



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y PRODUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TEMA:

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE INTERFAZ HÁPTICA
PARA APLICACIONES DE RETROALIMENTACIÓN VIBROTÁCTIL**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Industrial bajo la modalidad propuesta metodológica

Autor

Kevin Alexander Dávila Cárdenas

Tutor

Ing. Remache Vinueza Byron Paul

QUITO – ECUADOR
2023

**AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL AUTOR PARA LA CONSULTA,
REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL
TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo Kevin Alexander Dávila Cárdenas, declaro ser autor del Trabajo de Titulación con el nombre “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE INTERFAZ HÁPTICA PARA APLICACIONES DE RETROALIMENTACIÓN VIBROTÁCTIL como requisito para optar al grado de INGENIERO INDUSTRIAL y autorizo al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica Indoamérica, para que con fines netamente académicos divulgue esta obra a través del Repositorio Digital Institucional (RDI-UTI).

Los usuarios del RDI-UTI podrán consultar el contenido de este trabajo en las redes de información del país y del exterior, con las cuales la Universidad tenga convenios. La Universidad Tecnológica Indoamérica no se hace responsable por el plagio o copia del contenido parcial o total de este trabajo.

Del mismo modo, acepto que los Derechos de Autor, Morales y Patrimoniales, sobre esta obra, serán compartidos entre mi persona y la Universidad Tecnológica Indoamérica, y que no tramitaré la publicación de esta obra en ningún otro medio, sin autorización expresa de la misma. En caso de que exista el potencial de generación de beneficios económicos o patentes, producto de este trabajo, acepto que se deberán firmar convenios específicos adicionales, donde se acuerden los términos de adjudicación de dichos beneficios.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Quito, a los 23 días del mes de enero del 2023, firmo conforme:

Autor: Kevin Alexander Dávila Cárdenas

Firma: 

Número de Cédula:1718815788

Dirección: Pichicha, Quito, Chimbacalle, PIOXII.

Correo Electrónico:

kevindavila2007@hotmail.com

Teléfono:0987544554

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE INTERFAZ HÁPTICA PARA APLICACIONES DE RETROALIMENTACIÓN VIBROTÁCTIL presentado por Kevin Alexander Dávila Cárdenas para optar por el Título de Ingeniero Industrial,

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y considero que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del Tribunal Examinador que se designe.

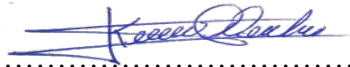
Quito, 23 de enero del 2023

.....
Ing. Remache Vinueza Byron Paul

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Quien suscribe, declaro que los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, como requerimiento previo para la obtención del Título de Ingeniero Industrial, son absolutamente originales, auténticos y personales y de exclusiva responsabilidad legal y académica del autor.

Quito, 23 de enero del 2023



.....
Kevin Alexander Dávila Cárdenas
(1718815788)

APROBACIÓN TRIBUNAL

El trabajo de Titulación, ha sido revisado, aprobado y autorizada su impresión y empastado, sobre el Tema: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE INTERFAZ HÁPTICA PARA APLICACIONES DE RETROALIMENTACIÓN VIBROTÁCTIL previo a la obtención del Título de Ingeniero Industrial, reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la sustentación del trabajo de titulación.

Quito,01 de febrero de 2023

.....
Ing. Fabián Sarmiento
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

.....
Ing. Liliana Topón
VOCAL

.....
Ing. Joel Segura
VOCAL

DEDICATORIA

Dedico este significativo presente con todo cariño transformado en laureles y coronado con las rosas del saber, a mi madre, a mi esposa y a mi tío que solo vieron en mí el agradecimiento día a día con el único propósito de verme siempre en el pedestal del bien y la felicidad. Agradezco por todo esto y pido al Ser Supremo que les de muchos años de vida y felicidad.

Kevin D

AGRADECIMIENTO

Al terminar una etapa más de mi vida me alejo de la Universidad Técnica Indoamérica y de mis compañeros a quienes solo en el recuerdo los llevare grabados.

A mis nobles Maestros.

A todos mis Nobles Maestros agradezco por todos sus conocimientos científicos que he recibido haciendo de mí una persona útil para la sociedad y la patria.

Gracias por tan noble gesto.

Kevin D

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PORTADA.....	i
AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL AUTOR PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	iii
CERTIFICO	iii
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD.....	iv
APROBACIÓN TRIBUNAL	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
RESUMEN EJECUTIVO	xiv
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES.....	4
JUSTIFICACIÓN	11
OBJETIVOS	13
General	13
Específicos	13
CAPÍTULO II	14
MARCO TEÓRICO.....	14
Percepción.....	14

Giro y sustitución sensorial.....	14
Retroalimentación vibrotáctil.....	15
TIPOS DE MOTORES VIBROTÁCTILES.....	16
Motores rotativos con masa excéntrica (ERM por sus siglas en inglés Eccentric Rotating Mass)	16
Actuador por resonancia lineal (LRA, por sus siglas en inglés Linear Resonant Actuador)	17
Actuadores de imán móvil o bobina de voz (VCA, por sus siglas en inglés Voice Coil Actuator)	18
Actuador piezoeléctrico	19
ÁREA DE ESTUDIO	20
CAPÍTULO III.....	22
DESARROLLO DE LA PROPUESTA.....	22
Criterio de diseño	22
Diseño de la carcasa	22
Diseño de soporte de carcasa	23
Selección de material	23
Fibra de carbono.....	24
Aluminio	25
Plástico PLA	25
Plástico ABS	26
Plástico TPU	26
Modelado 3D.....	31
Actuador Vibrotáctil	32
Modelo de carcasa y tapa	32
ESP8266: módulo WIFI para Arduino.....	35
Mini modulo MP3 (MP3-TF-16P).....	35

Modulo amplificador de audio Digital (TPA 3116D2).....	36
Validación del prototipo.....	37
Hipótesis.....	37
Plataforma Experimental.....	37
Retroalimentación vibrotáctil.....	37
Soporte de actuador.....	37
Interfaz vibrotáctil.....	42
Phantom motion	44
Cutaneous rabbit	44
Funneling	45
Retroalimentación visual.....	46
Retroalimentación auditiva	46
Bicicleta estática con sistema de fuerza y retroalimentación vibrotáctil	46
Estímulos.....	47
Procedimiento Experimental.....	48
Participantes	48
Sesión de Práctica	48
Sesión Experimental	50
RESULTADOS.....	51
ANÁLISIS DE COSTOS.....	56
CAPÍTULO IV.....	59
CONCLUSIONES	59
RECOMENDACIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de materiales para fabricación del actuador y soporte.....	24
Tabla 2 Criterios para determinar prioridad de diseño del actuador.....	27
Tabla 3 Priorización de criterios para selección de elementos	28
Tabla 4 Evaluación Durable vs Alternativas	29
Tabla 5 Evaluación Económico vs Alternativas	29
Tabla 6 Evaluación Ligero vs Alternativas.....	30
Tabla 7 Evaluación reciclable vs Alternativas.....	30
Tabla 8 Evaluación Resistente vs Alternativas.....	30
Tabla 9 Evaluación flexible vs Alternativas	31
Tabla 10 Matriz final de priorización	31
Tabla 11 Lista de partes y sus dimensiones	34
Tabla 12 Criterios para determinar prioridad de diseño del soporte del actuador	38
Tabla 13 Priorización de criterios para selección de elementos	39
Tabla 14 Evaluación Durable vs Alternativas	40
Tabla 15 Evaluación Económico vs Alternativas	40
Tabla 16 Evaluación Ligero vs Alternativas.....	40
Tabla 17 Evaluación flexible vs Alternativas	41
Tabla 18 Matriz final de priorización	41
Tabla 19 Parámetros de ilusiones táctiles.	45
Tabla 20 Ilusiones táctiles.....	47
Tabla 21 Prueba T de Wilcoxon	54
Tabla 22 Cronograma de implementación de la propuesta.....	55
Tabla 23 Costos de materiales de la interfaz	56
Tabla 24 Materiales para carcasa de sistema Voice-Coil.	57
Tabla 25 Costos de importación	58
Tabla 26 Costos de fabricación de actuadores e interfaz.....	58
Tabla 27 Costos de importación de actuadores e interfaz.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Receptores de la piel	2
Figura 2	Dispositivo portátil vibrotáctil.....	4
Figura 3	Sistema vibrotáctil.....	5
Figura 4	Robot planar.	6
Figura 5	Situación de peligro de proximidad de un auto	7
Figura 6	Telesimulación desde el Hospital San Vicente en Medellín	9
Figura 7	Sistema vibratorio.....	9
Figura 8	Motores de vibración ERM	16
Figura 9	Actuador de resonancia lineal	18
Figura 10	Bobina móvil o imán móvil.....	18
Figura 11	Actuador piezoeléctrico.....	20
Figura 12	Modelo operativo para el diseño de la propuesta.. ..	21
Figura 13	Cilindros de fibra de carbono.	25
Figura 14	Cilindro de aluminio.....	25
Figura 15	Característica de deformación del TPU.....	27
Figura 16	Conector de audio monofónico hembra de 3.5mm instalado en el actuador.....	32
Figura 17.	Modelo e impresión 3D (a) y (b) que indican el diseño de carcasas y tapa, en el literal (c) los mismos elementos impresos en ABC.....	32
Figura 18	Partes de la carcasa del actuador con el conector de audio monofónico hembra de 3.5mm.....	33
Figura 19	Modulo WIFI para arduino.....	35
Figura 20	Modulo MP3.....	35
Figura 21	Modulo amplificador	36
Figura 22	Placa electrónica.....	36
Figura 23	Diseño de soporte para el actuador.....	38
Figura 24	Diagrama de flujo.	43
Figura 25	Phanton motion reproducidas en Audacity r.	44
Figura 26	Cutaneous rabbit reproducido en Audacity.	44
Figura 27	Funneling reproducido en Audacity.	45
Figura 28	Plataforma experimental.....	46
Figura 29	Volante con actuadores vibro táctiles.....	47

Figura 30 Participante en sesión de práctica sujetando los actuadores vibrotáctiles con las manos, usando orejeras para bloquear los estímulos auditivos y cerrando los ojos para bloquear los estímulos visuales y favorecer la concentración .	49
Figura 31 Claridad de percepción de las ilusiones táctiles .	49
Figura 32 Moda de dirección.	51
Figura 33 Moda de intensidad.....	52
Figura 34 Nivel de claridad FN y PN	52
Figura 35 Moda de distracción..	53
Figura 36 Nivel de Distracción FN y PM.	53

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Registro fotográfico.....	68
Anexo 2 Cuestionarios.....	69
Anexo 3 Código de programación.....	77
Anexo 4 Planos.....	82

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA FACULTAD DE
INGENIERÍA, INDUSTRIA Y PRODUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE INTERFAZ
HÁPTICA PARA APLICACIONES DE RETROALIMENTACIÓN VIBROTÁCTIL**

AUTOR: Kevin Alexander Dávila Cárdenas

TUTOR: Ing. Remache Vinueza Byron Paul

RESUMEN EJECUTIVO

En este trabajo de titulación se propone la construcción de un prototipo de interfaz háptica para aplicaciones de retro alimentación vibrotáctil mediante técnicas de prototipado rápido, diseño y manufactura. El reto principal para este desarrollo es el lograr que las señales transmitidas sean claras para el usuario a través del prototipo y a la vez que éste cumpla con otros requisitos como resistencia, comodidad, accesibilidad y bajo costo. En desarrollos anteriores se han diseñado interfaces con similares prestaciones a las que ofrece el presente proyecto, pero utilizando actuadores comerciales que son de difícil adquisición y de costo elevado, cuyo diseño no es modular y por lo tanto resulta ser poco flexible. Por el contrario, en este proyecto se propone un diseño de carcasa para el actuador en forma de pila que facilita el diseño y ensamblaje de la interfaz de acuerdo con la aplicación. La metodología consistió en el diseño del prototipo en software CAD y su construcción con impresión 3D junto con el montaje de una interfaz háptica. El sistema en conjunto fue validado a través de un experimento con aplicación en movilidad urbana con pruebas psicofísicas para las ilusiones táctiles “Phantom Motion”, “Funneling” y “Cutaneous Rabbit”. Los resultados sugieren que hay una mejora en la interpretación correcta de las señales por parte del participante debido a la incorporación de ilusiones táctiles, específicamente con mejores resultados para las mismas “Phantom Motion” y “Funneling”. Adicionalmente, el prototipo desarrollado es replicable haciendo uso de métodos de manufactura aditiva a costos inferiores de otros similares en el mercado.

Descriptor: Vibrotáctil, háptica, movilidad urbana, prototipado rápido y manufactura aditiva

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA FACULTAD DE
INGENIERÍA, INDUSTRIA Y PRODUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**TEMA: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A HAPTIC INTERFACE
PROTOTYPE FOR VIBROTACTILE FEEDBACK APPLICATIONS**

AUTOR: Kevin Alexander Dávila Cárdenas

TUTOR: Ing. Remache Vinueza Byron Paul

ABSTRACT

In this project we propose the construction of a haptic interface prototype for vibrotactile applications using rapid prototyping, design, and manufacturing techniques. The main challenge is to achieve a prototype that transmits clear signals so they can be correctly understood by the end-user and to meet other design requirements such as strength, comfort, accessibility, and low cost. In previous developments, interfaces with similar features to those offered by this project have been designed, but using commercial actuators that are difficult to acquire and expensive, and whose design is not modular and therefore turns out to be inflexible. On the contrary, in this project a battery-shaped casing design for the actuator is proposed that facilitates the design and assembly of the interface according to the application. The methodology consisted in the design of the prototype in CAD and its construction with 3D printing together with the assembly of a haptic interface; the whole system was validated in an experiment with application in urban mobility by means of psycho-physical tests for the tactile illusions “Phantom Motion”, “Funneling” and “Cutaneous Rabbit”. The results suggest a better interpretation of the signals by the participant for “Phantom Motion” and “Funneling” illusions. In addition, the prototype can be easily replicated using additive manufacturing and at lower costs than other similar devices found on the market.

Keywords: Vibrotactile, haptics, urban mobility, rapid prototyping and additive manufacturing

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El ser humano puede realizar actividades en diferentes situaciones gracias a la información que recibe a través de los sentidos: vista, oído, tacto, gusto y olfato. Si aislamos alguno de los sentidos, el cerebro interactúa con su entorno a través de los sentidos que están aún activos y se procesarán estas señales transportadas por el sistema nervioso que está interconectado por todo el cuerpo (Depetris Chauvin, 2018).

De manera específica, el tacto experimenta a través de la piel las sensaciones, tomando en cuenta que es el órgano más grande del cuerpo humano junto con sus derivados como cabello y uñas conformando el sistema tegumentario, el cual representa el 15% de peso del cuerpo y una superficie promedio de contacto de 1.8m² que constituye del 16% al 18% del cuerpo humano (Paiba Diaz, 2020).

En este contexto se manifiesta que hay un enorme potencial de comunicación con el entorno por este medio. El mismo órgano sensorial permite captar, procesar y sentir principalmente tres fenómenos: presión, dolor y temperatura (Paiba Diaz, 2020).

Estas sensaciones se perciben a través de una red de receptores repartidos por todo el cuerpo ya que diferentes órganos contienen células dedicadas a este tipo de percepción sensorial tales como los mecanoreceptores, el corpúsculo de Meisseiner, el corpúsculo de Pacini, las Terminaciones de Rufino, los receptores de Merkel, que se muestran en la figura 1.

