán las pruebas respectivas que garanticen su correcto funcionamiento.

Justificación

Desde el ámbito tecnológico, el proyecto planteado permitirá contar con una herramienta háptica en la rehabilitación física, de esta manera los profesionales de la salud contarán con una herramienta tecnológica que complemente su trabajo [3].

La tecnología háptica juntamente con la realidad virtual dentro del área de rehabilitación, se han convertido en un tema reciente. La cual busca ser un aporte cuando se evalúa la experiencia del usuario. Este tipo de desarrollo tecnológico brinda nuevas oportunidades cuando se trata de medir la retroalimentación del proceso.

El beneficio de este enfoque es que, involucra diferentes tipos de mecanorreceptores, y el estímulo háptico influye tanto en la resolución espacial como temporal de la piel y el sentido del tacto [4].

Finalmente, el desarrollo de este tema es un aporte al proyecto de investigación “Métodos para mejorar el agarre y la manipulación de las extremidades de personas y dispositivos robóticos” de la Universidad Técnica del Norte.

CAPÍTULO I

MARCO REFERENCIAL

1.1 Antecedentes

La técnica propuesta de "Toque sin ambigüedades con un anillo inteligente" mediante el uso de VibRing, un anillo inteligente portátil, proporciona una solución efectiva para aumentar la interacción táctil en dispositivos. Con su capacidad para generar patrones de vibración únicos, ofrece retroalimentación rica pero sutil, y proporciona capacidades de entrada siempre disponibles, VibRing tiene el potencial de mejorar significativamente la experiencia de interacción táctil en diversos campos, como la telefonía móvil, la realidad virtual y otros dispositivos electrónicos [5].

El enfoque multisensorial de MISSIVE abre nuevas posibilidades en la transmisión de lenguaje a través del tacto. Al utilizar elementos de estiramiento, compresión y vibración integrados en un dispositivo háptico compacto y portátil, MISSIVE desarrolla una comunicación mucho más expresiva mediante el sentido del tacto. Este enfoque innovador tiene el potencial de mejorar la comunicación no verbal en diversas situaciones, incluyendo aquellas en las que la comunicación auditiva o visual es limitada o no viable [6].

“Desarrollo de una interfaz háptica con patrones de estímulos vibro táctiles”, interfaz háptica desarrollada mediante patrones de estímulos vibro táctiles representa un avance significativo para aumentar la inmersión y la interacción del usuario en entornos de realidad virtual. La incorporación de estímulos táctiles en combinación con los sentidos de la vista y el oído proporciona una experiencia multisensorial más envolvente y realista. Con su potencial para diversas aplicaciones, esta interfaz tiene el potencial de transformar la manera en que las personas interactúan con ambientes artificiales y virtuales, abriendo nuevas posibilidades en campos como el entretenimiento, la formación y rehabilitación [7].

“Implementación de una herramienta virtual mediante un dispositivo háptico para la rehabilitación de pacientes con daño cerebral adquirido”, muestra el desarrollo de una herramienta virtual interactiva para rehabilitación integrando un ordenador, dispositivo háptico y software libre. El sistema está enfocado a la rehabilitación motora fina de personas con Daño Cerebral Adquirido en especial para adultos, sin dejar de lado que puede ser utilizado por niños y jóvenes que sufran o no de esta enfermedad, el proyecto sirve en la rehabilitación de otras patologías y en la mejora de destrezas como es la habilidad ojo-mano [8].

“Interfaces hápticas: sistemas cinestésicos vs. Sistemas táctiles”, esto relaciona una retroalimentación de fuerzas utilizando una interfaz háptica cinestésica al ocurrir el intercambio de fuerzas entre el usuario y el ambiente virtual para lograr la “inmersión corporal” (embodiment) a partir de una interfaz que deberá ser capaz de afectar al cuerpo o punto corporal contacto, esta tecnología es aprovechada en el desarrollo de video juegos serios y procesos de rehabilitación con dispositivos hápticos-cinestésicos tipo robot [9].

“Geomagic Touch” es un dispositivo de escritorio que ofrece retroalimentación háptica de alta calidad y versatilidad en diversas aplicaciones. Desde el entretenimiento hasta la medicina, rehabilitación, simulación de procesos y educación, este dispositivo mejora la interacción del usuario con objetos virtuales, brindando una experiencia inmersiva y realista. Su diseño compacto y portátil, junto con su compatibilidad con softwares de desarrollo de entornos virtuales, lo convierten en una herramienta con grandes prestaciones en diferentes campos y sectores de aplicación. [10].

“HD2” Dispositivo háptico de alta definición de la empresa QUANSER es una interfaz de alta confiabilidad para el desarrollo de investigaciones avanzadas en el área de la robótica y la tecnología háptica. Su banco de pruebas de desarrollo flexible lo vuelven amigable para

aplicaciones emergentes como la simulación médica virtual y tele operaciones. El tipo de respuesta del dispositivo es una retroalimentación de fuerza programable que junto a su mecanismo paralelo proporciona un coeficiente de fricción insignificante. Sus motores de alto rendimiento reducen la inercia percibida mientras el dispositivo se encuentra en un estado de rigidez absoluta. El amplio espacio de trabajo lo diferencia de entre otros dispositivos hápticos de escritorio comerciales [11].

“Omega 3” dispositivo háptico modular desarrollado por Force Dimension es una solución versátil y potente para la tele manipulación robótica y la interacción con entornos virtuales complejos. Su diseño ergonómico, junto con su cinemática paralela y compensación de gravedad activa, proporciona una experiencia háptica precisa y realista. Con su enfoque en el rendimiento, diseño y estilo, Omega 3 se destaca como una herramienta eficiente para mejorar la manipulación remota de robots y la interacción inmersiva con entornos virtuales en diversas aplicaciones y sectores industriales [12].

“Hi 5 VR” Dispositivo en forma de guante desarrollado por la empresa Noitom principalmente diseñado para cumplir con interacciones manuales complementarias inmersivas dentro de entornos virtuales mediante su comunicación inalámbrica con los seis sensores IMU que lo conforman y brindan nueve ejes de movimiento. Su principio de funcionamiento está basado en la captación de movimientos y transmisión de datos en tiempo real. La comunicación inalámbrica de aproximadamente 6 metros lo destacan de elementos comerciales similares, tecnología plug and play con modos de calibración opcional brinda una mayor precisión [13].

En resumen, en la tabla 1. Se presenta una comparación de las características más relevantes de los dispositivos hápticos comerciales más comunes.

Tabla 1

Comparación de características de dispositivos hápticos comerciales.

DISPOSITIVOS HÁPTICOS COMERCIALES								
Dispositivo	Fabricante	Tipo de dispositivo	Actuador	Sensor	Aplicación	Retroalimentación	Resolución de posicionamiento	Grados de libertad
GEOMAGIC TOUCH	3D Systems	Dispositivo de escritorio	Vibro motor	Codificadores digitales, potenciómetros lineales	Medicina, entretenimiento, rehabilitación física, educación.	Retroalimentación Háptica de fuerza	-0.055 mm	6 GDL
HD² HIGH DEFINITION HAPTIC DEVICE	Quanser	Dispositivo de escritorio	Motor DC	Codificadores ópticos	Medicina, rehabilitación física, educación	Retroalimentación Háptica de fuerza	0.051 mm	6 GDL
OMEGA 3	Force dimmension	Dispositivo de escritorio	Motor DC	Codificadores digitales, potenciómetros lineales	Medicina, rehabilitación física, educación	Retroalimentación Háptica de fuerza	< 0.01 mm	3 GDL
HI5 VR	Noitom	Guante	Vibro motor	IMU	Medicina, rehabilitación física, entretenimiento, educación	Retroalimentación Táctil	0.2 grados	8 GDL

Nota. Los dispositivos hápticos suelen tener un diseño ergonómico para asegurar una interacción cómoda y natural con el usuario durante largos períodos de uso.

1.2 Marco Teórico

1.2.1 Motricidad

Se define como la capacidad que tiene el ser humano para realizar movimientos de forma coordinada y voluntaria para ello debe conjugarse una correcta sincronización entre el sistema nervioso central, sentidos, músculos y huesos. La importancia de la motricidad radica en proporcionar al ser humano el control corporal necesario para realizar las diferentes actividades [14].

1.2.1.1 Motricidad fina

Es la coordinación de movimientos precisos de la mano, muñeca y dedos, controlados por músculos pequeños, grandes y por la información visual del entorno. Estas habilidades son esenciales para realizar tareas detalladas y precisas en diversas actividades cotidianas y profesionales. Su desarrollo adecuado en etapas tempranas es crucial para el crecimiento y la autonomía de las personas [15].

La motricidad fina es importante para desarrollar la habilidad de experimentación y aprendizaje sobre un entorno, consecuentemente, juega un papel central en el aumento de la inteligencia [15].

1.2.1.2 Motricidad gruesa

Comprende todos los movimientos grandes de amplio recorrido donde intervienen diferentes grupos musculares que brindan equilibrio, agilidad, fuerza y la velocidad en cada movimiento. En comparación a la motricidad fina los movimientos son menos precisos y se vinculan principalmente a la aplicación de la fuerza. Los principales movimientos en función de la motricidad gruesa son caminar, nadar, saltar, correr, entre otros [16].

1.2.2 La mano humana

La combinación de habilidades motoras y sensibilidad táctil convierte a la mano en una herramienta esencial para la interacción con el entorno y para la percepción del mundo. Esta interacción se ve facilitada por la capacidad del cerebro para interpretar y procesar la información táctil que recibe de la mano, lo que posibilita realizar actividades cotidianas y explorar nuestro entorno de manera eficiente [17].

La acción de ejercer presión es su principal función e influye en la sujeción de objetos geoméricamente diferentes y está comprendida desde la muñeca hasta la punta de los dedos. El cerebro dirige directamente a la mano y también ella ha llegado a modificar al cerebro del ser humano [17].

1.2.2.1 Anatomía de mano

El esqueleto de la mano está formado por un total de 27 huesos distribuidos en tres grupos principales: el carpo, que comprende los huesos de la muñeca; el metacarpo, que forma el cuerpo de la mano y conecta con los huesos de los dedos; y las falanges, que constituyen los huesos de los dedos.

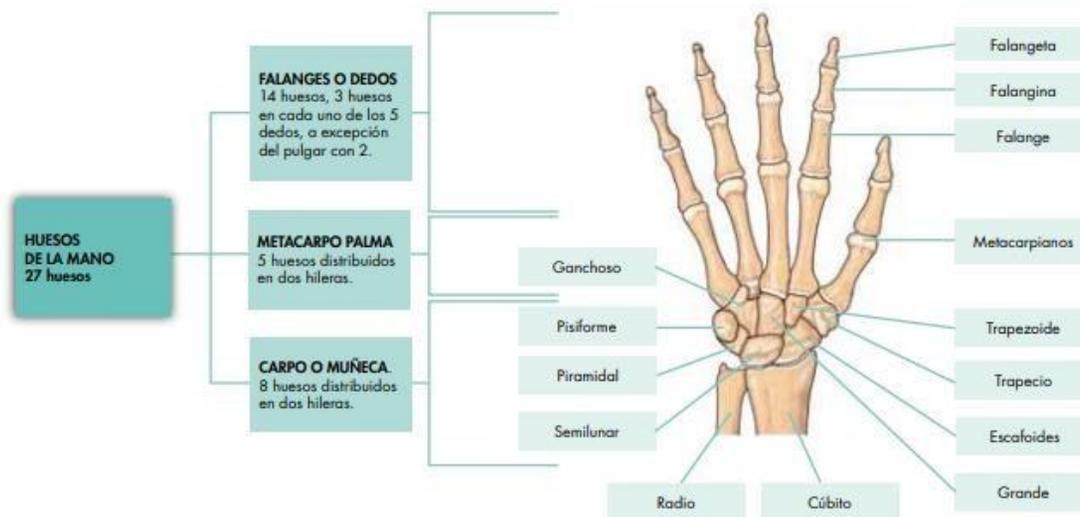
La mano también está compuesta por 36 articulaciones que proporcionan flexibilidad y posibilitan la ejecución de una variedad de movimientos complejos. Estas articulaciones son cruciales para realizar tareas finas y precisas, como agarrar objetos pequeños o manipular herramientas. [18].

La mano también comprende una serie de músculos, ligamentos y tendones. El movimiento de los huesos que conforman la mano viene dado por la contracción de los músculos. Las articulaciones de la mano se mantienen unidas gracias al tejido fibroso de los ligamentos. Los

músculos del brazo o de la mano se conectan con el hueso por presencia de los tendones y esto influye el movimiento en conjunto de la extremidad [18].

Figura 1.1

Estructura ósea de la mano izquierda.



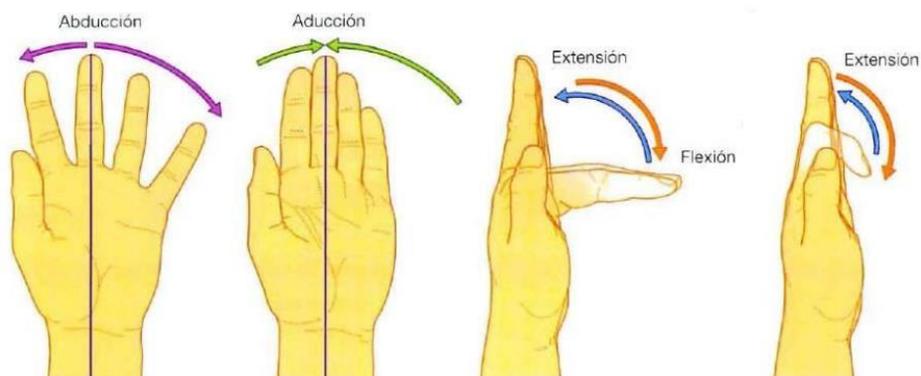
Nota. La mano cuenta con 19 articulaciones en total, que son responsables de la ejecución de su amplia gama de movimientos y flexibilidad. Fuente:[18].