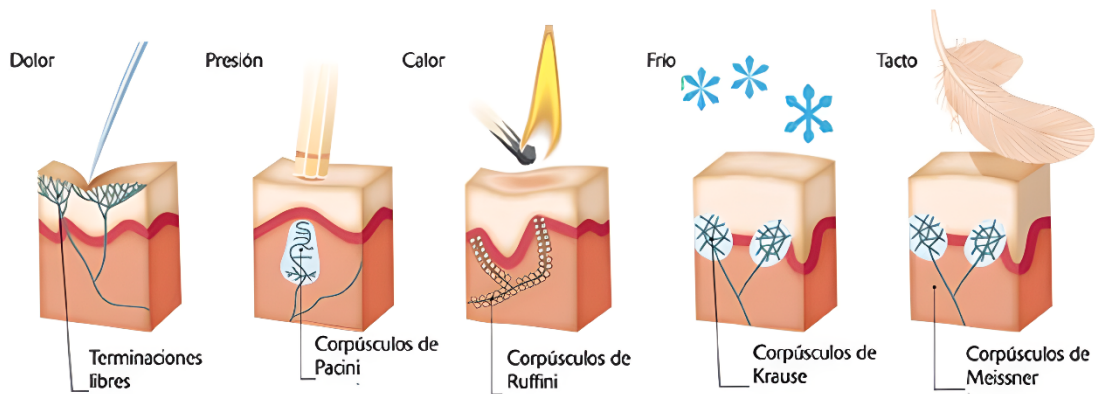


Figura 1 *Receptores de la piel* Fuente. *Adaptado de El tacto. Tocar y sentir, por Universidad autónoma de Chile, 2021, Vega, José, <https://repositorio.uautonoma.cl/handle/20.500.12728/8689/>.*

Las terminaciones nerviosas simples, los receptores de los folículos pilosos en la piel y los termo receptores, cualquiera de estos se activa al recibir un estímulo físico. Una vez que reciben la información envían señales eléctricas a través de las fibras nerviosas hacia el sistema nervioso central, donde son procesadas e interpretadas por el cerebro (Irusta, 2017).

La háptica es la ciencia y tecnología del sentido del tacto, que se enfoca en transmitir y comprender información a través de estímulos táctiles. Una interfaz háptica es un sistema que utiliza esta tecnología para proporcionar retroalimentación al usuario a través de dispositivos mecánicos y electrónicos (Blenkinsopp, 2019).

Una de las formas de lograr una mejor respuesta de una interfaz háptica es sincronizando estímulos visuales y auditivos, ya que el cerebro recoge la información otorgada por los sentidos de la vista, oído y el tacto para proporcionar información sobre objetos y eventos (Slawiński et al., 2018).

Los dispositivos hápticos, gracias al continuo avance tecnológico, hacen uso de herramientas cada vez más novedosas como guantes y chalecos con vibraciones que están siendo utilizados en tecnología de realidad virtual. Este tipo de tecnología permite explorar escenarios simulados para realizar tareas específicas, al proporcionar la posibilidad de interactuar con medios virtuales, generando una transferencia bidireccional de información en tiempo real entre el usuario y el sistema (Cruz Sánchez, 2017).

Adicionalmente, los campos de aplicación de estos dispositivos son de una amplia gama desde la medicina hasta el entretenimiento pasando por aplicaciones educativas e industriales. Estas serán explicadas en detalle en el capítulo 2 correspondiente a los antecedentes (Choi y Kuchenbecker, 2019)

Todos estos desarrollos implican que, dependiendo de la aplicación, es necesario un diseño específico para cada dispositivo háptico por lo que los procesos de manufactura tradicionales significan costos elevados y poca flexibilidad para el diseño, haciendo que sean también de difícil adquisición y limitando así su potencial (Cruz Sánchez, 2017).

El desarrollo de la propuesta y los resultados se explicarán en el capítulo 3, en la medida de que en este trabajo de tesis se utiliza software CAD para el diseño e impresión 3D para la construcción de dispositivos hápticos, con funcionalidad vibrotáctil mediante el prototipado de un dispositivo que fue sometido a una prueba de funcionamiento.

ANTECEDENTES

En los años del 2018 al 2022 empresas como Artemar Group, Xataka y Pfizer se han arriesgado a desarrollar procesos de entrenamiento en el área háptica. Esta tecnología es derivada de diversos modelos y formas dependiendo de la función que vayan a utilizar. Los más comunes son guantes con motores vibrotáctiles rotativos y pulseras con sistemas vibrotáctiles mediante imán, que ofrecen al usuario una retroalimentación que busca simular una situación diseñada en un ambiente virtual generado por computadora (Quenta Silva, 2019).

Torres Castillo et al., (2018) desarrollaron un dispositivo háptico inalámbrico (figura 2), capaz de generar estímulos vibrotáctiles a diferentes frecuencias, el cual fue utilizado para pacientes con neuropatías (daños en el sistema nervioso). El sistema cuenta con una manga y un conjunto de 16 actuadores de tipo LRA los cuales vibran a diferentes intensidades gracias a una placa electrónica controlada por Arduino.



Figura 2 *Dispositivo portátil vibrotáctil Fuente. Adaptado de dispositivo háptico vibrotáctil inalámbrico para asistencia de actividades motoras, controlador Arduino con los 16 actuadores vibrotáctiles tipo LRA, 2018, (<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele/article/view/13310/13767>).*

Este proyecto se probó con 16 participantes con alguna discapacidad neuromotora (accidente cerebro vascular, reumatismo y diabetes). El experimento consistió en evaluar el umbral de percepción táctil cutáneo con una serie de vibraciones aplicadas a una intensidad variable. De acuerdo con los resultados la frecuencia mínima detectada por los participantes fue de 30Hz, mientras que con frecuencias menores no se perciben todos los actuadores, sin embargo, al sobrepasar los 270Hz se generaron molestias o lesiones en la piel debido a la alta temperatura.

Este desarrollo fue pensado como base para una aplicación de mayor alcance que incluye la rehabilitación para personas que han perdido algún miembro por amputación y que apoye como estimulante psicomotor en ejecución de actividades motoras (Torres Castillo et al., 2018).

En Sandoval-Gonzalez et al., (2017) se generó un sistema vibrotáctil implementado en un robot planar con 3 grados de libertad acompañado de 4 motores vibradores que forman parte de un prototipo en forma de guante. Este dispositivo se utilizó en personas que necesitan rehabilitación en sus extremidades superiores. Dicho sistema proporciona una retroalimentación vibrotáctil en tiempo real que captura y proporciona información que facilita los movimientos que realizan los pacientes durante su rehabilitación. El sistema vibrotáctil que se indica en la figura 3 y el robot planar en la figura 4 ayudan al paciente a acelerar el proceso de rehabilitación y a aprender de una manera más eficiente (Sandoval-Gonzalez et al., 2017).



Figura 3 Sistema vibrotáctil *Fuente.* Adaptado de *Diseño y desarrollo de un sistema vibratorio en un robot planar,* 2017, (https://www.researchgate.net/publication/262143977_Diseño_y_desarrollo_de_un_sistema_vibrotáctil_utilizado_en_un_robot_planar_para_la_rehabilitación_de_las_extremidades_superiores).



Figura 4 Robot planar **Fuente.** Adaptado de *Diseño y desarrollo de un sistema vibratorio en un robot planar*, 2017, (https://www.researchgate.net/figure/Figura-9-Robot-Planar_fig7_262143977).

Este sistema se puso a prueba con una persona en rehabilitación que tiene apoplejía, mientras que la metodología consistió en realizar círculos con la mano.

Al realizar el ejercicio sin el guante el error ($\bar{\epsilon}$) resultante fue de 15.05 cm y una desviación estándar (σ) de 11.3 cm. Posteriormente, al utilizar el sistema vibrotáctil se obtuvo un error ($\bar{\epsilon}$) de 12.52 cm y una desviación estándar (σ) de 6.9 cm, lo cual representó una reducción del 25% en el caso del error y del 39% en el caso de la desviación estándar. Los investigadores concluyeron que con un sistema vibrotáctil se puede ayudar en el proceso de rehabilitación.

Sin estos dispositivos la rehabilitación tenía un éxito del 40%, sin embargo, al utilizar retroalimentación vibrotáctil se mejora los resultados en un 60%. También permite una mejora rápida durante rehabilitaciones (Sandoval-Gonzalez et al., 2017).

Por otro lado, el estudio de un sistema de alerta al conductor basado en retroalimentación vibrotáctil, con base en la alta tasa de accidentes de tránsito en Argentina provocados por fallas humanas, consistió en la instalación de un conjunto de actuadores tipo botón sin eje en el volante de un vehículo, que permiten la comunicación entre el piloto y la interfaz (Slawiński et al., 2018).

Los actuadores se accionan al momento de identificar una alerta (figura 5) detectada por un radar instalado en la parte superior del vehículo, que percibe la proximidad de diferentes objetos. Este envía una señal al sistema y genera un voltaje que se transmite a los actuadores generando una vibración. La intensidad depende de la proximidad del obstáculo detectado.



Figura 5 Situación de peligro de proximidad de un auto **Fuente.** Adaptado de universidad EIA, Prototipo de interfaz háptica para potenciar la motora monocroma mediante instrucciones en Argentina, 2021, (<https://repository.eia.edu.co/handle/11190/3515>)

Para establecer el análisis de las condiciones de manejo, el prototipo se probó durante una conducción real en campo abierto en el cual se encuentra otro vehículo el que se aproxima a diferentes distancias y velocidades, para probar el nivel de sensibilidad y reacción del dispositivo. El sistema detecta si este se aproxima a altas velocidades o bajas velocidades dando un tiempo de reacción del sistema de 3 segundos, en donde se identificó que el conductor fue capaz de interpretar correctamente las señales enviadas por el actuador y así evitar la colisión (Slawiński et al., 2018).

Martínez, (2018) desarrolló un dispositivo basado en tecnología háptica: alarmas de colisión frontal integradas a un pedal háptico de aceleración. El pedal está compuesto por un motor vibrador de eje excéntrico que genera estímulos cuando los sensores instalados en la parte frontal del automóvil detectan la velocidad con la cual se aproxima a un objeto.

La finalidad de este estudio fue comprobar el funcionamiento del dispositivo como apoyo a la conducción, generando avisos ante situaciones de emergencia, como una posible colisión. El experimento se realizó con 30 participantes utilizando un simulador, en el que se probó el pedal bajo una condición de proximidad de diferentes objetos. Una vez realizado el experimento se hizo una valoración semántica. Se evaluó la eficiencia de los estímulos vibrotáctiles, dando como resultado que los conductores reaccionan 0.30 segundos antes y aumenta la distancia de seguridad en 6.7m más que cuando se utilizan estímulos únicamente visuales (Martínez et al., 2018).

Guamán, (2021) implementó un sistema de navegación para ciclista en Ecuador, para el cual diseñó una aplicación móvil que mediante bluetooth se comunica con un chaleco

cuyo dispositivo central es una placa de desarrollo Node MCU ESP32 y 2 motores vibradores tipo LRA. El sistema le permite obtener información de geolocalización de Google maps y generar indicaciones mediante vibración.

Este sistema se probó en un ambiente urbano en el cual un usuario ingresa su destino en la aplicación y este genera una ruta rápida. Los actuadores generan un estímulo vibrotáctil para marcar el camino. El sistema se activa en periodos de tiempo de 2 segundos si se encuentra lejos y 4 segundos si está cerca de algún giro.

Se pudo determinar que el participante llegó a su destino con las indicaciones generadas por el chaleco mejorando la seguridad del usuario ya que este no tuvo que revisar su celular para poder guiarse en la ruta (Guamán Taipe y Soto Bermello, 2021).

Por otra parte, en Salas Noain et al., (2020) se puso a prueba un sistema simulado de videojuegos con dispositivo de retroalimentación vibrotáctil donde participaron 3 jugadores de videojuegos clásicos, a los cuales se les implementó una respuesta de vibración en el mando de la consola, que se activa en momentos específicos del juego. Se recopiló la información de su experiencia, donde los estímulos vibrotáctiles se percibieron en dos de tres de los participantes. Ambos señalaron que el videojuego fue más satisfactorio al estar conectado con elementos vibratorios.

Aunque se concluyó que los juegos clásicos son de mayor interés cuando se implementan sistemas de retroalimentación vibrotáctil, uno de los puntos importantes que se debe tomar en cuenta es que todo debe sincronizarse, las imágenes y los estímulos vibrotáctiles, ya que una precisa comunicación provoca una mejor inmersión en la simulación (Torres Castillo et al., 2018).

En Rumbo, (2018) se desarrolló un dispositivo háptico para comprender los procesos de una intervención médica a distancia. El sistema dispone de una interfaz similar a los videojuegos en línea, con la incorporación de guantes con sistemas vibratorios de motores rotativos, lo que brinda al usuario un realismo aumentado, aunque no se encuentre en la sala de cirugías, como se indica en la figura 6.

Este dispositivo también contribuye a la capacitación del personal médico para intervenciones remotas. Se midió el aprendizaje de estudiantes de forma presencial y mediante el sistema tradicional de evaluación de conocimientos. Se detectó que el estudiante a distancia tiene la posibilidad de practicar una mayor cantidad de veces, a diferencia del

presencial que tiene que cumplir diferentes pasos para poder ingresar al quirófano y poder realizar una cirugía de práctica (Rumbo Barros, 2018).



Figura 6 Telesimulación desde el Hospital San Vicente en Medellín **Fuente.** Adaptado de UPB, Interfaz háptica de cuatro grados de libertad para cirugía laparoscópica en Colombia, 2018, (<https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/5540>)

En Loayza Paredes et al., (2017) se realizó un estudio de estimulación vibrotáctil para la ayuda a pacientes parkinsonianos con problemas de congelamiento de la marcha. Se implementaron sistemas vibrotáctiles en la fabricación de un sistema que consta de dos partes, una que se instaló a la altura del tobillo con la electrónica y otro más pequeño en las plantillas de los zapatos, como se muestra en la figura 7.



Figura 7 Sistema vibratorio **Fuente.** Adaptado de Escuela Politécnica Litoral, Diseño, construcción evaluación de dispositivos de estimulación vibro táctil en extremidades inferiores, (<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/41808?locale=es>)

El dispositivo consta de una interfaz en la cual se detecta el ritmo de las personas cuando están caminando y calcula la velocidad con la que se mueven las extremidades. Cuando el sistema detecta que el ritmo cambia o que tiene alguna diferencia, esta envía un

estímulo vibrotáctil de 13000 RPM con una frecuencia de 216 Hz para que el usuario corrija la marcha. El paciente determina si puede corregir o se detiene para evitar un incidente (Loayza Paredes et al., 2017).

El estudio se realizó en la ciudad de Guayaquil en el Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social (IESS) con un total de 7 pacientes. Los participantes tuvieron el sistema vibrotáctil por 15 días en los cuales se pudo determinar que 5 de los 7 pacientes no tuvieron congelamiento de sus pasos ya que al momento de sentir las vibraciones corregían su marcha, logrando tener una mejoría del 100%. Los 2 pacientes restantes tuvieron episodios de congelamiento de sus pasos, pero no sufrieron ningún accidente ya que con las vibraciones detectaban la anormalidad y al no poder corregir se detenían completamente (Loayza Paredes et al., 2017).

JUSTIFICACIÓN

Para el desarrollo y ejecución del presente proyecto “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE INTERFAZ HÁPTICA PARA APLICACIONES DE RETROALIMENTACIÓN VIBROTÁCTIL” se evaluaron los puntos que se describen a continuación:

La importancia de este proyecto radica en la facilidad de aplicación en diferentes áreas. Los dispositivos vibrotáctiles se han implementado en campos como la educación, la industria y el entretenimiento, sin embargo, no son ampliamente utilizados debido a que en situaciones que se requiere elevada intensidad de vibraciones se deben instalar actuadores tipo Voice-Coil los cuales son costosos. Este proyecto se enfoca en el desarrollo de una interfaz compacta y de fácil ensamble para un sistema vibrotáctil con actuadores de bajo costo, encapsulados en una carcasa tipo pila y montados en un soporte diseñado en software CAD. Los componentes se fabrican mediante manufactura aditiva, lo que permite tener flexibilidad y fácil replicación, reduciendo los costos de manufactura.

El impacto de este proyecto es para todas las investigaciones mencionadas en los antecedentes y otras similares. Por ejemplo, en el caso de los sistemas médicos de recuperación motriz se favorecerían a más de mil millones de personas, o sea en torno al 15% de la población mundial que hoy día necesita algún tipo de rehabilitación (Banco Mundial, 2021). En el ámbito de la discapacidad auditiva afectaría positivamente a 360 millones de personas en el mundo que pueden utilizar sistemas hápticos para mejorar su calidad de vida (El Telégrafo, 2017). Por otro lado, el mercado de los videojuegos con realidad aumentada ha crecido y se espera que para el 2023 habrá un aproximado de 1.700 millones de usuarios de realidad aumentada en todo el mundo, alcanzando ingresos globales de 1,8 billones de dólares. Para todos estos desarrollos y tecnologías la barrera es la misma, actuadores Voice-Coil que son de difícil adquisición en el mercado nacional (Fenández, 2022).

La utilidad se refleja, por ejemplo, en aplicaciones como sistemas de geolocalización que emiten estímulos vibratorios a través de los cuales el usuario identifica direcciones. Otro ejemplo son los sistemas de capacitación industrial que mediante los sistemas vibratorios junto con la háptica hacen la curva de aprendizaje más eficiente. En la medicina la háptica está inmersa en las operaciones remotas y problemas motrices ayudando tanto a los médicos a mejorar y capacitarse en operaciones de quirófano, como a los pacientes para que puedan tener una mejor recuperación de operaciones o problemas motrices. Finalmente, en el entretenimiento en videojuegos permitiendo que los usuarios tengan una mejor inmersión mediante los estímulos hápticos generados por actuadores.

Los beneficiarios de este proyecto son, en primer lugar, los investigadores que enfocan sus proyectos hacia la retroalimentación multisensorial y la comunicación humano máquina. Además, los usuarios finales del producto que generalmente son personas que aprovechan la retroalimentación vibrotáctil como canal sustitutorio de comunicación con el entorno. Desarrolladores de tecnología e investigadores se beneficiarán de esta investigación ya que facilita el desarrollo de aplicaciones vibrotáctiles con un modelo de actuador compacto y económico de fácil uso e instalación en varias superficies. Los entusiastas de nuevas funciones en señales vibrotáctiles tendrán la oportunidad de realizar pruebas de sus trabajos a un bajo costo y rápida adquisición ya que el sistema es versátil y de breve acoplamiento según se requiera.

Este proyecto es factible ya que cuenta actualmente con los recursos necesarios para su desarrollo, a nivel tecnológico se tiene a disposición tres máquinas de impresión 3D, así como la existencia de material de impresión con proveedores ya establecidos. De igual forma la disponibilidad de literatura de desarrollo e innovación sobre sistemas vibrotáctiles, así como el apoyo de investigadores con experiencia.

OBJETIVOS

General

Diseñar y construir un prototipo de interfaz háptica mediante técnicas de prototipado rápido para aplicaciones de retroalimentación vibrotáctil.

Específicos

Generar el listado de elementos necesarios respecto al diseño de un prototipo de interfaz háptica, basado en la exploración del estado del arte para cumplir con los estándares establecidos por los últimos avances de la ciencia concerniente al tema.

Diseñar un prototipo de dispositivo háptico, mediante la utilización de software CAD para su posterior manufactura.

Construir una interfaz háptica mediante el uso de metodologías flexibles de manufactura para su implementación en aplicaciones de retroalimentación vibrotáctil.

Validar los actuadores en una aplicación de movilidad urbana a través de pruebas psicofísicas para verificar su correcto funcionamiento.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Percepción

La percepción es un proceso nervioso superior que permite al organismo, a través de los sentidos, recibir, elaborar e interpretar la información proveniente de su entorno y de uno mismo. La percepción no es la recepción pasiva de los estímulos, sino que también involucra aprendizaje, memoria y expectativas que son generadas mediante los estímulos de bajo nivel que son recibidos a lo largo del tiempo. La percepción está en la base de la adaptación animal, la forma en la cual interpretamos el mundo y cuál es el efecto de las cosas que nos rodean; modifica nuestro comportamiento y es una variable fundamental en las acciones que realizamos y la forma en la cual nos comportamos. En conclusión, la percepción es un resultado de la combinación de toda la información enviada al cerebro a través de los sentidos, por lo que los mismos son relevantes para construir una ilusión completa (Romero Muñiz, 2018).

Giro y sustitución sensorial

El giro sensorial se puede identificar en las personas que tienen ausencia de sentidos como la visión, tacto y audición; cuando cualquiera de estos sentidos se ausenta los sentidos activos van a estar alerta de las diferentes actividades o sucesos a su alrededor y estos sentidos les ayudan a orientarse y a estar pendientes de cualquier evento (Paiba Diaz, 2020).

Por ejemplo, el sentido del tacto en las manos ayuda a identificar obstáculos mediante el bastón blanco, el cual es un dispositivo de movilidad con el que son entrenadas las personas con ceguera y baja visión para poder desplazarse con mayor autonomía en la vía pública; también sirve como un medio de información y como protección (Slawiński et al., 2018).

Al momento de perder el sentido de la audición, los sentidos activos quedan alerta para poder proteger y orientar al sujeto, sin embargo el sentido de la audición tiene una peculiaridad, es muy complicado suplantarlos o recibir información similar; un ejemplo es la percepción de la música, esta genera vibraciones las cuales se pueden sentir mediante el tacto pero no se pueden sentir todas las ondas generadas por los instrumentos y la voz humana, por lo cual alcanzar la percepción completa es muy complejo (Remache-Vinueza B. et al., 2022).

El término que se utiliza en ejemplos como el del bastón blanco o las vibraciones para suplantar al audio es sustitución sensorial, esta se refiere a la transmisión de información que normalmente es enviada mediante una forma sensorial por otra.

También, la sustitución sensorial se usa para mejorar las capacidades de percepción del entorno de las personas. Por ejemplo, se han desarrollado dispositivos que envían señales táctiles a los pacientes que sufren congelamiento de pasos para así poder evitar accidentes, como se ha mencionado en los antecedentes. De la misma manera, se han encontrado aplicaciones en la industria automotriz, donde se han diseñado volantes capaces de vibrar para identificar situaciones irregulares como un coche frenando u obstáculos.

Retroalimentación vibrotáctil

Los sistemas vibrotáctiles permiten recibir la información mediante vibraciones que pueden ser generadas por computadora y transmitidas por actuadores que generan estímulos físicos, que a su vez otorgan la información que es identificada por el sentido del tacto. Las vibraciones pueden ser interpretadas como alerta de algún suceso (Rumbo Barros, 2018).

Los estímulos vibrotáctiles pueden ser utilizados para la generación de ondas para sistemas de simulación de audio para personas que tienen ausencia o baja audición. En este tipo de desarrollo se emplean pequeños dispositivos que se pueden colocar en diferentes partes del cuerpo mediante pulseras con velcro o chalecos para el torso, para así poder identificar diferentes niveles y tipos de vibraciones (Slawiński et al., 2018).

Analizando los antecedentes descritos por anteriores investigaciones es posible determinar que el tipo de actuador involucrado en el dispositivo háptico es vital acorde al tipo de estímulo buscado (Remache-Vinueza B. et al., 2021).

Para la mayoría de las aplicaciones, los actuadores deben cumplir con la demanda de los desarrolladores que implica un alto grado de sensibilidad, bajo costo y de fácil montaje.

TIPOS DE MOTORES VIBROTÁCTILES

Para la selección de los motores vibrotáctiles para una interfaz se deben tener en cuenta características como: geometría, peso, material, así como el método de fabricación y ensamble (Choi y Kuchenbecker, 2019).

Motores rotativos con masa excéntrica (ERM por sus siglas en inglés Eccentric Rotating Mass)

Son motores con una masa montada en el eje de forma descentrada (figura 8) que al momento de aplicar un voltaje vibran mientras la masa descentrada gira. Son excelentes para sensaciones retumbantes de baja frecuencia. Tienen la característica de ser lentos por lo que no son útiles para generar efectos vibrotáctiles precisos. Tiene un costo aproximado en el mercado de dos dólares (Pasquale, 2021).



Figura 8 Motores de vibración ERM *Fuente*. Adaptado de diseño de interfaz para la captura de patrones de vibración háptica, se procedió a captar información mediante los registros de sonido del motor ERM en Madrid, 2017, (<https://oa.upm.es/49199/>).

Dentro de la gama de los motores rotativos de masa excéntrica existen los motores de vibración básica para retro alimentación vibrotáctil: motores de vibración de eje externo con peso. Son los más utilizados en sistemas de entretenimiento y video juegos porque tienen una gran variedad de plataformas de instalación como mandos de consolas y mouse (Carrión, 2017).

El modo de funcionamiento de este tipo de motores de eje externo está dado por el voltaje, a medida que el voltaje suba o baje este girará a mayor o menor velocidad respectivamente, otorgando niveles de vibración a lo largo del tiempo que se aplique el voltaje (Romero Muñiz, 2018).

Para el uso de este tipo de motores es necesaria una caja o superficie de montaje. Dependiendo del tamaño de esta superficie o carcasa donde se encuentran instalados se obtendrán diferentes niveles de vibración, lo cual limita su utilización ya que actualmente las industrias de entretenimiento y capacitaciones buscan dispositivos compactos y discretos (Romero Muñiz, 2018).

Este tipo de motores al momento de energizar tienen un retraso de acción por la inercia del eje que es de milisegundos, lo que perjudica la respuesta de percepción del estímulo, por lo que estos dispositivos no son adecuados para el desarrollo en el que las características temporales son importantes (Tirumala Bukkapatnam, 2020).

Otra de las falencias de los motores ERM es que las vibraciones, son de muy baja percepción, casi imperceptibles en muchos casos y su amplitud de corriente también es baja. Esto da como resultado que los diseñadores tengan que agregar dinámica a este tipo de vibraciones y esquemas de control más sofisticados para su uso. Sin embargo, el alcance de estas mejoras es limitado (Carrión, 2017).

Actuador por resonancia lineal (LRA, por sus siglas en inglés Linear Resonant Actuador)

Son actuadores que consisten en una masa, un resorte y un electroimán (figura 9). Son considerados de larga duración (1 millón de ciclos). Es un motor de vibración de precisión que produce una fuerza de oscilación en un solo eje. A diferencia de un motor de masa giratoria (ERM) excéntrica de corriente continua (CC). Es de vibración lineal que se basa en un voltaje de corriente alterna (CA) para impulsar una bobina presionada contra una masa en movimiento que está conectada a un resorte, provocando que todo el actuador vibre con una fuerza perceptible. Aunque la frecuencia y la amplitud de un actuador resonante lineal pueden ajustarse cambiando la entrada de CA, el actuador debe accionarse mediante un controlador para motores de vibración lineal. Son eficientes en términos de consumo energético y esto los convierte en una buena opción para teléfonos móviles. Tiene un costo aproximado en el mercado de cinco dólares (Pasquale, 2021).

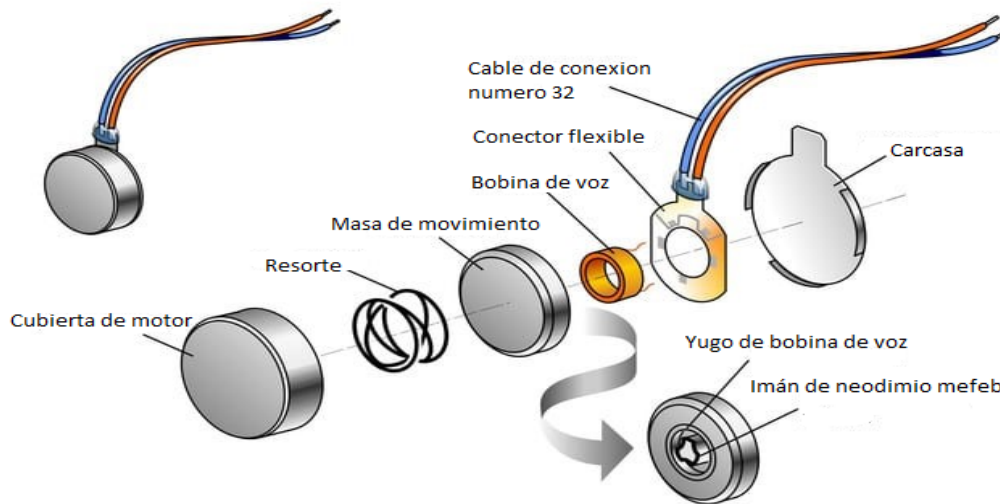


Figura 9 Actuador de resonancia lineal **Fuente.** Adaptado de *Definición de un conjunto de herramientas vibrotáctiles para instrumentos musicales digitales, despiece y caracterización de actuador de bobina móvil*, 2020, (<https://link.springer.com/article/10.1007/s12193-020-00340-0/>)

Actuadores de imán móvil o bobina de voz (VCA, por sus siglas en inglés Voice Coil Actuator)

Este tipo de actuadores también conocido como Voice-Coil (figura 10) comprenden una bobina y un imán que crea un campo anular y un mecanismo de suspensión. Por debajo de la saturación, la fuerza de salida está dada linealmente, en general, por la corriente de entrada. Estos pueden ser muy precisos generando vibraciones más perceptibles y no tienen limitaciones de ancho de banda que no sean su dinámica estructural (Tirumala Bukkapatnam, 2020).



Figura 10 Bobina móvil o imán móvil **Fuente.** Adaptado de *direct industry, componentes de un actuador tipo Voice coil que se encuentra a la venta en el mercado en la cuidada de España*, 2020, <https://www.directindustry.es/prod/sensata-technologies/product-37684-1869742.html>

En comparación con los motores de vibración de eje estos tienen un costo de cincuenta dólares y generalmente son más grandes, a menos que estén diseñados para funcionar a una sola frecuencia de resonancia, en cuyo caso, la magnitud de su respuesta es sensible a la presencia de una señal ajena (Carrión, 2017).

Las ventajas son una masa de movimiento más grande y a menudo, un rango de desplazamiento más limitado, lo cual quiere decir que la vibración es más perceptible a bajas frecuencias. Los actuadores de imán móvil se han utilizado en proyectos de investigación para diferentes propósitos con diferentes tamaños y configuraciones.

A escalas pequeñas se pueden diseñar con tamaños submilimétricos para usarlos como actuador de precisión debido a su simplicidad y eficiencia. Tienen una amplia aplicación industrial y de investigación (Carrión, 2017).

Actuador piezoeléctrico

Otro de los métodos para generar sensaciones vibrotáctiles es aprovechando el efecto piezoeléctrico en el que materiales sólidos cambian de forma cuando se someten a un voltaje eléctrico. Este efecto es reversible, por lo que los materiales piezoeléctricos, como el que se muestra en la figura 11, también se usan como sensores que al momento de deformarse producen una señal eléctrica. Los modelos con capas cerámicas tienen limitaciones como la necesidad de un voltaje alto de entrada de 100V generando complicaciones en sistemas electrónicos que solo usan hasta 11.1V. Tienen un costo aproximado de en el mercado de tres dólares.

Una opción que se puede utilizar son los que están compuestos con polímero electroactivo que usan elastómeros en lugar de cerámica, lo que permite un rango más amplio de deformaciones y voltajes de entrada más bajos, aunque las fallas mecánicas de este tipo de actuadores son más frecuentes (Hik, 2022).



Figura 11 Actuador piezoeléctrico **Fuente.** Adaptado de *GSL Industrias*, el principio de funcionamiento cuenta con un material que se somete a una fuerte reacción eléctrica para generar las cargas, 2022, (<https://industriassgl.com/blogs/automatizacion/sensor-piezoelctrico>).

ÁREA DE ESTUDIO

Área de estudio: Gestión sostenible de productos

Dominio: Tecnología y Sociedad

Línea de investigación: automatización y redes

Sub línea: Diseño y desarrollo de nuevos productos, identifica e innova productos para cubrir necesidades de la industria y la sociedad.