1.2.2.2 Motricidad de los dedos

La articulación metacarpofalangeal es responsable de los movimientos clave de los dedos de la mano, como flexión, extensión, aducción y abducción. Aunque los movimientos de aducción y abducción están limitados, los movimientos de flexión y extensión son más amplios y posibilitan una mayor versatilidad en la funcionalidad de la mano [19].

Figura 2.2

Movimientos de los dedos.



Nota. Existen tres grados de libertad entre la falange proximal y los huesos metacarpianos

Fuente:[19].

1.2.3 Rehabilitación física para los dedos de la mano

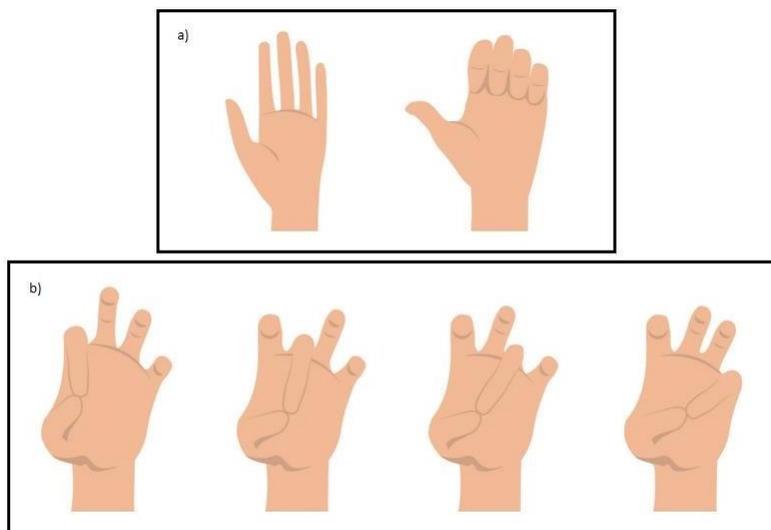
La principal razón de perder la movilidad en los miembros es por la inmovilidad total del miembro afectado por un periodo prolongado de tiempo a raíz de lesiones, fracturas, operaciones o algún otro agente externo. Existen varios ejercicios prácticos que aplican los profesionales de la salud para estimular la movilidad en extremidades y miembros.

Entre los ejercicios más comunes se encuentran.

- Cerrar la mano sobre una superficie e ir abriendo la palma un dedo a la vez. Ayudándose de la otra mano de ser necesario.
- Juntar las palmas de las manos y hacer círculos "sin despegarlas" en distintas direcciones.
- Utilizando una pelota terapéutica, apretar con los dedos a manera de pinzas lo más fuerte posible. La densidad de la pelota terapéutica varía de acuerdo a la progresión.
- Ejercicios de separación de dedos, extensión de dedos y extensión de puño utilizando bandas elásticas.
- Tocar el pulgar con los dedos de la mano de manera alternada [20].

Figura 1.3

Ejercicios motrices para los dedos de la mano.



Nota. a) Flexo-extensión de articulaciones interfalángicas de los dedos. b) Ejercicio de pinzas entre el pulgar y los dedos de la mano. Fuente:[21].

1.2.4 El sentido del tacto

El tacto es uno de los cinco sentidos que tiene el cuerpo humano también conocido como un sentido pasivo que puede percibir las cualidades de los objetos y la realidad mediante términos de presión, dureza, temperatura y texturas. Si bien es cierto, el órgano principal en el sentido del tacto es la piel. Sin embargo, también se considera como uno de los sentidos con mayor complejidad de estudio porque cubre todo el cuerpo y las terminales nerviosas que se encuentran distribuidas en la piel están expuestas a sufrir algún daño por agentes externos e influir en la transmisión de información del hacia el cerebro.

- La sensibilidad protopática del sentido del tacto es considerada la más ambigua y difusa porque no muestra diferencia alguna entre estímulos y es considerada una de las más rápidas.

- La sensibilidad epicrítica constituye una manera más refinada del tacto y se caracteriza por su alto nivel de diferenciación entre estímulos llegando a percibir formas y tamaños.
- La sensibilidad termoalgésica está vinculada a la percepción de estímulos de temperatura y dolor [22].

1.2.4.1 Anatomía del tacto

La piel, órgano principal del sentido del tacto y está compuesta por diferentes capas de tejido y cada una de ellas cumple un rol específico en la percepción de estímulos táctiles externos.

- **La epidermis**

Es la capa externa de la piel. En ella se acumula la melanina, pigmento protector de la radiación UV y que da el color a la piel. Entre sus funciones está la de regeneración de la piel y en ella se encuentran los primeros receptores táctiles.

- **La dermis**

Se trata de una capa subyacente a la epidermis en la cual abundan los vasos sanguíneos, glándulas sebáceas y sudoríparas. En ella se encuentran los receptores táctiles y sus terminaciones nerviosas. Es también la capa encargada de reemplazar las células muertas de la epidermis.

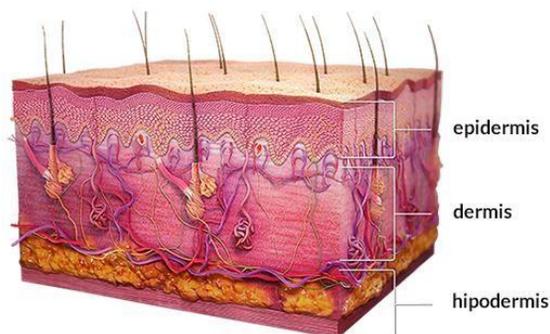
- **Hipodermis**

Es un tejido compuesto por grasas (que actúan como aislantes y protección de tejidos internos), tejidos conectivos (mantienen unidos los demás tejidos y órganos entre sí).

A nivel del tejido subcutáneo se encuentran los receptores táctiles más profundos de los cuales muchos de ellos se encargan de la percepción interna del cuerpo [23].

Figura 1.4

Anatomía del tacto.



Nota. La piel cambia su estructura con el tiempo debido a agentes externos y al estilo de vida de la persona. Fuente:[23].

1.2.5 Métodos de estimulación sensorial no farmacológicos

Son estrategias utilizadas de manera independiente o bajo supervisión profesional sin el uso o presencia de medicamentos con la finalidad de estimular puntos sensoriales específicos del cuerpo, alivio del dolor y desinflamación muscular.

- **Calor o frío:** Dependiendo del área a tratarse se coloca bolsas de gel frío o las almohadillas térmicas.
- **Masaje o vibración:** Masajes realizados en un área determinada del cuerpo por un profesional o producidos por dispositivos eléctricos adecuados que generan vibraciones a partir del funcionamiento de motores presentes en su estructura.
- **Cremas:** Existen diversas cremas, lociones y geles que al aplicarse directamente sobre la piel elevan la circulación sanguínea intensificando la sensibilidad nerviosa corporal, el principal efecto es la sensación de calidez o frescura.
- **Electroestimulación nerviosa transcutánea (TENS):** Comprende un pequeño dispositivo eléctrico que emite pulsos eléctricos de bajo voltaje mediante la colocación de

parches electrodos en el cuerpo, también se utiliza para estimular puntos sensoriales corporales y para aliviar el dolor. Generalmente estos dispositivos son utilizados a un rango de frecuencia de 1 a 250 Hz [24].

Figura 1.5

Aplicación de la TENS para aliviar el dolor de espalda.



Nota. Combinar la terapia térmica junto con las TENS aumenta sus efectos porque promueve la circulación sanguínea y relación muscular. Fuente:[25].

1.2.5.1 Respuesta del cuerpo humano a estímulos vibratorios

En 1969 se utilizó por primera vez la estimulación vibratoria como alternativa de rehabilitación por los doctores Hagbarth y Eklund al observar que la vibración a diferentes frecuencias provocaba contracciones involuntarias y relajación del musculo involucrado. A este acontecimiento se definió como reflejo de vibración tónica con sus siglas RVT.

Dependiendo del tratamiento y los parámetros seleccionados, la vibración estimula todos los receptores corporales provocando efectos analgésicos, miorrelajantes o como estimulante de los mecanorreceptores musculares y cutáneos. Los corpúsculos de Paccini se activan a frecuencias altas (60-400 Hz) [26].

En la tabla 2. Se muestra los diferentes valores frecuencia al emitir vibraciones y su efecto en el cuerpo humano.

Tabla 2

Niveles de frecuencia y sus efectos en el cuerpo humano.

Efectos de la variación de frecuencia de las vibraciones en el cuerpo humano	
Niveles de frecuencia	Efecto
200 - 500 Hz	Estimula los reflejos actuando sobre las vías nerviosas centrales.
150 Hz	En largos periodos de tiempo produce dolor y malestar.
120 Hz	Sensibilidad en los mecanorreceptores, modula la excitabilidad de la corteza motora primaria.
100 Hz	En un músculo relajado se consigue contracción contra resistencia (movimientos involuntarios).
70 - 80 Hz	Activa la mayoría de husos musculares y genera ilusión de movimiento.
60 - 20 Hz	Produce efecto de relajación

Nota. La vibración provoca un efecto inmediato pero temporal en la disminución de la espasticidad. Fuente: [26].

1.2.6 Tecnología háptica

Se define como una tecnología orientada a la sensación del tacto mientras se interactúa con un medio físico realizando tareas a distancia conocido como tele operaciones o de manera virtual mediante la utilización de programas informáticos. En los últimos años la tecnología háptica se ha mantenido en constante desarrollo gracias al avance de nuevas tecnologías, tiene gran proyección de crecimiento debido a los muchos tipos de información sin explotar y la necesidad de dar respuesta a ello [27].

Háptica humana se basa en información cinestésica e información táctil que se ve representada cuando un operador manipula un objeto e impone la fuerza de interacción en su piel. El cerebro recibe información emitida por los sistemas sensoriales y genera la percepción háptica que consecuentemente emite comandos que activan los músculos.

Háptica de la máquina involucra elementos externos (máquinas) que reemplazan el toque o presencia del operador de manera autónoma o haciendo uso de interfaces hápticas. Entre las principales tareas que involucran la háptica de la máquina están las de medición de posiciones o fuerzas, cálculo de información y visualización de posiciones y fuerzas de contacto.

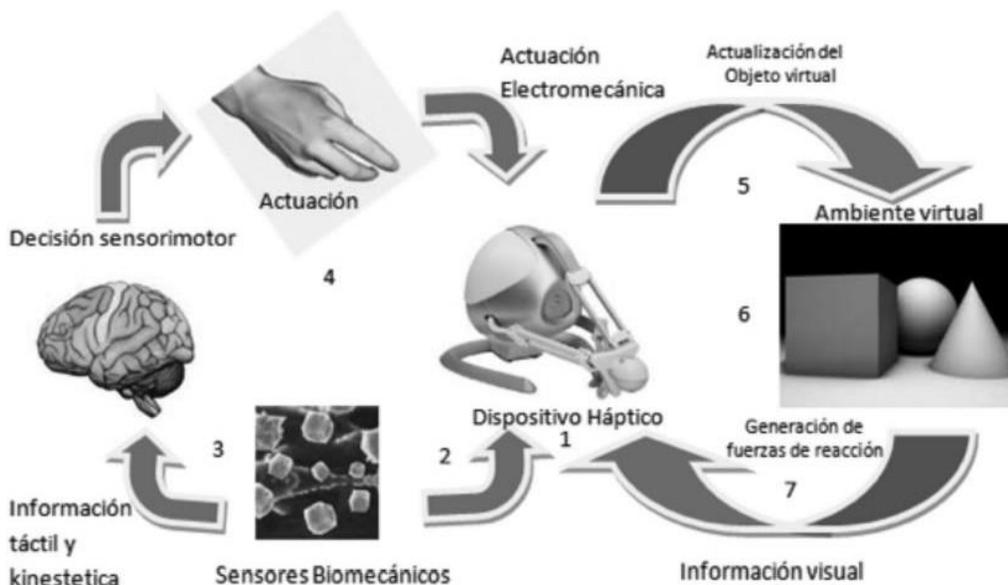
Háptica informática, tiene relación directa con el desarrollo de objetos virtuales quienes hacen la representación visual y la sensación de tacto producida por el tipo de retroalimentación producida. Todo esto es posible con el desarrollo de algoritmos de programación y arquitecturas de software. La tecnología háptica está presente en diferentes campos y entre los más destacados esta la medicina, rehabilitación, cirugías robóticas tele operadas, educación y entrenamiento. Sin embargo, la implementación de esta tecnología se ha encontrado con diferentes retos.

En aplicaciones industriales la complejidad de tareas, calidad de la retroalimentación y seguridad en la operación son aspectos que aun requieren mejoras.

En la aplicación médica, la tele operación es considerado poco práctica por algunos investigadores quienes sostienen que la seguridad de los pacientes, reproducción de sensación háptica realista, asequibilidad y la capacitación son desafíos que deben abordarse antes que los dispositivos hápticos puedan implementarse en procedimientos médicos en su totalidad [28].

Figura 1.6

Arquitectura de un sistema háptico.



Nota. Un buen sistema háptico busca proporcionar una experiencia realista y fiel a la interacción con el entorno virtual. Fuente:[29].

1.2.6.1 Dispositivos hápticos

En los últimos años la automatización y la robótica han llevado a cabo investigaciones y desarrollos aplicados a los procesos de rehabilitación del cuerpo humano. Uno de los dispositivos hápticos construidos se menciona a continuación.

- Guante háptico

En el año del 2010 la compañía europea Xtensor lanzó a la venta un guante que el movimiento en forma de rehabilitación activa. Este guante contiene unos anillos en los que se ingresan los dedos y movimiento flexo-extensivo utilizando ligas para contraer los dedos. La disposición de estos anillos se encuentra en la base de la palma [30].