Campo: Ingeniería Industrial

Área: Procesos de manufactura

Aspecto: Calidad de diseño e ingeniería asistida por computador y manufactura aditiva.

Objetivo de estudio: desarrollo de un prototipo de interfaz vibrotáctil.

Periodo de análisis: 2021-2022

Modelo Operativo

Para diseñar un prototipo de interfaz vibrotáctil se ha decidido elaborar el mapa de procesos que se observa en la figura 12.

Los requerimientos de diseño indican la versatilidad que debe tener la interfaz, en este caso debe ser compacto y económico.

Se establecieron los parámetros de diseño para seleccionar los materiales y generar los componentes en software CAD. La interfaz se validó mediante pruebas psicofísicas en una plataforma de simulación.

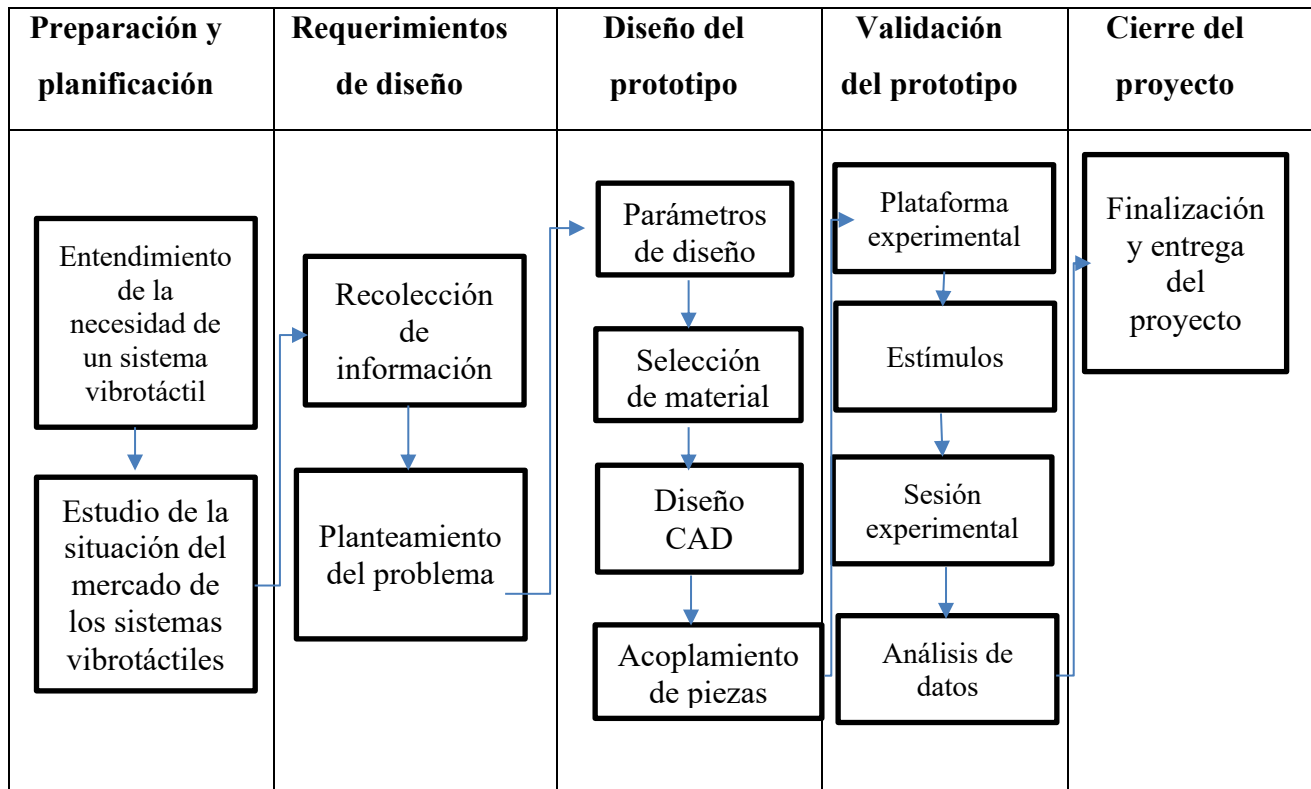


Figura 12 Modelo operativo para el diseño de la propuesta. **Fuente.** Tomado de Dtyoc, Metodología RUP (Rational Unified Process), Modelo RUP – IBM, 2017, <https://dtyoc.com/2017/06/07/modelo-rup-ibm/>, elaborado por el autor.

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE LA PROPUESTA

Criterio de diseño

Para el diseño de la carcasa y del soporte se revisó el estado del arte. Mediante investigación previa, se propone un prototipo en forma de pila el cual contiene en su interior un sistema de vibraciones tipo Voice-Coil de acuerdo con los actuadores desarrollados en Remache-Vinueza B. et al., (2021).

Este sistema es compacto y tiene ajuste con apriete para evitar resonancia debido a las vibraciones. Este diseño permite ajustar los actuadores a diferentes superficies con un soporte (véase en el Anexo 4).

Por lo tanto, se requiere diseñar dicho soporte para la aplicación específica, que en el caso de la validación de este prototipo corresponde a un manubrio de bicicleta. Adicionalmente se tomará como referencia la metodología de diseño para ensamble y manufactura (DFMA, por sus siglas en inglés Desing For Manufacturing and Assembly). Además, se utilizarán matrices de priorización para analizar cuáles serán los materiales idóneos, con el objetivo de mejorar los aspectos de manufactura y costos, respetando las funciones esenciales del producto. Se tomará en cuenta los recursos y costes asociados, así como también las herramientas basadas en la modelación 3D, herramientas de simulación y desarrollo de prototipos.

Diseño de la carcasa

El diseño de la carcasa (Anexo 4 plano 1.2) tiene como base la geometría de los componentes internos a ser ocupados. Para este diseño se utiliza software CAD donde se modela para que se adapte al sistema vibratorio.

Antes de realizar el diseño se analizó el tipo de material que será utilizado en el dispositivo tomando en cuenta la resistencia del mismo y la transmisión de las vibraciones al usuario. Para esto se realizó la selección de sus componentes de acoplamiento para determinar medidas y formas de acople. El tamaño y geometría del actuador están definidos por el diseño de tipo Voice-Coil desarrollados en Remache-Vinueza B. et al., (2021).

Diseño de soporte de carcasa

Para el diseño del soporte de la carcasa se consideraron las medidas tanto de la carcasa del actuador como de la estructura en la cual se instalará el sistema (Anexo 4 plano 1.3).

Selección de material

Las dimensiones y geometría, así como los requerimientos de montaje de la carcasa y el soporte, se utilizan para determinar el diseño y ensamble.

Los sistemas vibrotáctiles se han fabricado en gran variedad de materiales como plásticos PVC, metal, aluminio y algunos sin recubrimiento. Para definir los criterios de selección del tipo de material que se va a utilizar para fabricar la carcasa interna y el soporte de la carcasa, se realizará una comparación entre distintos materiales y sus características. De esta manera se procede a evaluar la mejor propuesta, haciendo uso del libro de los materiales en la ingeniería y sus propiedades de Ashby y H. Jones, (2009), en el cual se describen los diferentes tipos de materiales y formas de selección para cada tipo de material.

Al elegir un material para una función, se deben tener en cuenta los siguientes factores:

- **Propiedades:** Dureza, flexibilidad, resistencia.
- **Fabricación:** El proceso de fabricación del prototipo.
- **Disponibilidad:** oferta en el mercado.
- **Costos:** Variedad de precios.

Se seleccionaron los materiales indicados en la tabla 1 utilizados para la elaboración de la interfaz vibrotáctil, teniendo en cuenta que la mayoría de los elementos dedicados a los sistemas vibrotáctiles son componentes eléctricos y electrónicos que son acoplados sobre superficies que transmiten la vibración a los usuarios.

El material de la estructura de acoplamiento puede ser fibra de carbono, metal, plástico PLA, ABS o TPU.

Tabla 1

Tipos de materiales para fabricación del actuador y soporte

Materiales	
1	Fibra de carbono
2	Aluminio
3	Plástico PLA
4	Plástico ABS
5	Plástico TPU

Fuente. Adaptado de *Los materiales en la ingeniería y sus propiedades*, por. Ashby y H. Jones, (2009), Editorial Reveté S.A., elaborado por el autor.

Fibra de carbono

Es un material conformado con fibras de 10-50 micras de diámetro, compuesto principalmente de átomos de carbono. El mismo es resistente y ligero. En la figura 13 se muestran ejemplos de productos hechos de fibra de carbono. Este material es más resistente que el acero y con el doble de rigidez dependiendo de la posición en la cual se ubiquen las fibras; si estas son colocadas en diferente dirección a la fuerza esta perderá su dureza y su resistencia. Estas son solo algunas de las razones por las que ingenieros y diseñadores prefieren la fibra de carbono para la fabricación de sus prototipos.

Las propiedades de las fibras de carbono, tales como una alta flexibilidad, alta resistencia, bajo peso, tolerancia a altas temperaturas y baja expansión térmica, las hacen muy populares en la industria aeroespacial, de ingeniería civil, aplicaciones militares y deportes (Gago Alegre, 2017).

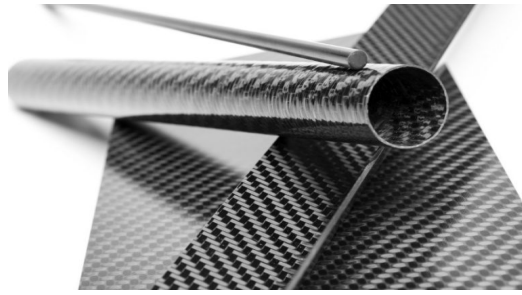


Figura 13 *Cilindros de fibra de carbono* **Fuente.** Adaptado de carbosystem, el modelo característico de fibra de carbono, 2022, (<https://carbosystem.com/fibra-de-carbono-2/>).

Aluminio

Es un metal no ferromagnético y es el tercer elemento más común en la corteza terrestre. En la figura 14 se muestra un ejemplo de un tubo hecho de aluminio. Este material genera de forma natural una capa de óxido que lo hace resistente a la corrosión. La hoja de aluminio, incluso cuando se lamina a un grosor de 0,007 mm, sigue siendo impermeable y no permite que las sustancias pierdan sus características organolépticas. Además, este metal no es tóxico, ni desprende olor o sabor. Los diferentes tipos de tratamiento de superficie pueden mejorar aún más esta propiedad. Resulta especialmente útil para aquellos productos que requieren de protección y conservación. La gran ventaja del aluminio es su facilidad de ser reciclado (Hinojosa Iza y Raura Díaz, 2018).



Figura 14 *Cilindro de aluminio* **Fuente.** Adaptado de weerg, uno de los metales más abundantes de la tierra es muy versátil, 2022, <https://www.weerg.com/es/es/blog/aluminio-caracter%C3%ADsticas-propiedades-y-ventajas>.

Plástico PLA

El plástico PLA por sus siglas en inglés Polylactic Acid, es un material que se obtiene de elementos naturales, tales como el almidón de maíz. Es un material plástico, ecológico, renovable y biodegradable bajo diferentes condiciones de temperatura y humedad.

Las características del plástico PLA son que es noble con el medio ambiente y no se necesita de ningún tratamiento químico para su fabricación, tiene una resistencia y

flexibilidad moderada, soporta rayos ultravioletas y presenta una baja inflamabilidad; es de fácil manipulación (Losada y Angarita, 2018)

Plástico ABS

El acrilonitrilo butadieno estireno, a menudo denominado ABS por sus siglas en inglés Acrylonitrile Butadiene Styrene, es un termoplástico opaco y un polímero amorfo. Termoplástico quiere decir que este tipo de plástico responde al calor de diferentes maneras. En el caso del ABS, este material se vuelve líquido cuando se somete a 221°F o 105°C. Lo que distingue a los termoplásticos de otros plásticos es que se pueden fundir a su forma líquida, enfriarse y recalentarse nuevamente sin causar demasiado daño a su composición química. El ABS es mejor que los plásticos termo endurecibles ya que estos solo se pueden calentar una vez (generalmente durante el tiempo en que se moldea en una forma particular) (Losada y Angarita, 2018)

Dado que el ABS es un plástico muy resistente y no se corroe fácilmente cuando entra en contacto con materiales abrasivos, a menudo se usa para fines de impresión 3D, teclados de computadoras, juguetes de lego, carcasas de herramientas eléctricas, enchufes de pared, piezas de computadoras, piezas de automóviles, maletas, aplicaciones de aviones, cascos, sillas, mesas, contenedores, etc. Una de las razones por las cuales es tan ampliamente utilizado es porque también es un plástico de bajo costo. No debe usarse en artículos sometidos a altas temperaturas porque tiene un bajo punto de fusión en comparación con otros plásticos. Este puede ser coloreado por diferentes pigmentos con gran facilidad. Una vez enfriado, el ABS proporciona un acabado liso y brillante (Porrás Solorzano, 2018).

Plástico TPU

El termoplástico poliuretano (TPU por sus siglas en inglés Thermoplastic Polyurethane) es un tipo elastómero que se caracteriza por su gran flexibilidad y durabilidad en la transformación. En su composición química encontramos que su forma de adaptación se debe a la presencia de secuencias alternas de segmentos rígidos y blandos, que, variando la proporción de segmentos, la dureza y flexibilidad del material también cambia. (Marcos-Fernández et al, 2019).

En la industria de fabricación aditiva, este material abre un mundo de opciones a distintos mercados tales como el calzado creando suelas flexibles. De igual manera este material se ha utilizado para la fabricación de neumáticos y amortiguadores como en la figura 15. El TPU es ideal para la fabricación de piezas de uso final, prototipos funcionales, modelos conceptuales y componentes personalizados. Este tipo de material es muy utilizado para producir fundas de teléfonos ya que permite la protección de los dispositivos a impactos. Otros de los beneficios de este material son resistencia al desgaste, la abrasión y cortes.



Figura 15 *Característica de deformación del TPU* **Fuente.** Adaptado de stratasys, *deformación característica del TPU de una pieza impresa en 3D*, <https://www.stratasys.com/es/polyjet-technology#imageCarousel>

Teniendo en cuenta las características de los distintos materiales, se tomaron como referencia los criterios para la realización de una matriz de priorización (Tabla 2) acorde a proporciones basada en Ashby y H. Jones, (2009). Con las diferentes perspectivas se ejecutará este método.

Tabla 2

Criterios para determinar prioridad de diseño del actuador

Criterios	
1	Durable
2	Económico
3	Ligero
4	Reciclable
5	Resistente
6	Flexible

Fuente. Adaptado de *Los materiales en la ingeniería y sus propiedades*, por Ashby y H. Jones, (2009), pág. 29-91, Editorial Reveté S.A., elaborado por el autor.

Evaluación para la selección del material para la carcasa

Para tener una correcta evaluación de los criterios se atribuye una ponderación de acuerdo con la siguiente escala:

- Sumamente importante = 9
- Mas importante = 7
- Igual de importante = 5
- Menos importante = 3
- Levente importante = 1

Para la valoración se comienza por las filas y en la celda de esta matriz se plantea la siguiente pregunta:

¿Cuál es la importancia del criterio en la fila con respecto al criterio de la columna en la misma fila?

Tabla 3

Priorización de criterios para selección de elementos

Criterios	Durable	Económico	Ligero	Reciclable	Resistente	Flexible	Suma	%
1 Durable	7	7	5	5	7	5	29	19
2 Económico	7	7	7	5	5	7	31	20
3 Ligero	5	5	5	5	5	7	27	17
4 Reciclable	3	3	3	3	3	5	17	11
5 Resistente	7	7	5	7	7	7	33	21
6 Flexible	5	3	3	5	3	3	19	12
						TOTAL	156	100%

De la Tabla 3 se ha definido que los principales criterios: durable, económico y resistente, son igual de trascendentales y se encuentran con el mayor porcentaje de importancia puesto que el diseño de la carcasa debe ser lo más durable posible con bajo costo de fabricación y resistente.

Para que la elaboración de la matriz permita seleccionar el mejor material de construcción de la propuesta, se debe responder a la siguiente pregunta:

¿En qué medida la alternativa que se encuentra en la fila cumple con el criterio evaluado, con relación a la alternativa que se encuentra en la columna respectiva?

Para tener una correcta evaluación de los criterios si cumple perfectamente o cumple levemente se atribuye una ponderación:

- Cumple perfectamente = 9;
- Cumple más que otros materiales = 7;
- Cumple igualmente que los otros materiales = 5;
- Cumple menos que los otros materiales = 3;
- Cumple levemente a diferencia de los otros materiales = 1;

Tabla 4

Evaluación Durable vs Alternativas

	Fibra de carbono	Aluminio	Plástico PLA	Plástico ABS	Plástico TPU		
DURABLE	1	2	3	4	5	Suma	%
1 Fibra de carbono		7	7	7	5	26	30
2 Aluminio	7		3	5	5	20	23
3 Plástico PLA	3	3		7	9	22	26
4 Plástico ABS	3	3	3		5	14	16
5 Plástico TPU	1	1	1	1		4	5
					Total	86	100%

De la Tabla 4 se define que el material más durable es la fibra de carbono, elaborado por el autor.

Tabla 5

Evaluación Económico vs Alternativas

	Fibra de carbono	Aluminio	Plástico PLA	Plástico ABS	Plástico TPU		
ECONÓMICO	1	2	3	4	5	Suma	%
1 Fibra de carbono		5	7	7	7	26	22
2 Aluminio	7		5	5	7	24	20
3 Plástico PLA	7	7		7	7	28	24
4 Plástico ABS	7	5	9		9	30	25
5 Plástico TPU	3	3	1	3		10	9
					Total	118	100%

De la Tabla 5 se define al Plástico ABS como el material más económico, ya que es un material barato de producir, elaborado por el autor.

Tabla 6*Evaluación Ligero vs Alternativas*

	Fibra de carbono	Aluminio	Plástico PLA	Plástico ABS	Plástico TPU		
LIGERO	1	2	3	4	5	Suma	%
1 Fibra de carbono		3	5	5	5	18	15
2 Aluminio	7		7	7	7	28	23
3 Plástico PLA	5	5		7	9	26	21
4 Plástico ABS	9	9	9		9	36	30
5 Plástico TPU	5	3	3	3		14	11
						Total	122 100%

De la Tabla 6 se define a la fibra de carbono y plásticos ABS como más ligeros ya que son materiales poco densos en comparación con los otros ítems, elaborado por el autor.

Tabla 7*Evaluación reciclable vs Alternativas*

	Fibra de carbono	Aluminio	Plástico PLA	Plástico ABS	Plástico TPU		
RECICLABLE	1	2	3	4	5	Suma	%
1 Fibra de carbono		3	5	3	3	14	17
2 Aluminio	3		5	3	3	14	17
3 Plástico PLA	3	3		7	7	20	24
4 Plástico ABS	1	1	3		5	10	12
5 Plástico TPU	7	7	5	7		26	30
						Total	84 100%

De la Tabla 7 se define que el plástico TPU es el único material reciclable al ser un material sintético. Elaborado por el autor.

Tabla 8*Evaluación Resistente vs Alternativas*

	Fibra de carbono	Aluminio	Plástico PLA	Plástico ABS	Plástico TPU		
RESISTENTE	1	2	3	4	5	Suma	%
1 Fibra de carbono		7	7	7	9	30	30
2 Aluminio	3		7	7	9	26	26
3 Plástico PLA	3	3		7	9	22	21
4 Plástico ABS	3	5	3		9	20	19
5 Plástico TPU	1	1	1	1		4	4
						Total	102 100%

De la Tabla 8 se define a la fibra de carbono como el material más resistente por su elevada resistencia mecánica a la fatiga y baja densidad, elaborado por el autor.

Tabla 9*Evaluación flexible vs Alternativas*

		Fibra de carbono	Aluminio	Plástico PLA	Plástico ABS	Plástico TPU		
	FLEXIBLE	1	2	3	4	5	Suma	%
1	Fibra de carbono		7	7	7	9	30	24
2	Aluminio	3		3	3	3	12	10
3	Plástico PLA	3	7		7	7	24	19
4	Plástico ABS	5	5	5		7	22	18
5	Plástico TPU	9	9	9	9		36	29
							Total	124
								100%

De la Tabla 9 se define al plástico TPU como flexible por sus características elásticas, elaborado por el autor.

El resultado de la evaluación de los materiales de fabricación con respecto a sus distintas alternativas detalladas en las Tablas 4, 5, 6, 7, 8 y 9, muestran que cuando se considera el peso, los plásticos ABS son los materiales más ligeros para la construcción, mientras que en el factor de resistencia la fibra de carbono resulta el material con más durabilidad. Finalmente, con respecto al precio el ABS es el material más económico.

Tabla 10*Matriz final de priorización*

		Durable	Económico	Ligero	Reciclable	Resistente	Flexible	%
		30%	25%	30%	30%	30%	29%	
1	Fibra de carbono	30	22	15	17	30	24	23%
2	Aluminio	23	20	23	17	26	10	19%
3	Plástico PLA	26	24	21	24	21	19	22%
4	Plástico ABS	16	25	30	12	19	18	24%
5	Plástico TPU	5	9	11	30	4	29	14%
	TOTAL	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

El resultado final de la Tabla 10, muestra que el material ABS ofrece las mejores características para la fabricación de la carcasa, puesto que, es el que menos peso tendría con una resistencia aceptable y con menor precio.

Modelado 3D

Una vez determinados los criterios de diseño y seleccionados los componentes y el material, se realizó el diseño de la carcasa y soporte. Se tomaron en consideración los requerimientos de geometría y peso.

Actuador Vibrotáctil

Se utilizaron actuadores tipo Voice-Coil fabricados de acuerdo con lo propuesto en (Remache-Vinueza B. et al., 2022).

El actuador se soldó a un conector de audio monofónico hembra de 3.5mm para poder energizar la bobina (figura 16).

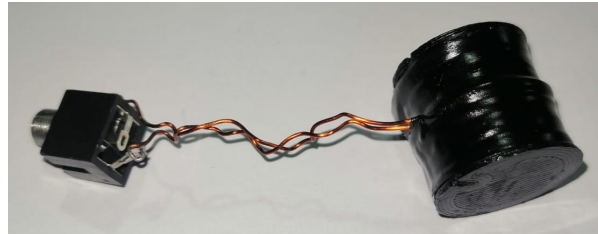


Figura 16 Conector de audio monofónico hembra de 3.5mm instalado en el actuador *Fuente.* actuador soldado el conector de audio monofónico hembra de 3.5mm, elaborado por el autor.

Modelo de carcasa y tapa

La carcasa del actuador se diseñó de acuerdo con la geometría cilíndrica de los actuadores. También se realizó un diseño compacto para facilitar su instalación (figura 17). El cuerpo cilíndrico de la carcasa se indica en el plano 1.2 y 1.3 (Anexo 4); este tiene perforaciones tanto en su alrededor como en la parte inferior para la ventilación del actuador ya que al momento de generar las vibraciones estas producen calor. Además, se diseñó un sistema de tapa roscada en la que se realizó una perforación para la instalación del conector de audio.

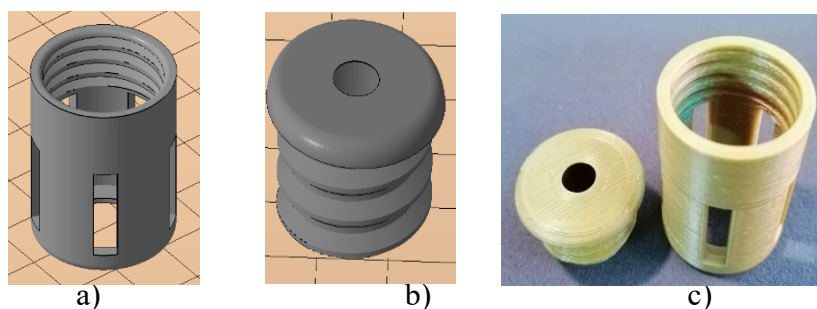


Figura 17. Modelo e impresión 3D (a) y (b) que indican el diseño de carcasa y tapa, en el literal (c) los mismos elementos impresos en ABC, elaborado por el autor.

Una vez impresa la carcasa con la tapa se procedió a acoplar el actuador con sus partes y el conector de audio monofónico hembra con la tapa, como se muestra en la figura 18.

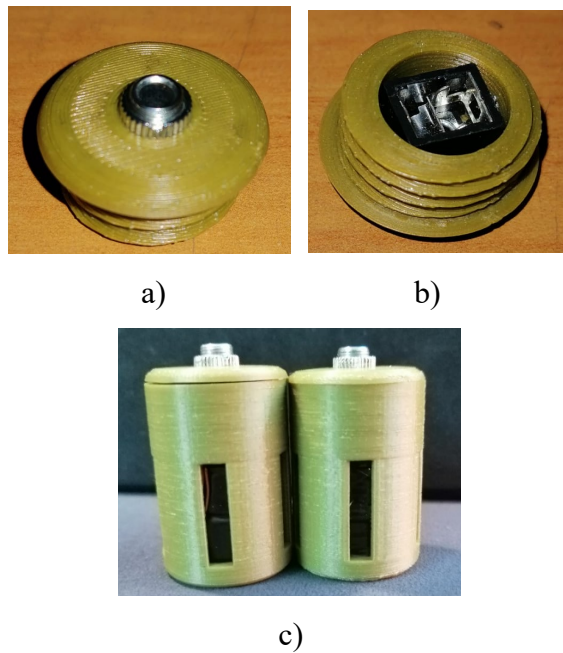


Figura 18 *Partes de la carcasa del actuador con el conector de audio monofónico hembra de 3.5mm **Fuente**. Instalación del conector de audio monofónico de 3.5mm (a, b) y los actuadores completos en el literal c, elaborado por el autor.*


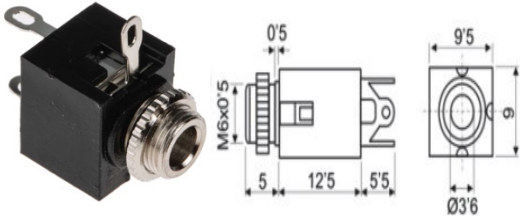
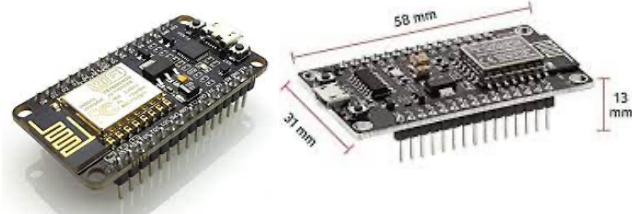
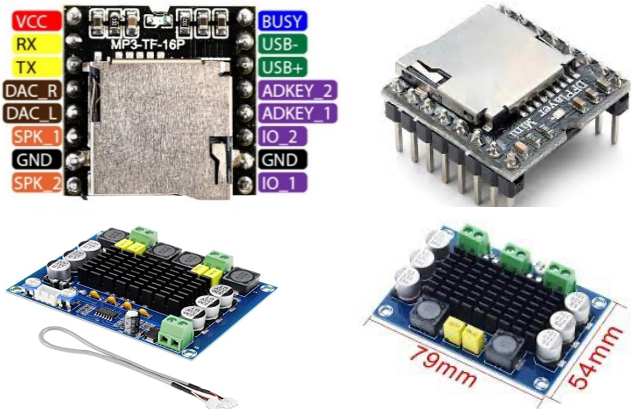

El sistema es desmontable para revisión o cambios de los componentes.

Geometría de los elementos

El diseño de la carcasa, soporte y plataforma electrónica corresponden a las medidas de los elementos indicados en la tabla 11 que van a ser utilizados para la generación de las vibraciones.

Tabla 11

Lista de partes y sus dimensiones

LISTA DE PARTES Y SUS DIMENSIONES			
Parte	Modelo	Dimensiones	Imagen
Actuador (de acuerdo a (Remache-Vinueza B. et al., 2022)	Voice-Coil	20*28 mm	
Conector de audio monofónico hembra	3.5 mm	9* 9 * 9 mm	
WIFI para Arduino	ESP8266	58*31*13mm	
Modulo Mp3	MP3-TF-16P	20.8*20.8 m	
Amplificador	TPA 3116D2	79*54m	

Nota. En la tabla 11 se encuentra el listado de partes que conforman la interfaz vibrotáctil que a su vez se instala en la plataforma de experimentación.

Cada uno de estos componentes forma parte de la interfaz vibrotáctil. El componente electrónico está compuesto por los siguientes elementos: módulo wifi para Arduino, módulo MP3 y amplificador.

ESP8266: módulo WIFI para Arduino

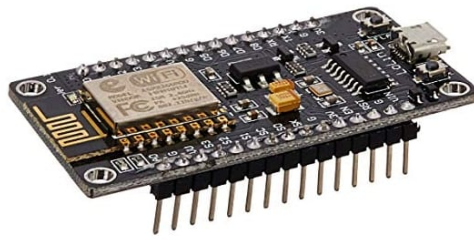


Figura 19 *Modulo WIFI para arduino* **Fuente.** Adaptado de *Programafacil.com*, *placa electrónica Arduino con módulo wifi*, <https://programafacil.com/podcast/esp8266-wifi-coste-arduino/>

El ESP8266 (figura 19) contiene un chip de bajo costo con un micro controlador que se alimenta con 3.3v y dispone de un procesador Tensilica Xtensa LX106 de 80 Mhz y una memoria RAM de 64 KB para instrucciones y 96 KB para datos (Hernández, 2019).

Este módulo procesa las señales digitales cargadas en la micro SD y las dirige a un amplificador de señal.

Mini modulo MP3 (MP3-TF-16P)



Figura 20 *Modulo MP3* **Fuente.** Adaptado de *Universidad Salesiana*, por *Asmal Arias*, 2019, <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17383>

El módulo MP3 de la figura 20 ejecuta archivos de audio desde una tarjeta micro-SD, con voltaje de operación flexible de 3.3V a 5V. Se usa en aplicaciones que emiten sonidos, estos pueden ser música, voz o efectos de sonido en general en formatos MP3 y WMV (Asmal Arias, 2019).

Modulo amplificador de audio Digital (TPA 3116D2)

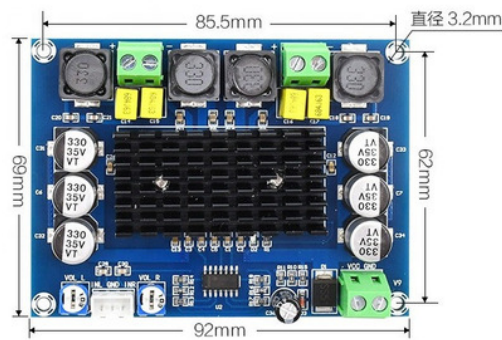


Figura 21 Modulo amplificador *Fuente*. Adaptado de YIC International CO, amplificador de señal, 2019, <https://www.yic-electronics.es/pdf/TI/TPA3116D2.html>.

El módulo amplificador de sonido estéreo TPA3116D2 (figura 21) posee dos canales de 120W. Este módulo amplifica señales de sonido de computadores, celulares, tabletas, iPod, MP3, entre otros (YIC Electronics, 2019).

Se realizó la instalación sobre una placa madre que intercomunica a todos los componentes como se indica en la figura 22.