El movimiento de la mano humana es producido por el uso de actuadores neumáticos (pistones) en la palma. Empleando este tipo de actuadores el dispositivo elimina los cables y

tensores lo que lo vuelve un sistema más compacto y ligero. Para la medición de la posición incorpora sensores infrarrojos y de efecto hall, su interfaz RS-232 es el medio de comunicación para la PC [30].

Figura 1.7

Guante háptico de la compañía Xtensor.



Nota. El guante Xtensor no solo mejora la fuerza y la movilidad de la mano, sino que también ayuda a aumentar la conciencia y coordinación de los movimientos. Fuente:[30].

1.2.7 Entorno virtual

Un entorno virtual es un espacio generado por computadora que simula la experiencia de estar inmerso en un mundo artificial o una realidad simulada. Estos entornos se crean utilizando tecnología gráfica, visualización 3D y herramientas de interacción para permitir que los usuarios se involucren y experimenten la simulación como si estuvieran presentes físicamente en ese espacio virtual [31]. Las características principales de un entorno virtual son las siguientes:

1. **Inmersión:** Un entorno virtual busca proporcionar una sensación de inmersión en el mundo simulado. Los usuarios llegan a sentir como si estuvieran físicamente presentes en el espacio virtual e interactuar con él de manera natural.

2. **Interacción en tiempo real:** Los entornos virtuales generan una interacción en tiempo real entre el usuario y el mundo virtual. Esto significa que las acciones y movimientos del usuario se

reflejan instantáneamente en el entorno, lo que brinda una experiencia de interacción fluida y realista.

3. Sensación de presencia: La sensación de presencia es la ilusión de que uno está realmente presente en el entorno virtual, aunque sepa que está interactuando con un mundo artificial. La combinación de inmersión, interacción y visualización 3D contribuye a crear esta sensación.

4. Interacción con objetos y personajes: En un entorno virtual, los usuarios interactúan con objetos y personajes presentes en el mundo simulado. En ocasiones, llegan a manipular objetos, moverse, hablar con personajes virtuales y realizar acciones similares del mundo real.

5. Personalización y adaptabilidad: Los entornos virtuales a menudo son personalizables y adaptables a las necesidades y preferencias del usuario; siendo utilizados para diversos propósitos, como entretenimiento, educación, entrenamiento, terapia y simulación de situaciones complejas [31].

Figura 1.8

Entorno virtual inmersivo.



Nota. Un buen entorno virtual debe ofrecer una experiencia inmersiva, interactiva y realista, adaptada a su propósito y audiencia específica. Fuente:[31].

CAPÍTULO II

MARCO METODOLÓGICO

1.3 Tipo de investigación

La investigación fue enfocada en el desarrollo de un prototipo de dispositivo háptico capaz de estimular la motricidad de los dedos, mediante la interacción con un entorno virtual que genera retroalimentación de carácter vibratorio para estimular el sentido del tacto.

Este trabajo es una investigación aplicada con la finalidad de aportar una solución que sea útil a la sociedad. Se desarrolla el prototipo aplicando conocimientos de la teoría a lo práctico.

La investigación es de tipo documental o bibliográfica, por lo que se revisa toda la información mediante libros, artículos científicos, revistas, bibliografías, tesis, catálogos [32].

De igual forma la investigación es de tipo descriptiva la cual consiste en describir las características del objeto de estudio, su diseño y construcción.

1.4 Diseño de la investigación

1.4.1 Fase 1: Evaluación de los parámetros

En la siguiente fase se describe la búsqueda de antecedentes de dispositivos hápticos que se encuentran en el mercado para definir el tipo de interacción que tendrá el usuario con el entorno virtual y el tipo de actuador que generará el estímulo vibratorio. Características que debe tener el prototipo.

Actividad 1: “Búsqueda de antecedentes”; se busca información sobre dispositivos hápticos comerciales, proyectos relacionados, elementos electrónicos, plataformas de diseño de entornos virtuales y ejercicios prácticos de rehabilitación física de dedos y mano accediendo a libros, revistas, artículos científicos, la web.

Actividad 2: “Evaluación de dispositivos similares de investigación y comerciales”; se realiza una comparación con dispositivos similares, tesis y modelos comerciales, para revisar su funcionamiento y estructura. Además, determinar los elementos eléctricos que mejor se acoplan.

1.4.2 Fase 2: Diseño de la estructura del sistema

Actividad 1: “Requerimientos de diseño”; se establece los parámetros y requerimientos que garanticen su desarrollo y funcionamiento óptimo.

Actividad 2: “Alternativas, evaluación y selección de los elementos”; se plantean las alternativas de los elementos que compondrán el dispositivo háptico. Se compara y califica las alternativas haciendo uso del método matriz de pares, teniendo en cuenta una escala de ponderación.

Actividad 3: “Desarrollo del sistema eléctrico”; en este apartado se realiza el diagrama eléctrico, utilizando software de simulación y la construcción de la placa PCB.

Actividad 4: “Desarrollo del anillo”; se realiza el modelado 3D de las piezas que conforman el anillo (soporte y sección circular) utilizando el software CAD para modelado mecánico en 2D y 3D.

Actividad 5: “Impresión 3D del anillo”; con los modelos 3D de las piezas que conforman el anillo se imprime con material PLA.

Actividad 6: “Desarrollo del entorno virtual”; se desarrolla un ambiente virtual para el usuario utilizando un software de desarrollo de entornos virtuales.

1.4.3 Fase 3: Ensamblaje del dispositivo

Es necesario tener previamente todos los elementos que constituyen el dispositivo háptico para el ensamblaje de la parte eléctrica junto con la mecánica.

Actividad 1: “Ensamblaje de los elementos”; se procede a ensamblar los elementos electrónicos junto con los elementos mecánicos procurando que se integre todo aquello que le da funcionalidad al dispositivo.

1.4.4 Fase 4: Comprobación del funcionamiento

En esta fase se realiza la comprobación del funcionamiento del dispositivo realizando pruebas para validar los resultados obtenidos.

Actividad 1: “Descripción del funcionamiento”; se detalla la forma correcta de utilizar el dispositivo háptico.

Actividad 2: “Pruebas de funcionamiento”; se realiza las pruebas de funcionamiento a personas que tienen problemas de la motricidad en el dedo índice de la mano y que se encuentren asistiendo a rehabilitación.

Actividad 3: “Análisis y validación de los resultados”; se analiza los resultados de las pruebas realizadas en los diferentes pacientes.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.5 Especificaciones del sistema

En el siguiente capítulo se menciona los respectivos requerimientos de diseño para el dispositivo háptico seguido del planteamiento de las alternativas de elementos que conformarán el dispositivo háptico.

Tabla 3

Requerimientos del proyecto.

Requerimientos	Descripción
Sensores	Sensores no invasivos, es decir no realizarán ningún daño al paciente.
Transmisión de datos	Transmisión de datos inalámbrica, es decir que no use hilos o cables.
Portabilidad	Dispositivo portable, es decir que se pueda trasladar sin problema.
Modular	Sus partes deben ser desmontables
Peso	El peso total en conjunto debe ser menor a 500g.
Disponibilidad de elementos	Los elementos que componen el dispositivo deben ser accesibles en el mercado nacional.

Tomando en cuenta los requerimientos se proponen alternativas por cada elemento que conforma el dispositivo háptico. Las alternativas se presentan a continuación.

1.6 Selección de los elementos

1.6.1 Asignación de alternativas

En la tabla 4 se observa tres alternativas de sensores de navegación (módulos ADXL335, MPU6050 y LSM6DS33), estos sensores cumplen con dos funciones relevantes como son el acelerómetro y giroscopio.

Tabla 4

Alternativas de sensores de navegación.

N°	Sensor	Corriente de operación (uA)	Voltaje mínimo (V)	Voltaje máximo (V)	Temperatura de operación (°C)
Alternativa 1	ADXL335	350	1.8	3.6	-40 a +84
Alternativa 2	MPU6050	500	2.375	3.46	-40 a +85
Alternativa 3	LSM6DS33	70	1.71	3.6	-40 a +86

En la tabla 5, se muestra las diferentes alternativas de tarjetas de control para la transmisión y procesamiento de datos del dispositivo háptico, las dimensiones deben ser lo más pequeñas posibles porque será ubicado dentro de una carcasa portátil-

Tabla 5

Alternativas de tarjetas de control para la transmisión y procesamiento de datos.

N°	Tarjeta de control	Micro controlador	Tensión de alimentación (V)	Corriente de máxima de salida (mA)	Dimensiones (mm)
Alternativa 1	Arduino UNO	ATmega 328P	7-12	50	68.6 x 53.4
Alternativa 2	Arduino Nano	ATmega 328P	7-12	40	18.5 x 43.2
Alternativa 3	Arduino Pro mini	ATmega 328P	3.3	150	18 x 33

Se muestra las alternativas en cuanto a tarjetas de control para el receptor de datos del dispositivo háptico las dimensiones no tienen mayor importancia porque será ubicado dentro de una carcasa en la cual no comparte espacio con otros elementos electrónicos.

Tabla 6

Alternativas de microcontrolador para la recepción de datos.

N°	Tarjeta de control	Micro controlador	Tensión de alimentación (V)	Corriente de máxima de salida (mA)	Dimensiones (mm)
Alternativa 1	Arduino UNO	ATmega 328P	7-12	50	68.6 x 53.4
Alternativa 2	Arduino Pro mini	ATmega 328P	3.3	150	18 x 33
Alternativa 3	Arduino Nano	ATmega 328P	7-12	40	18.5 x 43.2

En la tabla 7 se encuentran las diferentes opciones de actuadores vibratorios, su principal función es la de producir la retroalimentación al usuario. En este caso, es importante tomar en cuenta las dimensiones porque será ubicado dentro de la carcasa en forma de anillo que portará el usuario en su dedo, para lo cual el actuador debe ser lo más pequeño posible.

Tabla 7*Alternativas de actuador vibratorio.*

N°	Motor vibratorio	RPM	Voltaje de operación máx./min. (V)	Temperatura de operación (°C)	Dimensiones (mm)
Alternativa 1	Tipo moneda	15000 ± 3000	2.7 - 3.3	-20 a + 60	6
Alternativa 2	Tipo cilindro	12000 ± 1500	1 - 2.2	-30 a + 70	11x3.9x4
Alternativa 3	Tipo SMD	14000 ± 2500	2.7 - 3.3	-20 a +70	11x3.2x4

En la Tabla 8 se muestra las alternativas a considerar para la selección del método de comunicación y transmisión de datos, las alternativas tomadas en cuenta son mediante módulo Wi-Fi, módulo bluetooth o radio frecuencia.

Tabla 8*Alternativas de comunicación inalámbrica.*

N°	Módulo	Corriente de operación (mA)	Voltaje mínimo (V)	Voltaje máximo (V)	Temperatura de operación (°C)
Alternativa 1	Bluetooth	30	3.3	6	-20 a +75
Alternativa 2	Wi-Fi	80	2.5	3.6	-40 a +125
Alternativa 3	RF 433MHz TX y RX	4/4.7	3.5/2.5	12/5	-40 a +85

En cuanto al software de desarrollo de entornos virtuales, se propone tres alternativas que son las más utilizadas dentro de este ámbito. Serán utilizados para que el usuario reconozca sin dificultad los objetos al momento de interactuar con ellos.

Tabla 9

Alternativas de software para el desarrollo del entorno virtual.

N°	Nombre	Curva de aprendizaje	Licencia	Lenguaje de programación	Memoria RAM del sistema para instalación
Alternativa 1	Unreal Engine 4	Muy alta	Gratuita	C++ y Bluesprints	8 GB
Alternativa 2	Unity 3D	Muy alta	De pago y gratuita	Java Script y Csharp	8 GB
Alternativa 3	Godot Engine	Baja	Gratuita	GDScript	4 GB

1.6.2 Parámetros de evaluación de las alternativas

En esta sección se describen los criterios de evaluación

- **Usabilidad**

No debe presentar mayor complejidad al momento de usarlo.

- **Versatilidad**

Debe garantizar su óptimo funcionamiento en las condiciones más adversas.

- **Disponibilidad**

Los componentes electrónicos y software deben ser de fácil acceso.

1.6.3 Evaluación de elementos utilizando matriz de pares

Para escoger los elementos eléctricos y software de desarrollo que se ajusten a las necesidades del proyecto se realiza una selección por medio del método matriz de pares, las ponderaciones se las coloca a continuación [33], ver tabla 10.

Tabla 10

Ponderaciones para el método de matriz de pares.

Escala	Ponderación
Muy importante	10
Importante	5
Igual	1
Menos importante	0.2
Mucho menos importante	0,1

Para determinar el factor de ponderación (FP) de cada parámetro se utiliza los valores presentes en la tabla 10 y se aplica la siguiente ecuación 2-1 [34].

$$FP = \frac{\text{suma}}{\text{Total}} = PO \quad \text{Ecuación 2-1}$$

De igual manera para el cálculo del peso (PO) se utiliza la misma ecuación del factor de ponderación (FP) en donde se utilizará los valores de las siguientes tablas 11 - 19.

Tabla 11

Evaluación de parámetros basada en la matriz de pares.