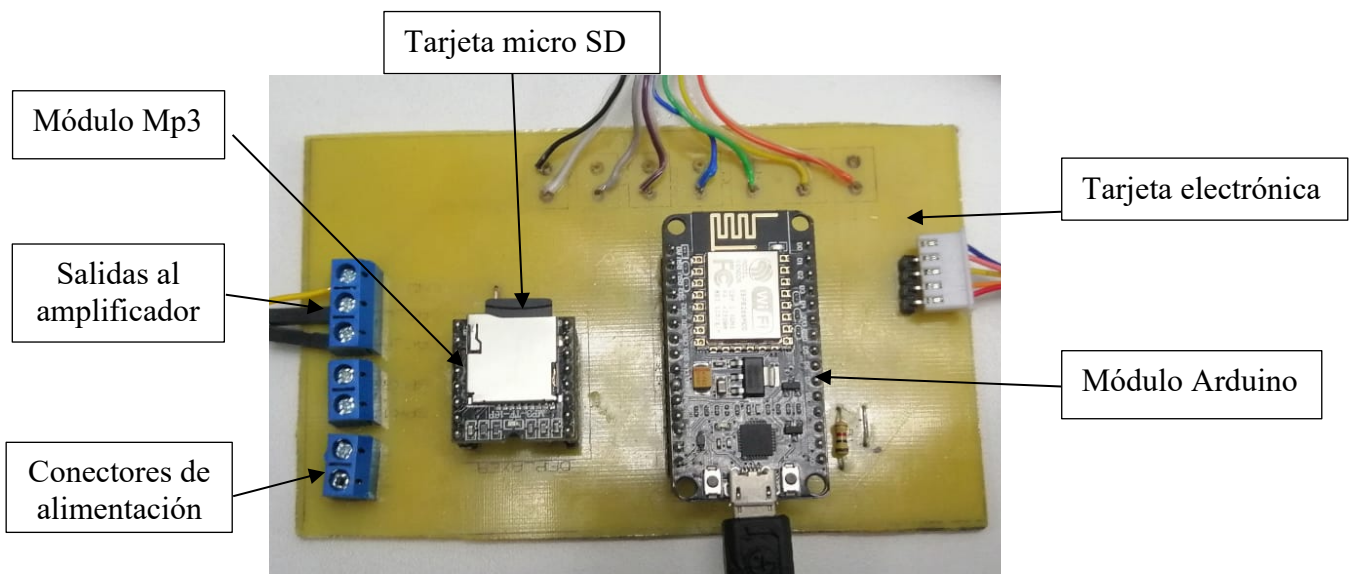


Figura 22 Placa electrónica *Fuente*. placa electrónica con todos los componentes electrónicos soldados, elaborado por el autor.

Validación del prototipo

Para validar el funcionamiento del prototipo se diseñó un experimento que utiliza ilusiones táctiles para indicar dirección en una simulación de navegación en ciclismo urbano. A su vez, se busca determinar cuál de las ilusiones táctiles transmite mejor la información. Las hipótesis que se busca probar se describen a continuación:

Hipótesis

1. El prototipo transmite diferentes tipos de ilusiones táctiles.
2. Entre las ilusiones táctiles Cutaneous Rabbit (CR), Phantom Motion (PM) y Funneling (FUN) implementadas, cada una transmite la información de dirección con diferente nivel de claridad.
3. Las ilusiones táctiles Cutaneous Rabbit (CR), Phantom Motion (PM) y Funneling (FUN) implementadas, generan diferentes niveles de distracción.

Plataforma Experimental

Esta plataforma se encarga de brindar una experiencia mediante ilusiones táctiles complementadas con diferentes tipos de retroalimentación tales como visuales, auditivas y mecánicas para así tener una mejor inmersión en la simulación.

Retroalimentación vibrotáctil

Soporte de actuador

La plataforma de experimentación es un sistema de simulación de andar en bicicleta por la ciudad, por lo tanto, es necesario generar un soporte (figura 23) para los actuadores, que permita la interacción del dispositivo con la plataforma. Con ese objetivo, se desarrolló un sistema de acople (Anexo 4 plano 1.3) que permite la instalación de los actuadores en el manubrio de la bicicleta y su contacto con las manos.

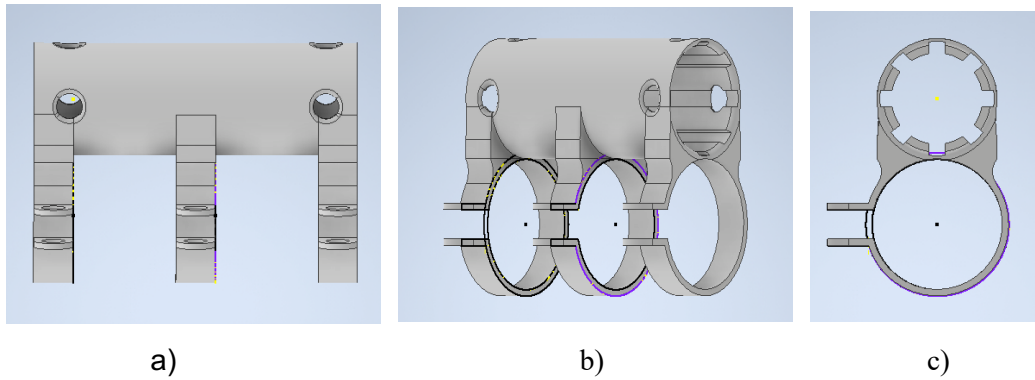


Figura 23 *Diseño de soporte para el actuador Fuente. Diseño frontal literal a) vista inclinada literal b) vista lateral c).* elaborado por el autor.

Una vez determinado el modelo del soporte se realiza otra matriz de priorización para determinar el material, utilizando el mismo listado de materiales previamente establecido (tabla 12).

Tabla 12

Criterios para determinar prioridad de diseño del soporte del actuador

Criterios	
1	Durable
2	Económico
3	Ligero
4	Flexible

Fuente. Adaptado de *Los materiales en la ingeniería y sus propiedades*, por Ashby y H. Jones, (2009), pág. 29-91, Editorial Reveté S.A., elaborado por el autor.

Evaluación para la selección del material para el soporte

Para tener una correcta evaluación de los criterios si cumple perfectamente o cumple levemente se atribuye una ponderación:

- Sumamente importante = 9
- Mas importante = 7
- Igual de importante = 5
- Menos importante = 3
- Levente importante = 1

Para la valoración se comienza por las filas y en la celda de esta matriz se plantea la siguiente pregunta:

¿Cuál es la importancia del criterio en la fila con respecto al criterio de la columna en la misma fila?

Tabla 13

Priorización de criterios para selección de elementos

Criterios	Durable	Económico	Ligero	Flexible	Suma	%
1 Durable		5	5	7	17	24
2 Económico	5		7	7	19	26
3 Ligero	3	5		7	15	21
4 Flexible	9	7	5		21	29
TOTAL					72	100%

De la Tabla 13 se ha definido que los principales criterios: Flexible, económico y durable, son igual de trascendentales y se encuentran con el mayor porcentaje de importancia puesto que el diseño del soporte del actuador debe ser lo más flexible posible con bajo costo de fabricación y durable.

Para que la elaboración de la matriz permita seleccionar el mejor material de construcción de la propuesta, se debe responder a la siguiente pregunta:

¿En qué medida *la alternativa que se encuentra en la fila cumple con el criterio evaluado, con relación a la alternativa que se encuentra en la columna respectiva?*

Para tener una correcta evaluación de los criterios si cumple perfectamente o cumple levemente se atribuye una ponderación:

- Cumple perfectamente = 9;
- Cumple más que otros materiales = 7;
- Cumple igualmente que los otros materiales = 5;
- Cumple menos que los otros materiales = 3;
- Cumple levemente a diferencia de los otros materiales = 1;

Tabla 14*Evaluación Durable vs Alternativas*

	Fibra de carbono	Aluminio	Plástico PLA	Plástico ABS	Plástico TPU		
DURABLE	1	2	3	4	5	Suma	%
1 Fibra de carbono		3	5	5	3	16	19
2 Aluminio	7		7	7	3	24	28
3 Plástico PLA	3	1		5	5	14	16
4 Plástico ABS	3	1	3		3	10	12
5 Plástico TPU	9	3	5	5		22	26
					Total	86	100%

De la Tabla 14 se define que el material más durable es el aluminio seguido por el plástico TPU y la fibra de carbono, elaborado por el autor.

Tabla 15*Evaluación Económico vs Alternativas*

	Fibra de carbono	Aluminio	Plástico PLA	Plástico ABS	Plástico TPU		
ECONÓMICO	1	2	3	4	5	Suma	%
1 Fibra de carbono		3	1	1	1	6	7
2 Aluminio	7		3	3	3	16	20
3 Plástico PLA	7	5		5	3	20	24
4 Plástico ABS	7	5	3		3	18	22
5 Plástico TPU	7	5	5	5		22	27
					Total	82	100%

De la Tabla 15 se define al Plástico TPU como el material más económico seguido del plástico PLA y ABS, ya que es un material barato, elaborado por el autor.

Tabla 16*Evaluación Ligero vs Alternativas*

	Fibra de carbono	Aluminio	Plástico PLA	Plástico ABS	Plástico TPU		
LIGERO	1	2	3	4	5	Suma	%
1 Fibra de carbono		5	3	3	1	12	16
2 Aluminio	3		3	3	1	10	13
3 Plástico PLA	5	5		5	3	18	24
4 Plástico ABS	3	3	5		5	16	21
5 Plástico TPU	7	7	3	3		20	26
					Total	76	100%

De la Tabla 16 se define que el plástico TPU es el más ligero por la composición del material, elaborado por el autor.

Tabla 17*Evaluación flexible vs Alternativas*

		Fibra de carbono	Aluminio	Plástico PLA	Plástico ABS	Plástico TPU		
	FLEXIBLE	1	2	3	4	5	Suma	%
1	Fibra de carbono		3	5	5	5	18	18
2	Aluminio	1		1	1	1	4	4
3	Plástico PLA	3	7		5	5	20	20
4	Plástico ABS	5	7	5		5	22	22
5	Plástico TPU	9	9	9	9		36	36
							Total	100
								100%

De la Tabla 17 se define al plástico TPU como el mejor material en comparación a los otros por sus propiedades elásticas, elaborado por el autor.

El resultado de la evaluación de los materiales de fabricación con respecto a sus distintas alternativas detalladas en las Tablas 14,15,16 y 17, muestran que cuando se considera la durabilidad el aluminio y la fibra de carbono son los mejores, sin embargo, los plásticos tienen mejores características en cuanto a costo, peso y flexibilidad.

Tabla 18*Matriz final de priorización*

		Durable	Económico	Ligero	Flexible	%
		28%	27%	26%	36%	
1	Fibra de carbono	19	7	16	18	15%
2	Aluminio	28	20	13	4	16%
3	Plástico PLA	16	24	24	20	22%
4	Plástico ABS	12	22	21	22	19%
5	Plástico TPU	26	27	26	36	28%
	TOTAL	100%	100%	100%	100%	100%

El resultado final de la Tabla 18, demuestra que el TPU tiene las mejores características para la fabricación del soporte de la carcasa, por su flexibilidad, bajo costo y peso, elaborado por el autor.

El TPU se valoró en una matriz de priorización en la tabla 18 en la cual sobresale por sus características flexibles iguales a las empuñaduras del volante. Este material permite mayor durabilidad y resistencia por sus cualidades elásticas. Estas características extienden la vida útil y facilitan su montaje. Este acople cuenta con perforaciones y canales de ventilación para mantener el sistema a una temperatura de funcionamiento adecuada.

Interfaz vibrotáctil

Las ilusiones táctiles se generaron de acuerdo con lo propuesto en Remache-Vinueza B. et al., (2022) y se exportan como archivos de audio que luego se guardan en una tarjeta micro SD que se inserta en el módulo Mp3 de la placa electrónica. Una vez que se detecta la tarjeta, el módulo Arduino identifica la información guardada en la misma y proyecta en la pantalla cuales son las variables que se pueden reproducir. Se procede a seleccionar el tipo de ilusión, así como la dirección, a la derecha o a la izquierda (véase el código de programación en el Anexo 3).

Una vez que se identifica se presiona el botón que corresponde a la ilusión y dirección, la cual genera una señal digital que indica cual se debe procesar y enviar al amplificador para ser reproducida en los actuadores, este proceso se ilustrado en el diagrama de flujo en la figura 24.

Las tres señales a ejecutar están definidas por el tipo de ilusiones táctiles que se utilizarán en el experimento: Phantom motion (PM), cutaneous rabbit (CR) y funneling (FN).

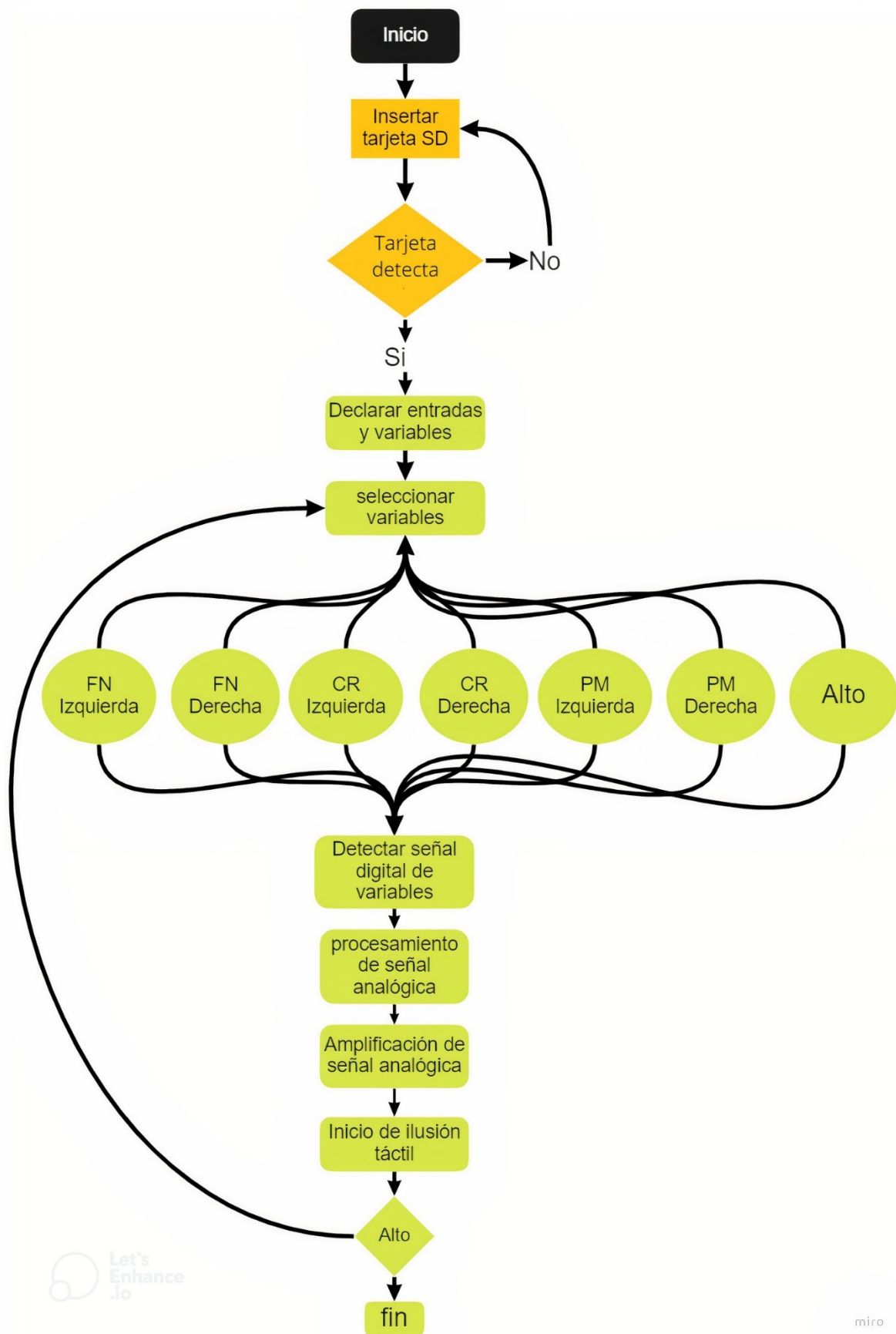
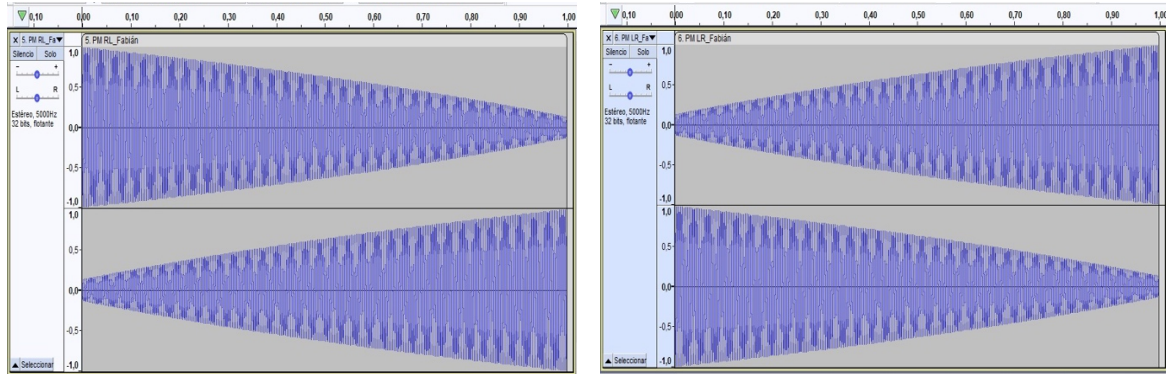


Figura 24 Diagrama de flujo Fuente. Se detalla el diagrama de flujo para la ejecución de las ilusiones táctiles, elaborado por el autor.