	Usabilidad	Versatilidad	Disponibilidad	Suma	FP
Usabilidad	0	5	10	15	0,53
Versatilidad	1	0	1	2	0,07
Disponibilidad	1	10	0	11	0,39
Total				28	

Tabla 12*Matriz de pares aplicado a la usabilidad.*

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma	PO
Alternativa 1	0	1	1	3	0,25
Alternativa 2	1	0	1	3	0,25
Alternativa 3	1	1	0	3	0,25
Total				9	

Tabla 13*Matriz de pares aplicado a la versatilidad.*

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma	PO
Alternativa 1	0	1	1	3	0,25
Alternativa 2	1	0	1	3	0,25
Alternativa 3	1	1	0	3	0,25
Total				9	

Tabla 14*Matriz de pares aplicado a la disponibilidad de sensores de navegación.*

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma	PO
Alternativa 1	0	1	10	11	0,6
Alternativa 2	0,2	0	1	1,2	0,06
Alternativa 3	5	0,2	0	5,2	0,25
Total				17,4	

Tabla 15

Matriz de pares aplicado a las tarjetas de control para transmisión de datos.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma	PO
Alternativa 1	0	1	0,2	1,2	0,06
Alternativa 2	1	0	1	2	0,1
Alternativa 3	10	5	0	15	0,82
Total				18,2	

Tabla 16

Matriz de pares aplicado a la selección del microcontrolador del receptor.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma	PO
Alternativa 1	0	0,2	0,2	0,4	0,02
Alternativa 2	10	0	1	11	0,63
Alternativa 3	1	5	0	6	0,34
Total				17,4	

Tabla 17

Matriz de pares aplicado a la selección del actuador vibratorio.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma	PO
Alternativa 1	0	10	5	15	0,57
Alternativa 2	1	0	0,2	1,2	0,04
Alternativa 3	5	5	0	10	0,38
Total				26,2	

Tabla 18

Matriz de pares aplicado para la comunicación inalámbrica.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma	PO
Alternativa 1	0	1	1	2	0,15
Alternativa 2	5	0	5	10	0,75
Alternativa 3	0,2	1	0	1,2	0,09
Total				13,2	

Tabla 19

Matriz de pares aplicado a la selección del software de desarrollo para entornos virtuales.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma	PO
Alternativa 1	0	5	5	10	0,58
Alternativa 2	1	0	1	2	0,11
Alternativa 3	0,2	5	0	5,2	0,30
Total				17,2	

A continuación, se muestra en las tablas 20 a 26, la selección de alternativas con su valoración respectiva. Se utiliza la ecuación 2-2 para el cálculo de los valores de cada alternativa [34].

$$\text{Final de puntaje} = FP * PO$$

$$\text{Ecuación 2-2}$$

Tabla 20

Matriz de pares para determinar el sensor de navegación.

	Usabilidad	Innovación	Disponibilidad	Suma
Alternativa 1	0,13	0,01	0,31	0,45
Alternativa 2	0,13	0,01	0,004	0,14
Alternativa 3	0,13	0,01	0,09	0,23

De acuerdo con el resultado obtenido en la matriz de pares se hace la elección de la alternativa 1, se trata del sensor de navegación ADXL335. Es un sensor de navegación de tres ejes, lo que significa que es capaz de medir la aceleración en tres dimensiones: eje X, eje Y y eje Z. El mismo que tiene un rango de medición configurable, mide aceleraciones en el rango de +/- 3g, +/- 5g o +/- 10g. La "g" representa la aceleración de la gravedad, donde 1g equivale a la aceleración de la gravedad terrestre (aproximadamente 9.8 m/s²) [35].

Tabla 21

Matriz de pares para determinar la tarjeta de control para la transmisión de datos.

	Usabilidad	Innovación	Disponibilidad	Suma
Alternativa 1	0,13	0,01	0,318	0,458
Alternativa 2	0,13	0,01	0,007	0,14
Alternativa 3	0,13	0,01	0,319	0,459

Para la transmisión de los datos obtenidos por el acelerómetro se utilizará la alternativa 3, se trata del Arduino pro mini. Es una placa microcontroladora compacta y de bajo costo diseñada para proyectos y aplicaciones donde el tamaño y el consumo de energía son factores críticos. Dispone de 14 pines de E/S digitales, de los cuales 6 pueden ser utilizados como salidas PWM. Además, cuenta con 8 pines analógicos. Utiliza un microcontrolador ATmega328P de la familia

AVR con una velocidad de reloj de 16 MHz. También, está disponible una versión con el microcontrolador ATmega168P, que tiene una velocidad de reloj de 8 MHz [36].

Tabla 22

Matriz de pares para determinar el microcontrolador del receptor.

	Usabilidad	Innovación	Disponibilidad	Suma
Alternativa 1	0,13	0,01	0,01	0,15
Alternativa 2	0,13	0,01	0,04	0,18
Alternativa 3	0,13	0,01	0,13	0,27

El microcontrolador para utilizar en la parte receptora es el de la alternativa 3: Arduino Nano. Utiliza el microcontrolador ATmega328P o ATmega328P-AU con una velocidad de reloj de 16 MHz. Ambos microcontroladores son de 8 bits y ofrecen un rendimiento adecuado para una amplia gama de aplicaciones. Dispone de 14 pines de E/S digitales, de los cuales 6 pueden ser utilizados como salidas PWM (Modulación por Ancho de Pulso). También cuenta con 8 pines analógicos para la adquisición de datos analógicos [37].

Tabla 23

Matriz de pares para determinar el actuador vibrador.

	Usabilidad	Innovación	Disponibilidad	Suma
Alternativa 1	0,13	0,01	0,30	0,44
Alternativa 2	0,13	0,01	0,002	0,142
Alternativa 3	0,13	0,01	0,14	0,28

El actuador que será encargado de generar el estímulo vibratorio esta dado por la alternativa 1, motor vibrador DC. Tiene un rango de RPM considerable de (15000 RPM) a pesar de sus 6 mm de diámetro. La velocidad y la intensidad de las vibraciones de estos motores generalmente se

controlan mediante la modulación de la tensión de alimentación o mediante el uso de circuitos de control específico. [38].

Tabla 24

Matriz de pares para la selección de la comunicación inalámbrica

	Usabilidad	Innovación	Disponibilidad	Suma
Alternativa 1	0,13	0,01	0,07	0,21
Alternativa 2	0,13	0,01	0,05	0,19
Alternativa 3	0,13	0,01	0,03	0,17

La alternativa 1, Comunicación bluetooth será considerada como medio de transferencia de datos. Esta comunicación viene dada por el módulo HC05. Su voltaje de operación se encuentra dentro del rango de 3,6v y 6v, dato importante considerante la fuente de alimentación externa de 8v que tiene el dispositivo. El alcance de transmisión del módulo HC-05 varía dependiendo de las condiciones del entorno y la potencia de la señal, pero generalmente se encuentra en el rango de 10 a 30 metros en espacios abiertos. Utiliza el protocolo Bluetooth 2.0+EDR (Enhanced Data Rate), transfiere rápidamente los datos y produce una comunicación eficiente con dispositivos compatibles [39].

Tabla 25

Matriz de pares para determinar el software de desarrollo de entornos virtuales.

	Usabilidad	Innovación	Disponibilidad	Suma
Alternativa 1	0,13	0,01	0,30	0,44
Alternativa 2	0,13	0,01	0,007	0,147
Alternativa 3	0,13	0,01	0,11	0,25

El software desarrollador de entornos virtuales viene dado por la alternativa 1, Unreal Engine. Como se definió anteriormente, el motor de videojuegos que se utilizará para el desarrollo del entorno virtual es Unreal Engine 4. Considerado por su línea de aprendizaje notablemente alta y junto a su amplia gama de librerías y editores lo vuelve un software amigable para el programador. Un software muy completo con oportunidad de ser aplicado en campos como entretenimiento visual, realidad aumentada y realidad virtual.

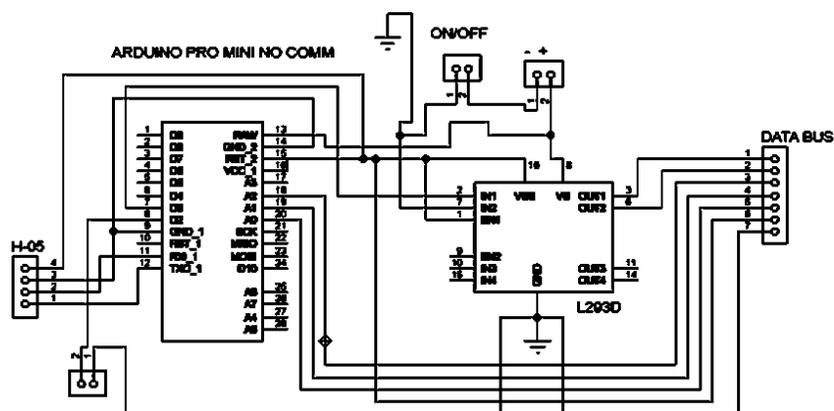
Es importante conocer algunas generalidades de este software como los requerimientos de instalación. Es importantes que la CPU del ordenador destino posea un procesador Quad-core Intel, o AMD de 2,5Hz o superiores. Su memoria RAM debe ser de 8 GB o superiores. La tarjeta gráfica debe ser compatible con DirectX10 [40].

1.7 Sistema electrónico

Se realiza el esquema de conexiones de los elementos electrónicos en el software PROTEUS, se muestra en la figura 3.1.

Figura 3.1

Diagrama eléctrico de conexiones.

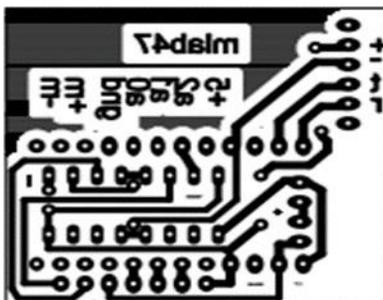


1.7.1 Placa de Circuito Impreso (PCB)

A continuación, se muestra el diseño del circuito PCB, figura 3.2, con el fin de tener la dimensión de la tarjeta electrónica, la misma que tiene unas dimensiones de 35 mm x 45 mm. En el diseño de las pistas se usó el programa PCBwizard.

Figura 3.2

Diseño de la placa PCB.

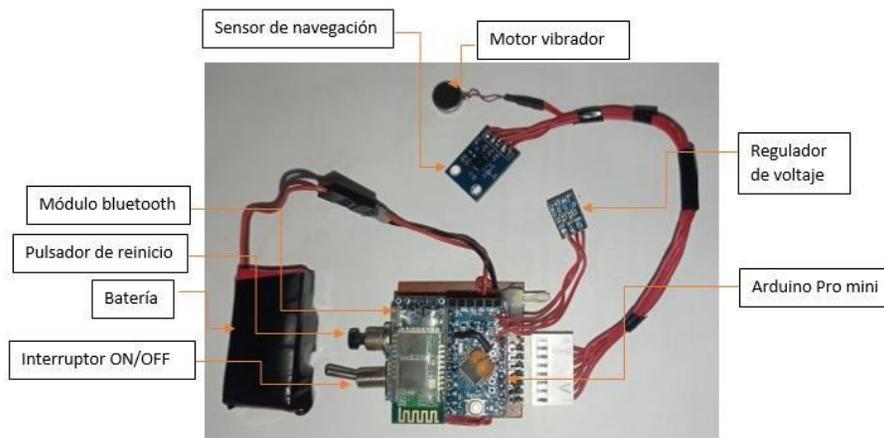


Para el desarrollo de las pistas de la placa PCB se utilizó el método de transferencia de calor. Se realizaron perforaciones pasantes en la placa con un taladro para posicionar los elementos electrónicos en su lugar correspondiente de acuerdo al diagrama de conexiones.

A continuación, se presenta los elementos electrónicos que forman parte del dispositivo.

Figura 3.3

Sistema electrónico del prototipo



1.8 Diseño Mecánico

1.8.1 Modelado 3D del prototipo

El anillo está compuesto por tres partes: 1) **sección circular**, lugar por donde ingresa el dedo, 2) **soporte**, lugar donde se coloca el sensor de navegación y el motor vibrador y 3) **estructura**, donde se encuentran los elementos restantes, tiene dimensión de 75mm x 50 mm x 25 mm, como se muestra en la figura 3.5.

Figura 3.4

Modelado 3D a) soporte del anillo y b) sección circular del anillo.

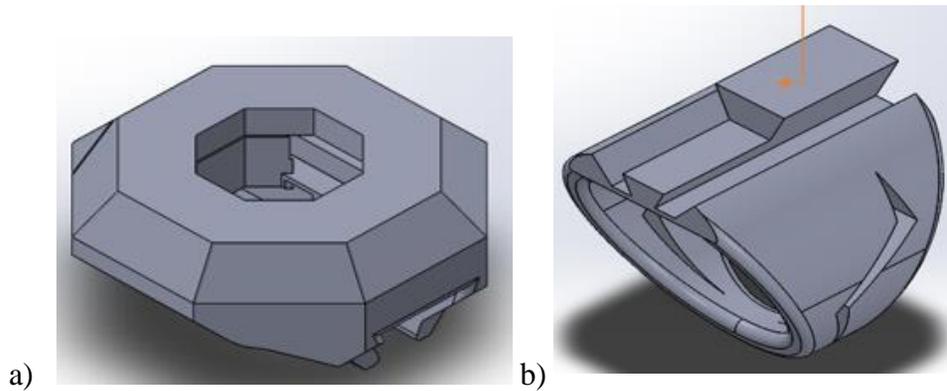
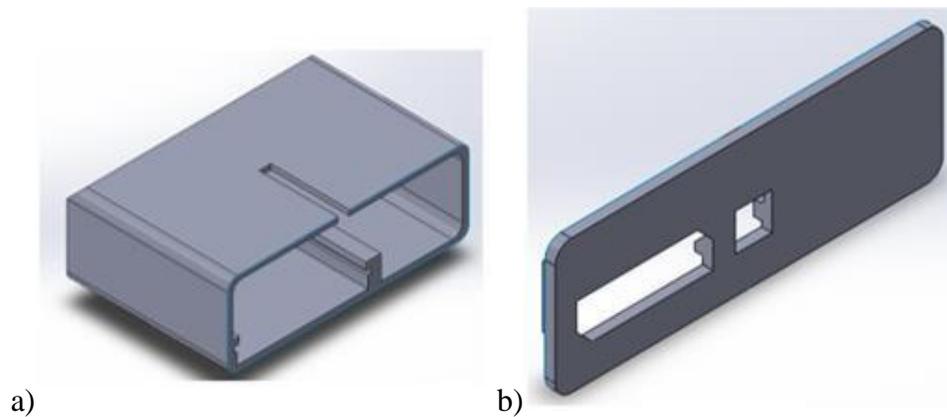


Figura 3.5

Modelado 3D a) estructura, b) tapa.