Phantom motion

En la figura 25 se puede identificar un movimiento fantasma o aparente. Mediante dos actuadores se genera una sensación de movimiento continuo que se traslada de un actuador a otro mediante la vibración (Jadán Altamirano, 2021).



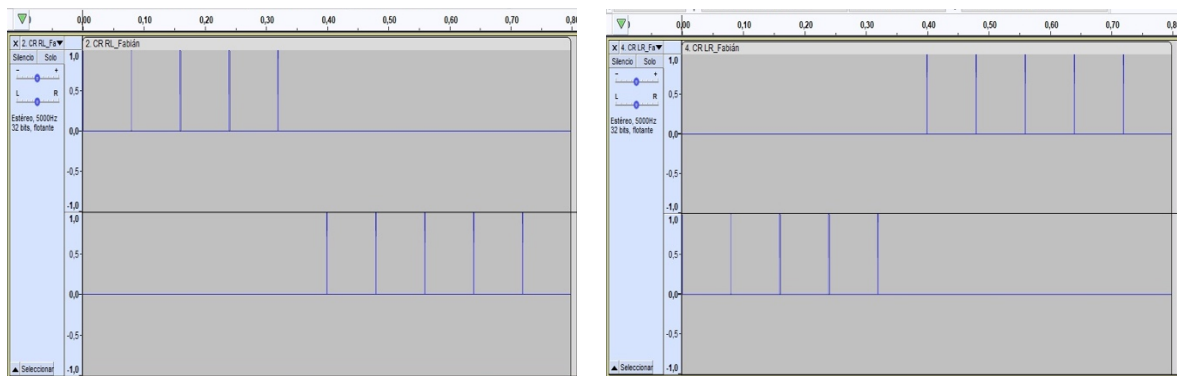
a)

b)

Figura 25 Phantom motion reproducidas en Audacity **Fuente**. Señales de modelo Phantom motion en el literal a) se indica un estímulo de izquierda a derecha y en el b) de derecha a izquierda Remache-Vinueza B. et al. (2022),. elaborado por el autor.

Cutaneous rabbit

Mediante dos actuadores vibrotáctiles se genera una sensación ilusoria de un conejo saltando a manera de pulsos entre los dos estimuladores reales como se presenta en la figura 26 (Jadán Altamirano, 2021).



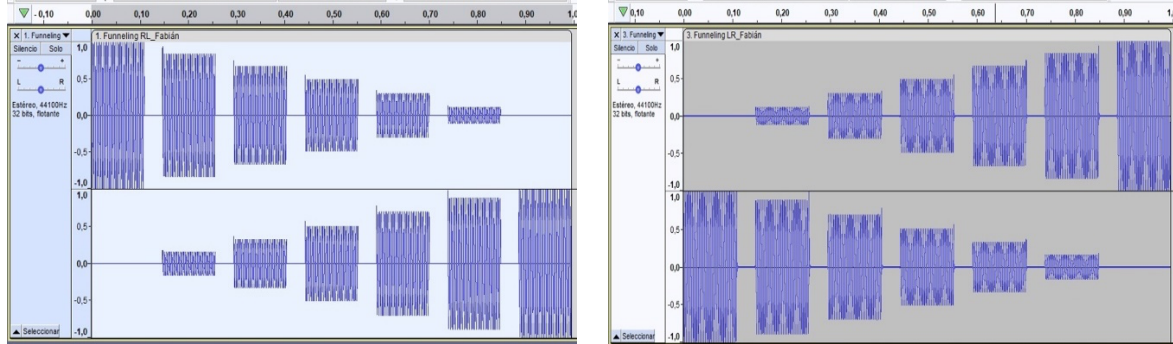
a)

b)

Figura 26 Cutaneous rabbit reproducido en Audacity **Fuente**. Señales de modelo Cutaneous rabbit en el literal a) se indica un estímulo de izquierda a derecha y en el b) de derecha a izquierda (Tren, 1972). elaborado por el autor.

Funneling

Ilusión canalizadora (figura 27), involucra dos actuadores que vibran con diferente intensidad y son capaces de crear un tercer punto intermedio, cuya posición se determina en función de la variación de la intensidad de las dos vibraciones (Jadán Altamirano, 2021).



a)

b)

Figura 27 Funneling reproducido en Audacity **Fuente**. Señales de modelo Cutaneous rabbit en el literal a) se indica un estímulo de izquierda a derecha y en el b) de derecha a izquierda Remache-Vinueza B. et al., (2022). elaborado por el autor.

Los parámetros de funcionamiento para las ilusiones táctiles son de 250Hz los cuales corresponden al pico de percepción de vibraciones en la piel Remache-Vinueza B. et al., (2021). De igual forma el tipo de onda y duración se encuentran detallados en la tabla 19.

Tabla 19

Parámetros de ilusiones táctiles.

	Phantom Motion	Funneling	Cutaneous Rabbit
Tipo de onda	Sinusoidal	Sinusoidal	Pulsos
Frecuencia	250Hz	250Hz	No aplica
Duración	1 segundo	0.1 segundos cada actuador ilusorio, 1 segundo de duración total	Pulsos de 0.002 segundos, 1 segundo de duración total (Tren, 1972)
Dirección	De izquierda a derecha De derecha a izquierda	De izquierda a derecha De derecha a izquierda	De izquierda a derecha De derecha a izquierda

Fuente. Parámetros de funcionamiento para los actuadores FM, CR y FN, elaborado por el autor.

Retroalimentación visual

Para el sistema de retroalimentación visual se usó una televisión de 30" de alta definición donde se proyectó un video de la conducción de una bicicleta por las calles de una ciudad. En dicho video se pudo identificar diferentes intersecciones y obstáculos como automóviles, motos y buses.

Retroalimentación auditiva

Se utilizaron audífonos con aislamiento de sonido que permitieron centrar la atención de los participantes en el video. Esto mejoró la inmersión de los participantes en la simulación de conducción de bicicleta (figura 28).

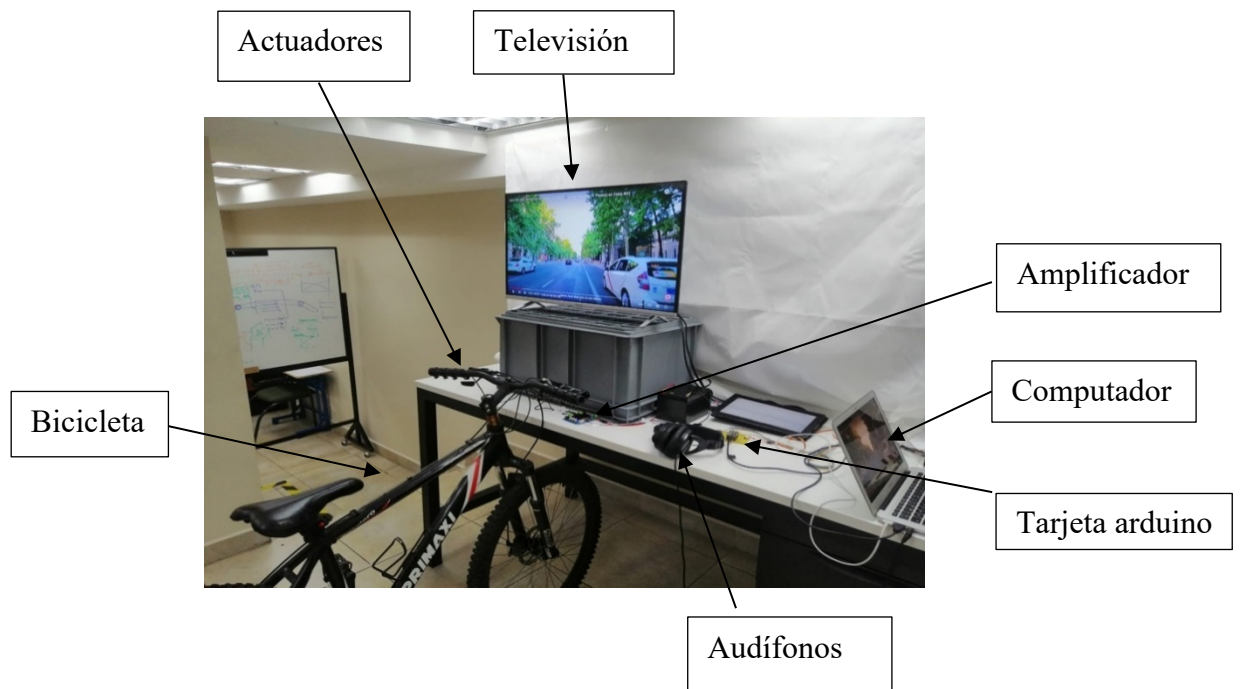


Figura 28 Plataforma experimental **Fuente**. Se indican los componentes principales de la plataforma experimental, elaborado por el autor.

Bicicleta estática con sistema de fuerza y retroalimentación vibrotáctil

Una bicicleta fue instalada en un sistema que le permite permanecer estática y generar fuerza y vibraciones al momento de pedalear. Este sistema cuenta con un eje conectado a un alternador que presiona la llanta posterior de la bicicleta generando resistencia.

Se instalaron los actuadores en el manubrio de la bicicleta (figura 29) con el objetivo de que se puedan percibir las vibraciones generadas por el sistema electrónico, indicando así las instrucciones de dirección.



Figura 29 Volante con actuadores vibro táctiles **Fuente.** Se indica la posición donde están ubicados los actuadores vibrotáctiles, elaborado por el autor.

Estímulos

Los estímulos a evaluar en el experimento corresponden a la direccionalidad teniendo en cuenta que la plataforma simula conexión con un sistema de ubicación para los 3 tipos de ilusiones táctiles. Las diferentes combinaciones entre dirección y tipo de ilusión a probar se encuentran en la Tabla 20.

Tabla 20

Ilusiones táctiles

Ilusiones táctiles	Dirección
Movimiento aparente	De derecha a izquierda
Movimiento aparente	De izquierda a derecha
Actuador ilusorio	De derecha a izquierda
Actuador ilusorio	De izquierda a derecha
Conejo Cutáneo	De derecha a izquierda
Conejo Cutáneo	De izquierda a derecha

Fuente. Ilusiones táctiles utilizadas para el experimento que serán emitidas por los actuadores, elaborado por el autor.

Procedimiento Experimental

Para evaluar la funcionalidad del prototipo se realizó un experimento ciego, aleatorio y controlado en donde cada participante inicialmente mantuvo una sesión de práctica, para luego participar en el experimento principal y finalmente contestar preguntas que indican el nivel de claridad de percepción de los estímulos.

Participantes

El estudio se realizó en un grupo de 23 voluntarios de la Universidad Indoamérica; 20% hombres y 80% mujeres, entre los 18 y los 60 años ($M=20$, $SD= 10.87$), el 100% afirmó que sabe manejar bicicleta.

Los participantes antes de realizar el estudio firmaron un consentimiento en el que se indica el objetivo del experimento, el tiempo de duración y una explicación sencilla del procedimiento.

Sesión de Práctica

El objetivo de esta sesión es permitir que los participantes se familiaricen con las tres ilusiones táctiles. Inicialmente se les explicó cómo funcionan las ilusiones táctiles y se presentaron las 3 a evaluar (CR, PM y FM), ante la señal el participante tiene cuatro alternativas de respuesta sobre la claridad con que la percibió: muy clara, clara, poco clara e imperceptible. Para esto el participante se sentó y sostuvo en las manos los actuadores vibrotáctiles (figura 30) cuando se reprodujeron las señales y de manera simultánea se les indicó qué tipo de ilusión táctil debían reconocer. Los participantes usaron orejeras y cerraron los ojos para evitar estímulos auditivos y visuales, respectivamente, y favorecer la concentración.



Figura 30 Participante en sesión de práctica sujetando los actuadores vibrotáctiles con las manos, usando orejeras para bloquear los estímulos auditivos y cerrando los ojos para bloquear los estímulos visuales y favorecer la concentración **Fuente.** Estudiante de universidad Indoamérica identificando las ilusiones táctiles. Elaborado por el autor.

Los resultados en la Figura 31 muestran que el 87% de los participantes detectaron como clara y muy clara las ilusiones táctiles PM y FN mientras que el 57% de los participantes detectaron CR de forma poco clara.

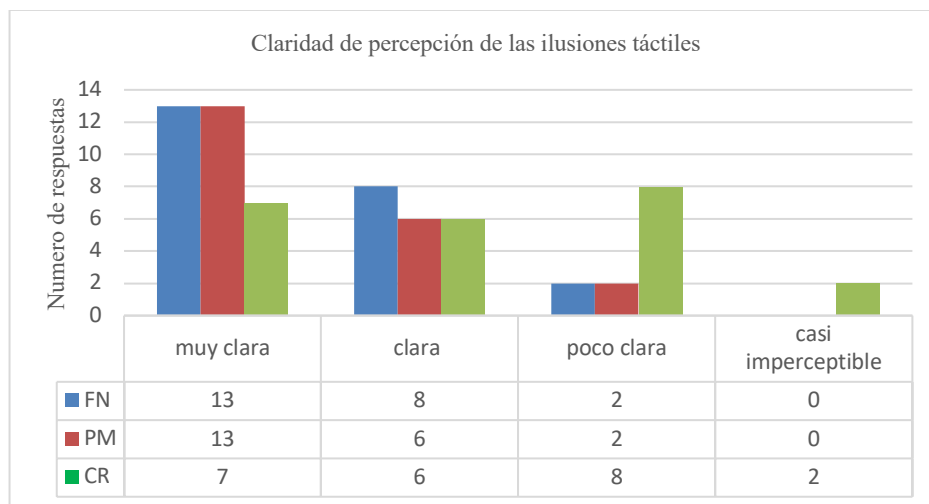


Figura 31 Claridad de percepción de las ilusiones táctiles **Fuente.** Resultados de nivel de claridad con la que se percibieron las ilusiones táctiles elaborado por el autor.