1.8.2 Impresión 3D del anillo

Con los modelos 3D de las partes constitutivas del anillo y la cubierta del circuito listas se procede imprimir con la máquina de impresión Genius utilizando filamento de color blanco.

Figura 3.6

Impresión 3D: a) Soporte del anillo, b) Sección circular del anillo.

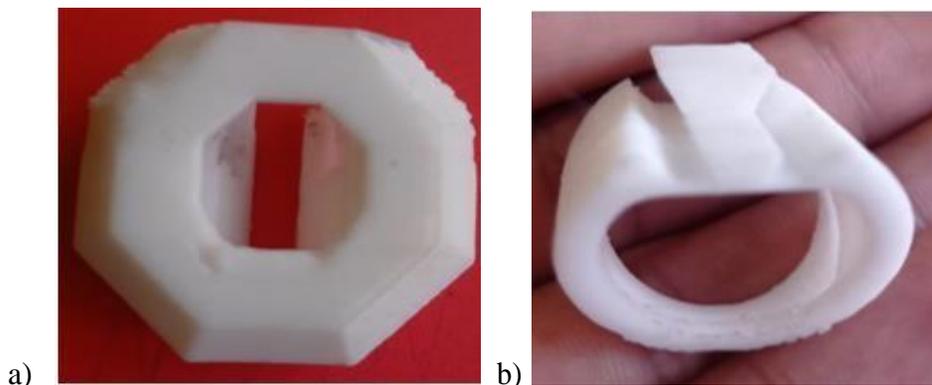
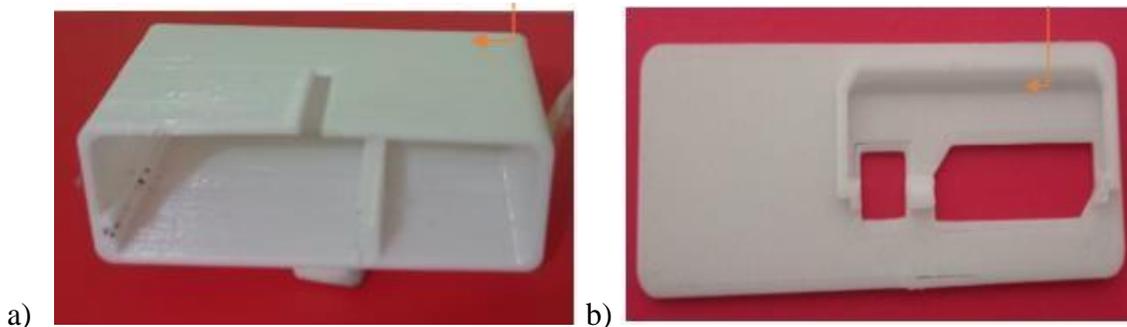


Figura 3.7

Impresión 3D: a) estructura b) tapa



1.9 Diseño de la Interfaz del entorno virtual

El entorno virtual fue desarrollado utilizando programación C++ y programación visual con Blueprints en el software Unreal Engine 4. El mismo que tendrá dos escenas para que el usuario interactúe.

1.9.1 Escena 1 (ambientación)

La primera escena es un entorno cerrado donde el usuario se mueve libremente utilizando los movimientos de flexión y extensión del dedo para movilizarse de adelante hacia atrás. El propósito de la primera escena es familiarizar al usuario con la mecánica del juego y vaya desarrollando la habilidad de orientación e intuición. El movimiento de la muñeca en sentido horario y antihorario permite rotar la vista panorámica de derecha a izquierda.

Figura 3.8

Escena 1 del entorno virtual.

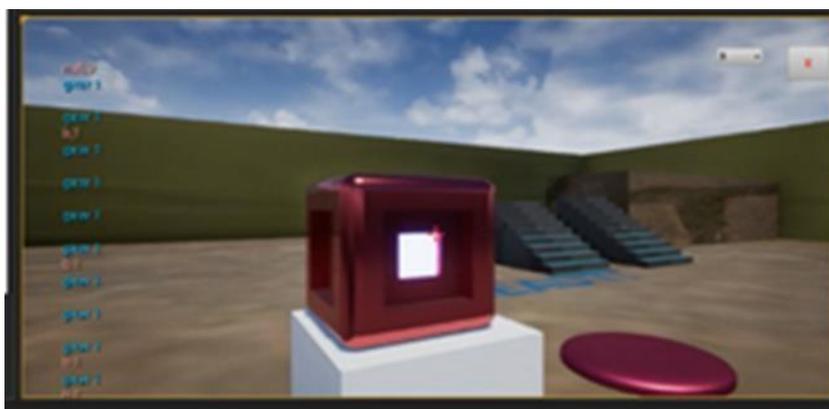
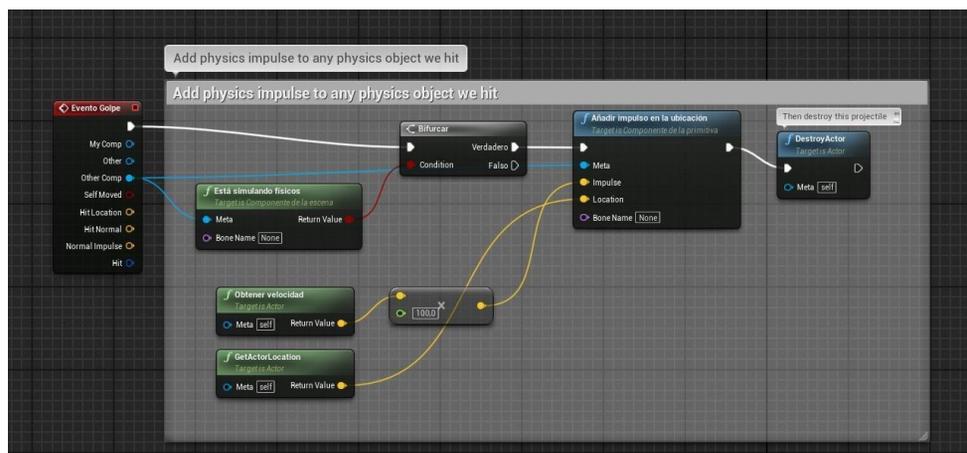


Figura 3.9

Bloques de programación de la escena 1



1.9.2 Escena 2 (ejecución de acciones)

La segunda escena trata de un entorno abierto, tiene mayor dificultad porque si el usuario sale de la zona de trabajo perdería el juego, esto obliga al usuario a tener un mayor grado de concentración en los movimientos del dedo.

Figura 3.10

Escena 2 del entorno virtual.

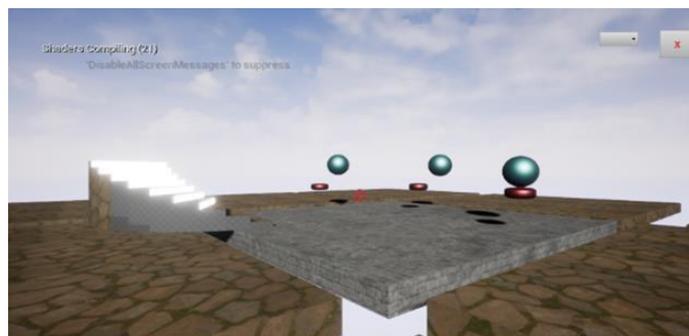
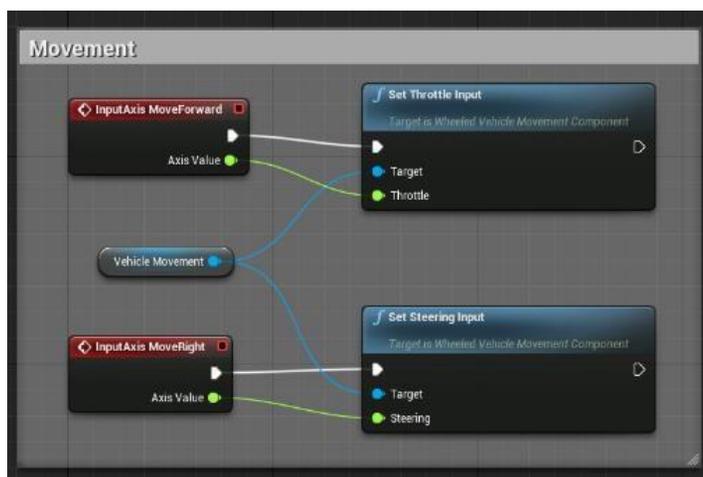


Figura 3.11

Bloques de programación de la escena 2



1.10 Ensamblaje de los elementos

Una vez impresos los modelo 3D y la placa PCB se realiza el ensamblaje de todos los elementos que conforma el dispositivo háptico. La estructura que guarda la placa electrónica lleva en su parte inferior una banda de velcro con el fin de sujetar el dispositivo al antebrazo del usuario.

A continuación, en la figura 3.12 se presenta el prototipo final de dispositivo háptico

Figura 3.12

Prototipo final del Dispositivo háptico



1.11 Protocolo de funcionamiento del dispositivo háptico

La acción de trasladarse de un punto a otro dentro del entorno virtual responde a los movimientos del dedo y la muñeca. La acción de fuerza que activa la retroalimentación vibratoria es producida por el mismo dedo.

La acción de trasladarse hacia adelante responde al movimiento de flexión del dedo.

Figura 3.13

Movimiento de flexión del dedo hacia adelante y extensión hacia atrás.



La acción rotar la vista panorámica hacia la derecha responde a la acción de rotar la muñeca en sentido horario.

Figura 3.14

Movimiento de rotación de la muñeca en sentido horario.



La acción de rotar la vista panorámica hacia la izquierda responde a la acción de rotar la muñeca en sentido antihorario.

Figura 3.15

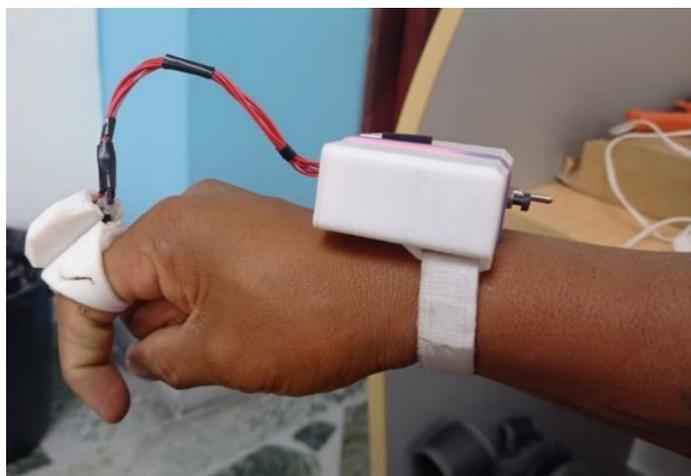
Movimiento de rotación de la muñeca en sentido antihorario.



Para accionar la retroalimentación, el usuario debe realizar un movimiento de flexión (movimiento de fuerza) de la articulación metacarpofalángica, ángulos. El nivel de vibración emitida por el motor vibrador es directamente proporcional a la variación de velocidad y ángulo de flexión.

Figura 3.16

Movimiento de flexión de la articulación metacarpofalángica.



1.12 Pruebas de funcionamiento

Las pruebas del sistema se realizaron a 3 personas que asisten a rehabilitación física por problemas de motricidad en sus dedos. Los pacientes conservaron el mismo protocolo para las pruebas. Realizaron tres repeticiones por cada escena, tuvieron descansos de tres minutos entre repeticiones para no provocar fatiga, de acuerdo con el criterio del especialista. Además, se realizaron 5 sesiones por paciente.

Para llevar a cabo el análisis de los resultados, se generaron gráficas que representan el tiempo dedicado por cada paciente en completar las tareas de cada escena.

Tabla 26

Datos de los pacientes

Paciente	Edad	Lugar de Residencia
Paciente 1	23	Atuntaqui
Paciente 2	19	Otavalo
Paciente 3	28	Atuntaqui

- **Antecedentes del paciente 1**

El paciente tuvo una caída mientras se movilizaba con su bicicleta hacia su lugar de trabajo. Motivo por el cual, sufrió la fractura del dedo índice de la mano derecha. Por esta razón tuvo que estar el paciente inmovilizado durante un mes.

- **Antecedentes del paciente 2**

El paciente fue víctima de un accidente laboral que le provoco una fractura de muñeca, teniendo que estar inmovilizado la muñeca y los dedos de la mano izquierda aproximadamente 3

semanas. Además, presenta limitaciones al momento de realizar flexión y extensión de los dedos y entumecimiento en la punta de la falange distal del índice

- **Antecedentes del paciente 3**

El paciente tuvo un accidente laboral motivo por el cual sufrió la fractura de la falange medio del dedo índice de la mano derecha, teniendo que someterse a cirugía. En ese contexto, el paciente queda inmovilizado el área afecta durante un mes. Asimismo, el paciente presenta limitaciones al momento de realizar la flexión y extensión de su dedo.

A continuación, se describe la tarea a cumplir cada paciente para la rehabilitación, bajo la supervisión de especialista.

1.12.1 Pruebas de funcionamiento y análisis de la escena 1 en cada paciente

- **Escena 1**

Para el cumplimiento de las pruebas de funcionamiento dentro de esta escena se establece una actividad a realizar la cual consiste en que el usuario tome el cubo sobre la superficie y se movilice alrededor de todo el campo de trabajo realizando una vuelta y finalmente coloque el cubo en su lugar de origen, dentro del entorno virtual. Esta actividad se repite en tres ocasiones.

Figura 3.17

Pruebas de funcionamiento en la primera escena.



A continuación, se muestran en las tablas 27-29 la información del tiempo (minutos) de ejecución que los pacientes 1, 2, y 3 tardaron para cumplir las tareas de cada escena, durante 5 días.

Tabla 27

Tiempos del paciente 1 (escena 1).

	Sesión 1	Sesión 2	Sesión 3	Sesión 4	Sesión 5
Repetición #1	4:00	4:09	3:55	3:22	2:58
Repetición #2	3:55	4:10	3:45	3:09	2:45
Repetición #3	4:10	4:02	4:02	3:15	2:40

Tabla 28

Tiempos del paciente 2 (escena 1).

	Sesión 1	Sesión 2	Sesión 3	Sesión 4	Sesión 5
Repetición #1	5:44	4:20	4:14	3:33	3:34
Repetición #2	4:38	4:56	4:19	3:56	3:22
Repetición #3	5:10	4:12	4:17	3:45	3:00

Tabla 29

Tiempos del paciente 3 (escena 1).

	Sesión 1	Sesión 2	Sesión 3	Sesión 4	Sesión 5
Repetición #1	4:44	4:12	3:45	3:22	3:04
Repetición #2	4:23	4:33	3:21	3:00	2:56
Repetición #3	4:58	4:19	3:34	3:15	3:01

1.12.2 Pruebas de funcionamiento y análisis de la escena 2 en cada paciente

- Escena 2

Para el cumplimiento de las pruebas de funcionamiento dentro de esta escena. El usuario enciende las 3 luces sin importar el orden, pero para apagar las luces se conserva el orden en que fueron encendidas.

Figura 3.18

Interacción con la segunda escena.



A continuación, se muestran en las tablas 30-32 la información del tiempo (minutos) de ejecución que los pacientes 1, 2, y 3 tardaron para cumplir las tareas de cada escena, durante días.

Tabla 30

Tiempos del paciente 1 (escena 2).

	Sesión 1	Sesión 2	Sesión 3	Sesión 4	Sesión 5
Repetición #1	5:09	4:20	3:43	3:00	2:45
Repetición #2	4:30	4:03	3:32	3:12	3:00
Repetición #3	4:55	4:28	3:52	3:03	2:34

Tabla 31*Tiempos del paciente 2 (escena 2).*

	Sesión 1	Sesión 2	Sesión 3	Sesión 4	Sesión 5
Repetición #1	4:32	4:58	4:11	3:44	2:09
Repetición #2	4:12	4:41	3:23	3:25	3:02
Repetición #3	3:09	4:07	3:56	3:16	2:22

Tabla 32*Tiempos del paciente 3 (escena 2).*

	Sesión 1	Sesión 2	Sesión 3	Sesión 4	Sesión 5
Repetición #1	6:02	4:36	3:09	3:00	2:12
Repetición #2	5:22	4:02	3:49	3:02	2:46
Repetición #3	6:13	4:11	3:22	2:49	2:00

1.13 Análisis y validación de los resultados

Los resultados de cada uno de los pacientes en las diferentes escenas se presentan en las figuras 3.20 – 3.25.

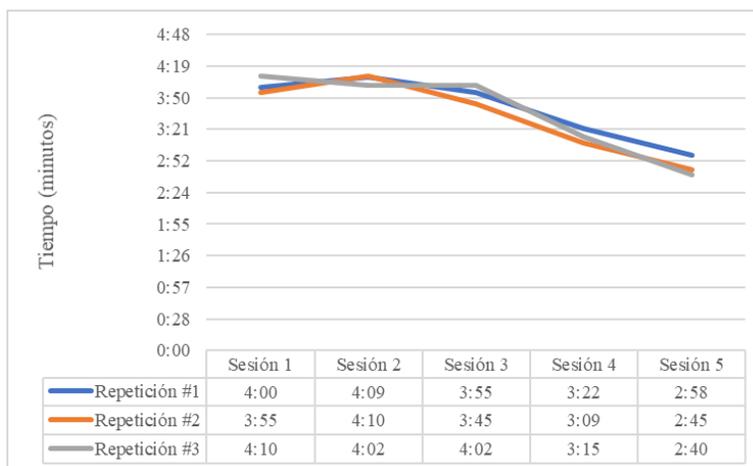
Figura 3.19*Progreso del paciente 1 para la escena 1.*

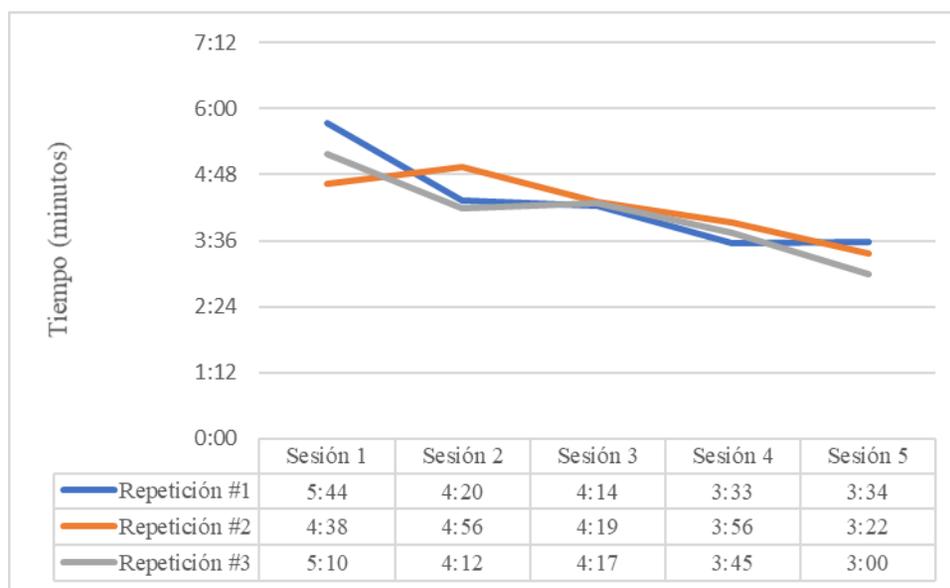
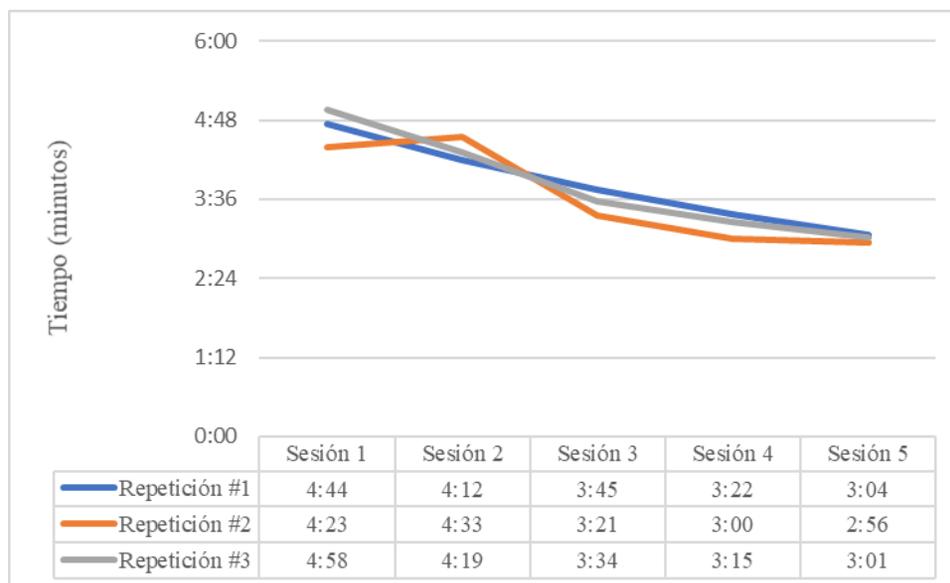
Figura 3.20*Progreso del paciente 2 para la escena 1.***Figura 3.21***Progreso del paciente 3 escena 1.*

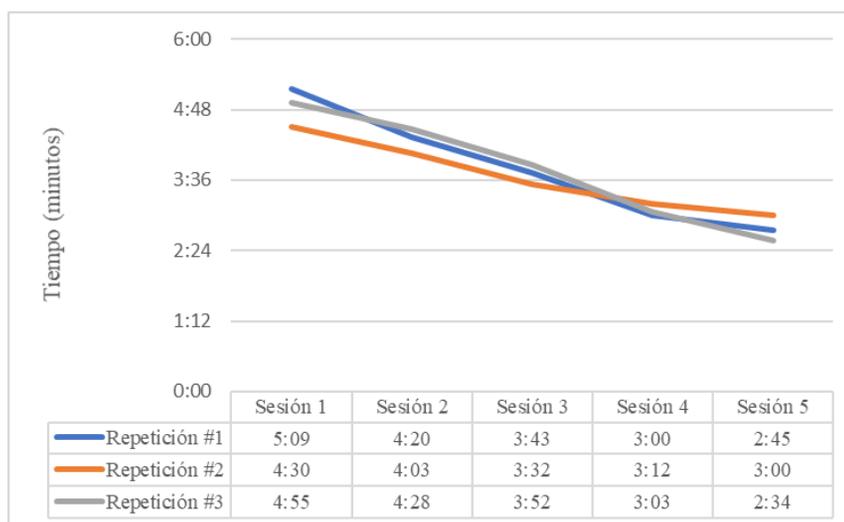
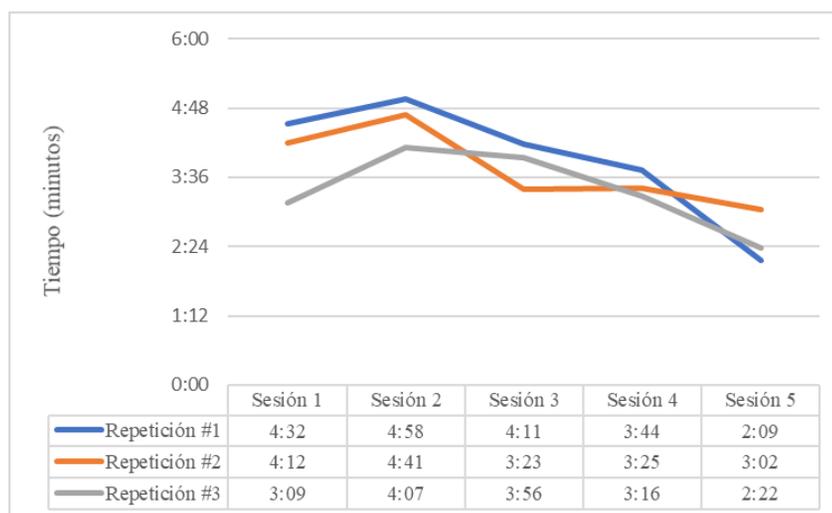
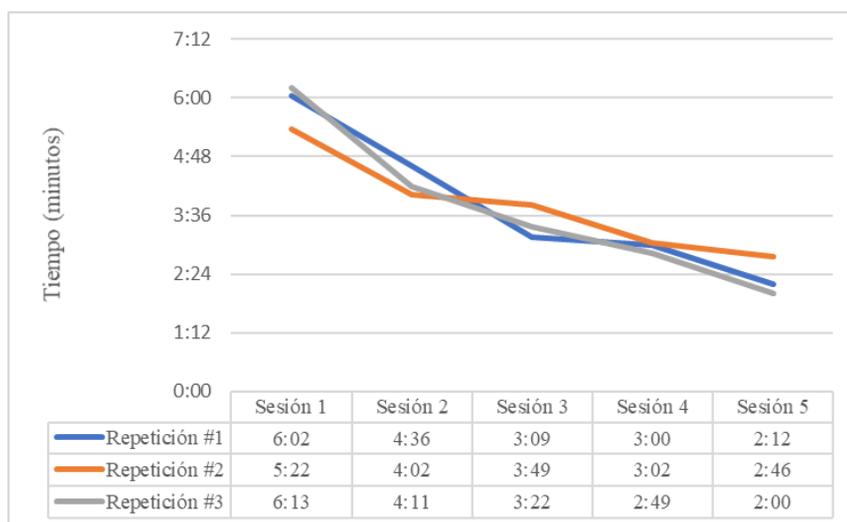
Figura 3.22*Progreso del paciente 1 para la escena 2.***Figura 3.23***Progreso del paciente 2 para la escena 2.*

Figura 3.24

Progreso del paciente 3 para la escena 2.



El progreso de los pacientes a lo largo de las sesiones se considera significativo, dado que las figuras 3.20 - 3.25 muestran una tendencia decreciente en la curvatura de la gráfica que representa el tiempo en función de la sesión. Esta disminución sugiere que los pacientes requieren menos tiempo para completar cada una de las escenas.

ESCENA 1

El paciente 1 en la primera sesión dedico un promedio de 4:01 minutos, mientras que en su última sesión dedico un promedio de 2:47 minutos. Refleja una disminución de 1:14 minutos equivalentes al 30,62%.

El paciente 2 en la primera sesión dedico un promedio de 5:10 minutos, mientras que en su última sesión dedico un promedio de 3:18 minutos. Refleja una disminución de 1:52 minutos equivalentes al 36,05%.

El paciente 3 en la primera sesión dedico un promedio de 4:41 minutos, mientras que en su última sesión dedico un promedio de 3:00 minutos. Refleja una disminución de 1:41 minutos equivalentes al 35,98%.

ESCENA 2

El paciente 1 en la primera sesión dedico un promedio de 4:51 minutos, mientras que en su última sesión dedico un promedio de 2:46 minutos. Refleja una disminución de 2:05 minutos equivalentes al 42,91%.

El paciente 2 en la primera sesión dedico un promedio de 3:57 minutos, mientras que en su última sesión dedico un promedio de 2:31 minutos. Refleja una disminución de 1:26 minutos equivalentes al 36:47%.

El paciente 3 en la primera sesión dedico un promedio de 5:52minutos, mientras que en su última sesión dedico un promedio de 2:19 minutos. Refleja una disminución de 3:33 minutos equivalentes al 60,45%.

-

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Con la revisión del estado del arte, se concluye que los dispositivos hápticos representan un avance tecnológico destacado y se encuentran ampliamente presentes en diversas áreas. Esta tecnología ha alcanzado un sólido posicionamiento en campos tan variados como medicina, rehabilitación física, entretenimiento y educación.
- En el proceso de selección de los elementos electrónicos, se prioriza la miniaturización para reducir las dimensiones del dispositivo háptico sin comprometer su ergonomía y portabilidad. Se busca cuidadosamente aquellos componentes electrónicos que permitan mantener un diseño compacto y fácil de transportar, garantizando al mismo tiempo una experiencia cómoda y funcional para el usuario.
- Se logró estimular el sentido del tacto mediante la variación de frecuencia, utilizando señales PWM que recibe el motor; demostrando la relación entre las vibraciones y la respuesta táctil. Además, se observó que la vibración a diferentes frecuencias tenía efectos en el cuerpo, provocando tanto contracciones involuntarias como relajación en los músculos. Es importante destacar que estos efectos fueron inmediatos pero temporales, lo que sugiere que la aplicación controlada de vibraciones podría tener beneficios terapéuticos o recreativos en distintos contextos. Estos hallazgos abren nuevas oportunidades para la investigación y el desarrollo de tecnologías que utilicen la vibración como un medio para interactuar con el cuerpo humano de manera específica y precisa.

Recomendaciones

- Se recomienda realizar las diferentes simulaciones con software para tener una visión más clara del funcionamiento del proyecto en diversas situaciones. Esto ayuda a mejorar la planificación y el diseño antes de la implementación, lo que aumenta las probabilidades de éxito.
- Se sugiere realizar una calibración del dispositivo antes de que un nuevo usuario lo utilice. Esto se debe a que los diagnósticos de los pacientes varían, y cada individuo presenta un rango de movilidad distinto. En consecuencia, se requiere ajustar la sensibilidad del sensor de navegación para adecuarlo a las necesidades específicas de cada usuario y garantizar un funcionamiento óptimo del dispositivo.
- Se recomienda ejecutar el programa de entorno virtual en una computadora con una capacidad de memoria RAM de al menos 8 GB. Esto se debe a que una cantidad menor de memoria podría ocasionar problemas y afectar la fluidez de los movimientos dentro del entorno virtual. Mantener el sistema con una capacidad de 8 GB de RAM o superior garantizará un rendimiento óptimo y una experiencia más fluida en el uso del entorno.
- Para futuros trabajos, se recomienda implementar una estructura ergonómica que brinde apoyo a la mano mientras se realizan los movimientos con el dedo. Esto se debe a que después de un largo período de uso, el usuario puede experimentar fatiga en la muñeca. Al proporcionar un soporte adecuado para la mano durante la interacción, se busca reducir la tensión y el esfuerzo físico que podría generar el uso continuo del dispositivo.

REFERENCIAS

- [1] Aguilar, C. R., & Huamaní, A. R. (2017). DESARROLLO DE LA HABILIDAD MOTRIZ FINA EN LOS NIÑOS Y NIÑAS DE 5 AÑOS DE LA INSTITUCIÓN EDUCATIVA N° 270 DE HUAYTARÁ-HUANCAVELICA. Repositorio Institucional Digita, unh.
- [2] Angarita, R., & Castañeda, G. (2017). Uso de dispositivos móviles en fisioterapia. Revista Scielo. cuba. inf. cienc. salud vol.28 no.2.
- [3] Brizuela, M. A., & Soto, Y. H. (2010). Diseño de un Equipo Auxiliar en Terapias de Rehabilitación de Extremidades de Miembro Superior a Nivel de Dedos. CENIDET. Tecnológico nacional de México.
- [4] Collado, V. S. (2002). ANÁLISIS DE LA MARCHA HUMANA CON PLATAFORMAS DINAMOMÉTRICAS. INFLUENCIA DEL TRANSPORTE DE CARGA. UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID.
- [5] García, C. F. (2010). LA TECNOLOGÍA "su conceptualización y algunas reflexiones con respecto a sus efectos". Revista de la Asociación Mexicana de Metodología de la Ciencia y de la Investigación, A.C.
- [6] Martínez, P. M. (2018). Realidad virtual en la rehabilitación motora de la mano en pacientes postictus. Revista Cubana de Medicina Física y Rehabilitación, <https://www.medigraphic.com/pdfs/revcubmedfisreah/cfr-2018/cfr182g.pdf>.

- [7] OECD, O. P. (2002). Manual de Frascati: Propuesta de norma práctica para encuestas de investigación y desarrollo. FECYT, Fundación española ciencia y tecnología. Obtenido de <https://www.unae.edu.py/cidunae/images/Manual-de-Frascati.pdf>
- [8] Ramos, M. J., & Mendoza, D. K. (2015). Sistema háptico para el posicionamiento de objetos. INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL.
- [9] MSD, M. (2023). Figure: Los impulsos nerviosos y la médula espinal - Manual MSD versión para público general.
- [10] Touch. [Online]. Available: <https://www.3dsystems.com>
- [11] High Definition Haptic Device. [Online]. Available: <https://www.quanser.com>
- [12] Omega 3. [Online]. Available: <https://www.forcedimension.com>
- [13] Hi5 VR. [Online]. Available: <https://www.noitom.com>
- [14] E. Aribau. (2022, Jun 18). Motricidad fina. Actividades y ejercicios. [Online]. Available: <https://www.elisaribau.com>
- [15] I. Pascual, "*Síndrome de déficit de atención/hiperactividad*", 4ª ed. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2009, pp. 150-180.
- [16] A. Ruiz, I. Ruiz, "*Madurez psicomotriz en el desenvolvimiento de la motricidad fina*", 1ª ed. Ecuador: Editorial Grupo Compás, 2017, pp. 10-20.
- [17] A. Kapandji, "*Fisiología articular*", 6ª ed. Madrid, España: Editorial médica Panamericana, 2006, pp. 195-197.
- [18] E. Rocha, J. Lara, P. Gómez, "*Estética de manos y pies*", 1ª ed. Editorial McGraw Hill, 2012, pp. 7-28.

- [19] J. Brito, M. Quinde, J. Cuzco, "*DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PRÓTESIS BIOMECÁNICA DE MANO DERECHA*", tesis, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, EC, 2013.
- [20] Y. Rojas. (2022 Sep 09). Ejercicios para fortalecer las manos y los dedos. [Online]. Available: <https://www.fisioterapia-online.com>
- [21] T. Ricarte, M. García. (2021). Recomendaciones generales para la realización de ejercicios de rehabilitación. [Online]. Available: <https://svmeifr.com>
- [22] M. Cabeza, A. Lozada, M. Pérez, J. Pérez, G. Romero, L. Sánchez, C. Ruiz, y C. Torner, "*Biología de los sistemas sensoriales: El Tacto*", 1ª ed. México: Casa Abierta al Tiempo, 2018, pp. 41-50.
- [23] Bimedica. (2019). Todo lo que tienes que saber sobre la piel - ABS Biomédica [Online]. Available: <https://abs.bimedica.com>
- [24] P. López, "Estimulador de nervios periféricos: Método alternativo de neuro localización de plexos nerviosos en anestesia regional", *Revista médica de hospital general de México*. vol. 71, pp. 103-108, junio 2008.
- [25] Electro estimulador lanaform [Online]. Available: <https://www.medigraphic.com>
- [26] L. Llopéz, "Efecto de la vibración como tratamiento de la extremidad superior espástica en pacientes post-ictus subagudos combinada con la realización de actividades instrumentales diarias" M.S. tesis, Universidad Autónoma de Barcelona, España, 2019.
- [27] V. Toribio, A. Torronteras, "Introducción a la háptica. Nuevos dispositivos de entrada y salida " Ing. Tesis, Universidad Politécnica de Catalunya, España, 2015.

- [28] G. Shankar, Y. Maddahi, K. Zareinia, " Una revisión basada en aplicaciones de la tecnología háptica ", *Robotics*, pp. 5 -18, febrero 2021.
- [29] A. Silva, L. Gonzáles, M. Ofritz, " Uso del sistema háptico con fines en el área de evaluación, rehabilitación y diagnóstico motriz en miembros superiores ", *Temas de ciencia y tecnología*, vol. 8, no. 53, pp. 19 - 29, agosto 2014.
- [30] Haptic Glove. [Online]. Available: <https://xtensor.com>
- [31] G. M. Álvarez, " ETNOGRAFÍA VIRTUAL: EXPLORACIÓN DE UNA OPCIÓN METODOLÓGICA, *eav*, vol. 3, no. 6, pp. 1-31, junio 2009
- [32] M. Rojas, " Tipos de Investigación científica: Una simplificación de la complicada incoherente nomenclatura y clasificación ", *REDVET*, vol. 16, no. 1, pp. 1-14, 2015.
- [33] J. P. Calemin, " El proceso analítico jerárquico en el marco de la evaluación multicriterio: Un análisis comparativo ", *GEOSIC*, no. 6, pp.47 - 63, diciembre 2014.
- [34] Matriz de ponderación. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/428487846/Matriz-de-Ponderacion>
- [35] Catalog No. MA 02062-9106, ADXL335, Analog Devices Inc, Norwood, USA.
- [36] Proyecto Arduino. Arduino Pro Mini. [Online]. Available: <https://proyectoarduino.com/arduino-pro-mini>
- [37] R. Suárez. (2015, Jun, 03). ARDUINO. [Online]. Available: <https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/rsuagued/arduino/>
- [38] "Coin vibration Motor". [Online]. Available: <https://www.ineed-motor.com/vibration-motor/coin-vibration-motor/coin-vibration-motors.html>

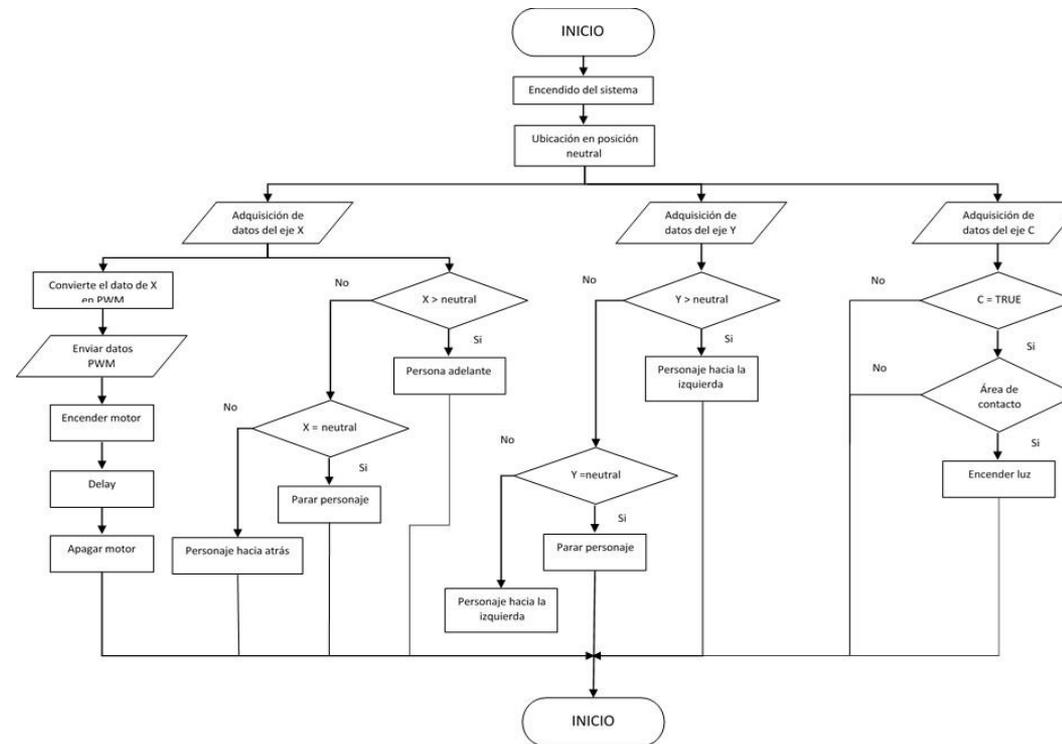
- [39] Itead Studio. (2010, Jun, 06). HC-05 Bluetooth to Serial Port Module .[Online]. Available: https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/HC05%20Datasheet.pdf
- [40] T. School. (2020, Mar, 2020), Requisitos de Unreal Engine. Un motor Gráfico Impresionante. [Online]. Available: <https://www.tokioschool.com/noticias/requisitos-unreal-engine-motor-grafico-impresionante/>

ANEXOS

Anexo 1: Diagrama de flujo del funcionamiento del dispositivo

Figura 1

Diagrama de flujo



Anexo 2: Código de programación de Arduino

```
#include <Arduino.h>

#include "avdweb_VirtualDelay.h"

VirtualDelay delay1, delay2, delay3, delay4;

int pinX = A1, pinY = A2, pinZ = A0;

int btn = 2;

int motor = 3;

int mpwm = 255;

int led = 13;

int tolerancia = 15;

/*int vmin = 200, vmax = 450, accion = 445;

int ymin = 300, ymax = 450;

int zmin = 460, zmax = 475;

int neutral = 380, neutralY = 400, neutralZ = 465;

*/

int vmin = 290, vmax = 385, accion = 385;

int ymin = 295, ymax = 390;

int zmin = 460, zmax = 475;

int neutral = 330, neutralY = 347, neutralZ = 300;

bool romper = 0;
```

```
void setup () {  
  Serial.begin(9600);  
  Serial.setTimeout(5);  
  pinMode (btn, INPUT_PULLUP);  
  pinMode (led, 1);  
  digitalWrite (led, 0);  
  
  pinMode (motor, 1);  
  analogWrite (motor, mpwm);  
  delay(100);  
  analogWrite(motor, 0);  
  
  /*neutral = LeerSensor(pinX, 100);  
  neutralY = LeerSensor(pinY, 100);  
  neutralZ = LeerSensor(pinZ, 100);  
  accion = neutral + 45;*/  
  
  if (digitalRead(btn)) {  
    while (1) {  
      Configuracion();  
      if (romper ) {  
        break;  
      }  
    }  
  }
```

```
    }  
  }  
  
}  
  
void loop() {  
  //PruebaAcc() ;  
  Configuracion();  
  String y = ComunicacionSerial() ;  
  String x = "";  
  int val = LeerSensor(pinX, 100);  
  
  x = Acelerometro();  
  //Serial.println(x + " " + String(val));  
  ControlBtn();  
  //Vibration(val); vibracion modo 1  
  Vibrador();//modo dos  
  Actuar(val);  
}  
  
//int vmin = 290, vmax = 385;  
int escmin = 0, escmax = 8;
```

```
int val = 0;

int Val() {

    val = LeerSensor(pinX, 500);

    val = map(val, vmin, vmax, escmin, escmax);

    val = map(val, escmin, escmax, 0, 255);

    return val;

}

unsigned long t = 0, t1;

bool sw = 0;

void Vibration(int val, bool stb) {

    if (val > (neutral - tolerancia) && val < (neutral + tolerancia)) {

        t = millis();

        sw = 0;

    }

    if (val > (accion) && sw == 0) {

        Accion();

        sw = 1;

        t1 = millis() - t;

        mpwm = map(t1, 1000, 50, 75, 255);

        mpwm = LimitarPwm(mpwm);

        int retardo = map(mpwm, 0, 255, 50, 1000);
```

```
Serial.println(mpwm);

analogWrite(motor, mpwm);

delay(retardo);

mpwm = 0;

analogWrite(motor, mpwm);

}

}

int LimitarPwm(int pw) {

    if (pw < 0) {

        return 0;

    }

    if (pw > 255) {

        return 255;

    }

    return pw;

}

double LeerSensor(int analogPin, int muestreo) {

    double sumatoria = 0;

    for (int i = 0; i < muestreo; i++) {

        sumatoria += analogRead(analogPin);

    }

}
```

```

return sumatoria / muestreo;

}

/*****primitivas*****/

int state = 0, stateb = 0;

String Acelerometro() {

String x = "";

int factor = 30;

state = 0;

if ((LeerSensor(pinX, 100) > vmin) && (LeerSensor(pinX, 100) < (neutral + tolerancia))) {

x = "subiendo";

state = 1;

}

if ((LeerSensor(pinX, 100) > (neutral - tolerancia)) && (LeerSensor(pinX, 100) < (neutral +
tolerancia))) {

x = "neutral";

state = 2;

}

if ((LeerSensor(pinX, 100) > (neutral + tolerancia)) && (LeerSensor(pinX, 100) < vmax)) {

x = "bajando";

```

```
state = 3;

}

if (LeerSensor(pinY, 100) > ymin && LeerSensor(pinY, 100) < (neutralY - factor) ) {

    state = 4;

    x = "derecha";

}

if (LeerSensor(pinY, 100) < ymax && LeerSensor(pinY, 100) > ( neutralY + factor)) {

    state = 5;

    x = "izquierda";

}

stateb = state;

switch (state) {

case 2: Neutral();

    break;

case 1: Atras();

    break;

case 3: Adelante();

    break;

case 4: Derecha();

    break;

case 5: Izquierda();
```

```
        break;

    }

    delay(25);//indispensable

    return x;

}

void PruebaAcc() {

    while (1) {

        Serial.print("data ");

        Serial.print("x ");

        Serial.print( LeerSensor(pinX, 100));

        Serial.print(" y ");

        Serial.print( LeerSensor(pinY, 100));

        Serial.print(" z ");

        Serial.print( LeerSensor(pinZ, 100));

        Serial.println();

    }

}

void Neutral() {

    Serial.println("null,0");

    digitalWrite(led, 1);

}
```

```
void Adelante() {  
    Serial.println("a,1");  
    digitalWrite(led, 0);  
}  
  
void Atras() {  
    Serial.println("a,-1");  
    digitalWrite(led, 0);  
}  
  
void Izquierda() {  
    Serial.println("b,1");  
    digitalWrite(led, 0);  
}  
  
void Derecha() {  
    Serial.println("b,-1");  
    digitalWrite(led, 0);  
}  
  
void Accion() {  
    Serial.println("c,1");  
    digitalWrite(led, 0);  
}  
  
String ComunicacionSerial() {  
    String x = "";
```

```
if (Serial.available()) {  
    x = Serial.readStringUntil('\n');  
    x.trim();  
    Serial.println("FromSerial " + x);  
  
    return x;  
}  
}  
  
void Retornar() {  
    Neutral();  
    while (1) {  
        Serial.println("c,-1");  
        String x = ComunicacionSerial();  
        if (x == "confirno") {  
            //delay(1000);  
            break;  
        }  
    }  
}  
  
void ControlBtn() {  
    int ruido = 150;  
    bool retornar = digitalRead(btn);
```

```
if (retornar) {  
    Retornar();  
  
}  
  
}  
  
unsigned long tcnfg = 0;  
  
int menu = 0;  
  
int ruido = 500;  
  
void Configuracion() {  
    if (digitalRead(btn)) {  
        tcnfg++;  
    }  
  
    if (tcnfg > 200) {  
        Zero();  
  
        Serial.println("modo configuracion activado");  
  
        tcnfg = 0;  
  
        while (digitalRead(btn));  
  
        delay(ruido);  
  
        while (1) {  
            if (digitalRead(btn)) {  
                while (digitalRead(btn));  
            }  
        }  
    }  
}
```

```
    delay(ruido);

    menu++;

    Serial.println(menu);

}

if (menu > 6) {

    menu = 0;

    Serial.println("ha salido de configuraciÃ³n");

    romper = 1;

    break;

}

Menu(menu);

}

}

void Menu(int menu) {

    if (menu == 1) {

        int v = LeerSensor(pinX, 500);

        Serial.print("calibrando maxX ");

        Serial.println(v);

        if (v > vmax) {
```

```
    vmax = v;
  }
}

if (menu == 2) {
  int v = LeerSensor(pinX, 500);
  Serial.print("calibrando minX ");
  Serial.println(v);
  if (v < vmin) {
    vmin = v;
  }
}

if (menu == 3) {
  int v = LeerSensor(pinY, 500);
  Serial.print("calibrando maxY ");
  Serial.println(v);
  if (v > ymax) {
    ymax = v;
  }
}

if (menu == 4) {
  int v = LeerSensor(pinY, 500);
  Serial.print("calibrando minY ");
  Serial.println(v);
```

```
if (v < ymin) {  
    ymin = v;  
}  
  
}  
  
if (menu == 5) {  
    int v = LeerSensor(pinX, 500);  
  
    int w = LeerSensor(pinY, 500);  
  
    Serial.print("calibrando neutrales ");  
  
    Serial.print(v);  
  
    Serial.print(" y ");  
  
    Serial.println(w);  
  
    digitalWrite(led, 1);  
  
    neutral = v;  
  
    neutralY = w;  
  
}  
  
if (menu == 6) {  
    int v = LeerSensor(pinX, 500);  
  
    Serial.print("calibrando accion ");  
  
    Serial.println(v);  
  
    accion = v;  
  
    digitalWrite(led, 0);  
  
}
```

```
}  
  
void Zero() {  
    vmax = 0;  
    vmin = 1024;  
    ymax = 0;  
    ymin = 1024;  
}  
  
bool swv = 0, swv1 = 0, swv2 = 0, swv3 = 0;  
  
int aux = 0;  
  
int vAnterior = 0;  
  
void Vibrador() {  
    if (!swv) {  
        aux = Val();  
        //Serial.println(aux);  
    }  
  
    if (vAnterior != aux && swv == 0) {  
        swv1 = 1;  
    }  
  
    if (swv1) {  
        delay1.start(10);  
        if (delay1.elapsed()) {
```

```
    aux = Val();  
    vAnterior = aux;  
    //Serial.println(vAnterior);  
    analogWrite(motor, vAnterior);  
    swv1 = 0;  
    swv2 = 1;  
  }  
}  
if (swv2) {  
  delay2.start(500);  
  if (delay2.elapsed()) {  
    analogWrite(motor, 0);  
    swv2 = 0;  
    swv3 = 1;  
  }  
}  
if (swv3) {  
  delay3.start(1000); //este delay restablece el nivel de voltaje para q no falle lectura en  
acelerometro  
  if (delay3.elapsed()) {  
    aux = Val();  
    vAnterior = aux;  
    //Serial.println(vAnterior);
```

```
    swv3 = 0;

    swv = 0;

}

}

}

//unsigned long t = 0, t1;

bool swa = 0;

void Actuar(int val) {

    if (val > (neutral - tolerancia) && val < (neutral + tolerancia)) {

        //t = millis();

        swa = 0;

    }

    if (val > (accion) && swa == 0) {

        Accion();

        swa = 1;

        //t1 = millis() - t;

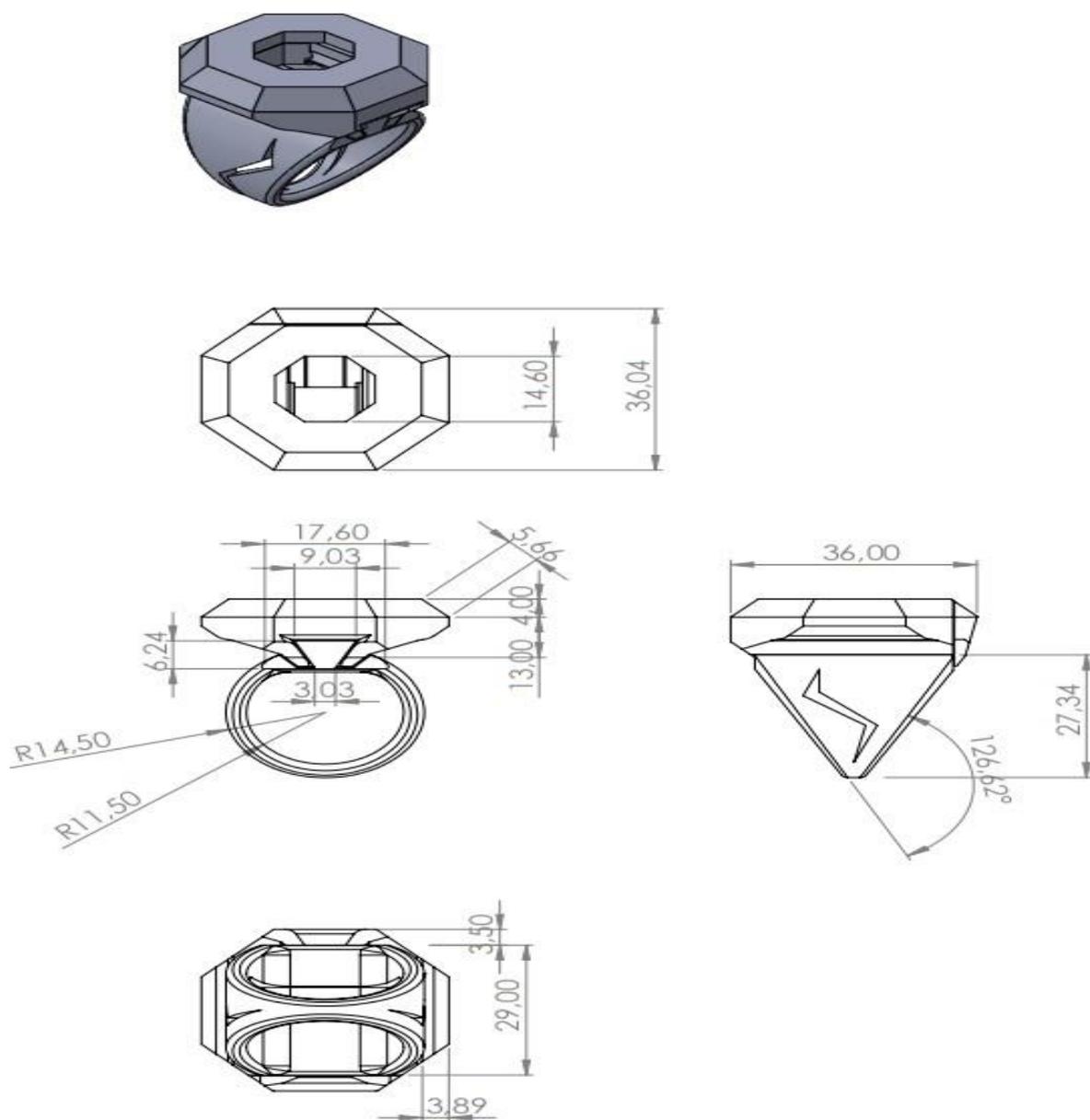
        // mpwm = map(t1, 1000, 50, 75, 255);

        //mpwm = LimitarPwm(mpwm);

        // int retardo = map(mpwm, 0, 255, 50, 1000);

        //Serial.println(mpwm);
```

```
//analogWrite(motor, mpwm);  
  
//delay(retardo);  
  
//mpwm = 0;  
  
//analogWrite(motor, mpwm);  
  
}  
  
}
```

Anexo 3: Dimensiones del anillo del dispositivo**Figura 2***Dimensiones del anillo*

Anexo 4: Dimensiones de la estructura protectora de la placa PCB**Figura 3***Dimensiones de la estructura*