Discusión y conclusión

Se puede concluir que la mayoría de los participantes pudieron identificar las ilusiones táctiles FN y PM en el nivel de muy clara (87%) infiriendo que existe una adecuada percepción. Por otra parte, CR presenta una mayor cantidad de respuestas en poco clara (57%) lo que implica que, bajo las mismas condiciones de experimentación, CR se percibe con menor claridad, similar a los resultados obtenidos en Raisamo et al., (2019) quienes concluyeron que los estímulos continuos (como FN y PM) son estadísticamente diferentes a los estímulos tipo pulso (como CR), donde además los estímulos continuos fueron correctamente identificados para un 87% de la muestra mientras que los estímulos de salto únicamente tuvieron un 60% de respuestas correctas.

Sesión Experimental

Al iniciar el experimento el participante se sube a la bicicleta, se coloca los audífonos, sujeta el volante y comienza a pedalear cuando el video empieza a reproducirse. El video corresponde a una grabación de un ciclista viajando en una ciudad el cual tiene giros a la izquierda y a la derecha. El orden de presentación de los estímulos mostrados en la tabla 20 es aleatorio. El participante cuenta con un tiempo adecuado para detectar (o no) la ilusión y su dirección, luego de lo cual se detiene el video y se realizan las siguientes preguntas:

1. ¿Qué dirección le indicó el estímulo? Siendo las posibles respuestas izquierda, derecha o ninguna.
2. ¿Con qué nivel de claridad percibió la indicación de dirección? Siendo las posibles respuestas una calificación numérica de cero a diez donde cero es no sintió nada y diez sintió mucho.
3. ¿En qué nivel el estímulo vibrotáctil le distrajo de la actividad de conducción virtual? Siendo las posibles respuestas una calificación numérica de cero a diez donde cero es no le distrajo nada y diez le distrajo mucho.

RESULTADOS

Cada participante otorgó 2 respuestas derecha o izquierda dependiendo de la dirección que percibía tanto para FM, CR y PM. Dando un total de 46 respuestas, 2 por cada dirección en los 23 participantes.

Los resultados de las preguntas sobre la dirección, el nivel de claridad y nivel de distracción para cada ilusión se presentan en las gráficas de la 32 a la 34 respectivamente.

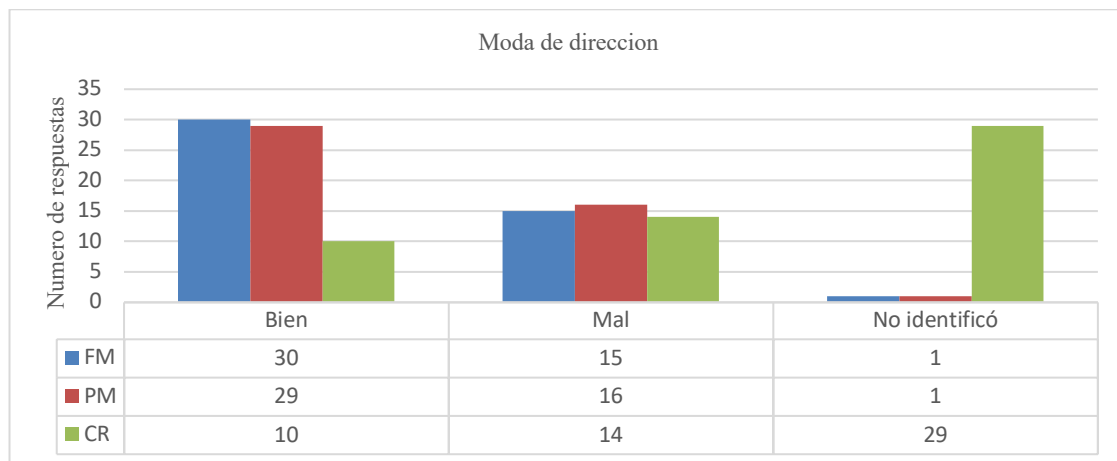


Figura 32 Moda de dirección. **Fuente.** Moda de dirección de las señales FN, CR y PM elaborado por el autor.

Es posible determinar que la mayoría de los participantes perciben correctamente la dirección de las ilusiones táctiles a través del prototipo para FN (67%) y PM (64%), sin mayor diferencia entre ellas, mientras que los aciertos para la ilusión táctil CR son menores (22%) (Figura 32).

Los resultados para CR son consistentes en cuanto al nivel de claridad ya que el promedio de la evaluación de la claridad es $M = 2.54$, $\sigma = 3.11$, mientras que para las ilusiones táctiles FN y PM los promedios de valoración de claridad son más altos: $M= 6.69$, $\sigma= 2.45$ y $M= 7.89$, $\sigma = 1.88$, respectivamente (Figura 34 y 35).

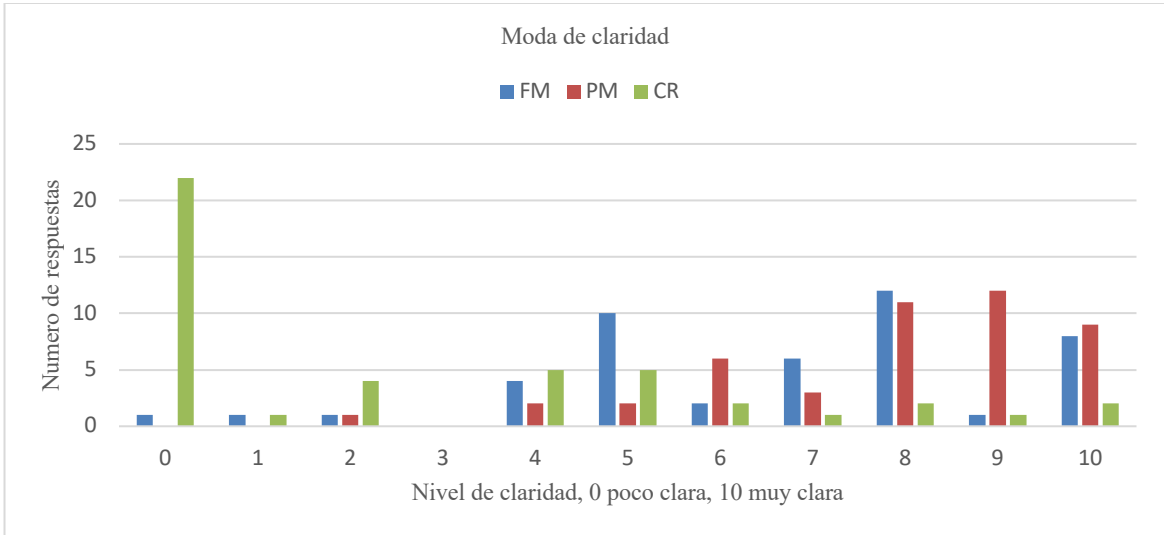


Figura 33 Moda de intensidad. **Fuente.** Moda de intensidad de las señales FN, CR y PM elaborado por el autor.

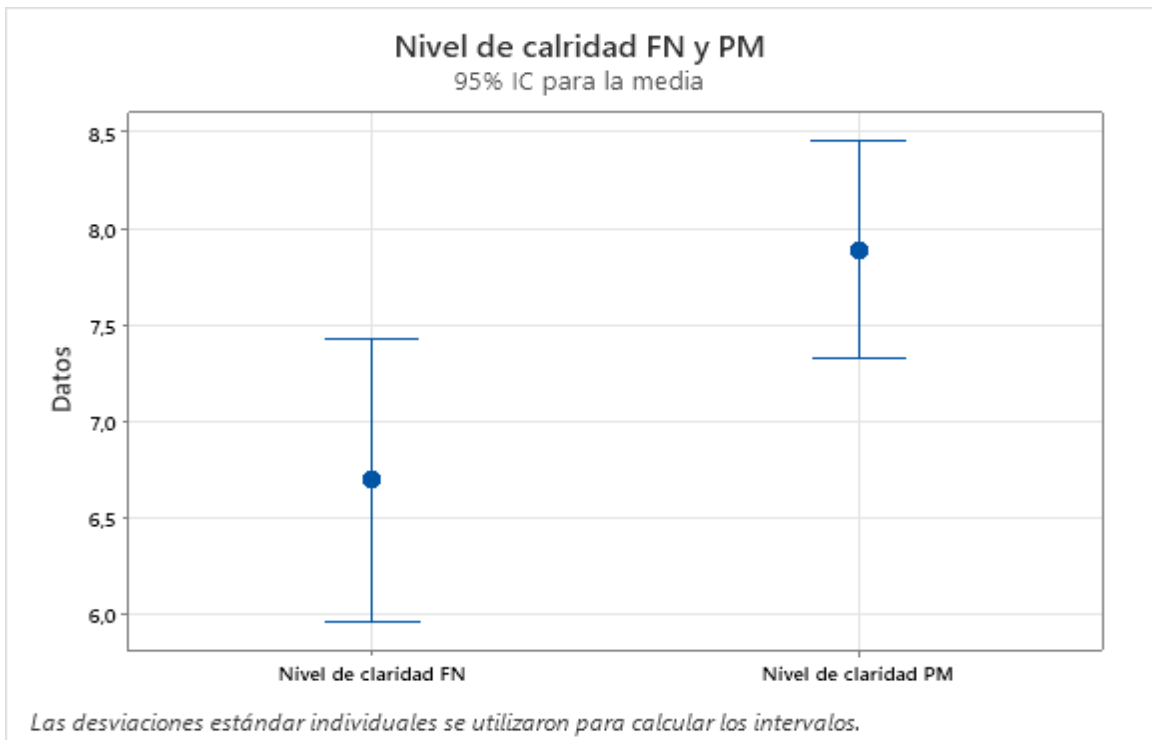


Figura 34 Nivel de claridad FN y PN **Fuente.** Gráfico de los niveles de claridad para FN y PM mediante minitab. elaborado por el autor.

Para CR el promedio de nivel de distracción es de $M=0.47$, $\sigma= 1.42$ mientras que para FN el promedio es de $M= 1.34$, $\sigma= 2.42$) y para PM el promedio es de $M= 0.84$, $\sigma= 1.96$ respectivamente (Figura 35 y 36).

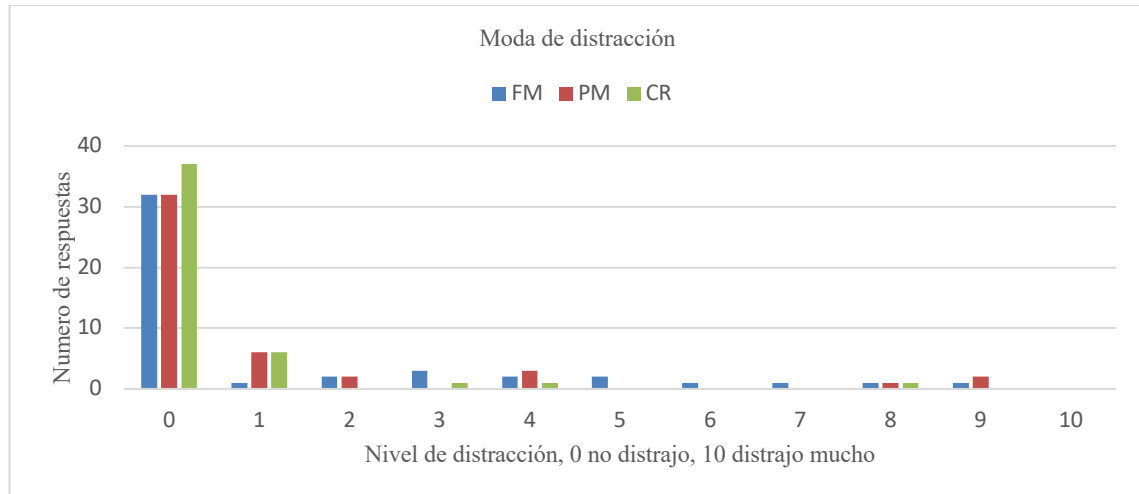


Figura 35 Moda de distracción. *Fuente* Moda de distracción de las señales FN, CR y PM elaborado por el autor.

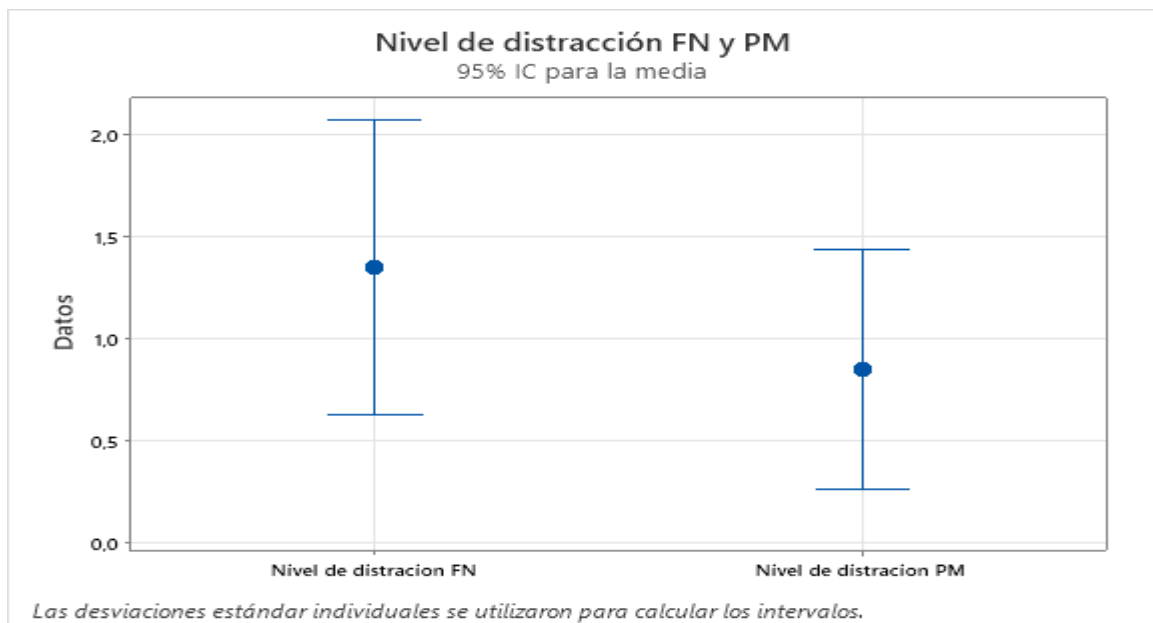


Figura 36 Nivel de Distracción FN y PM *Fuente.* Gráfico de los niveles de distracción para FN y PM mediante minitab. elaborado por el autor.

Para simplificar el análisis, y con base en la estadística descriptiva mostrada en las figuras de la 32 a la 36, se considera que CR no es una ilusión táctil que en combinación con el prototipo funcione adecuadamente para la aplicación de indicaciones de dirección en una simulación de ciclismo urbano. Para determinar si FN y PM son significativamente diferentes; teniendo en cuenta que los datos para dirección son muy similares, se analizan los otros dos atributos: nivel de claridad y nivel de distracción. Esto último mediante una prueba T de Wilcoxon para datos no paramétricos en condiciones probadas en el mismo grupo de personas, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 21.

Tabla 21*Prueba T de Wilcoxon*

Muestras	Prueba	Valor de T	Valor crítico	Valor de N	Confianza
Claridad	46	28	200	34	95.05%
Distracción	46	55	60	20	95.05%

Fuente. Desarrollo de método t de Wilcoxon en Minitab, elaborado por el autor.

De esta prueba estadística es posible determinar que ambos atributos son estadísticamente representativos para tomar la decisión sobre cuál de las dos ilusiones táctiles trabaja mejor para el prototipo (ambos valores de T son inferiores al valor crítico). Comparando los valores de promedio y desviación estándar para las dos ilusiones reportados arriba, es posible concluir que PM es la mejor ilusión para el prototipo diseñado ya que su media de claridad es superior, su media de distracción es inferior y ambas desviaciones estándar son menores comparadas con FN.

Tabla 22

Cronograma de implementación de la propuesta

ACTIVIDAD	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
Investigación de sistemas vibratorio y aplicaciones	■															
Identificación de aplicación en sistemas vibratorios de geo navegación		■	■													
Diseño de la carcasa en programa CAD del sistema vibratorio tipo voice coil				■												
Manufactura en impresión 3D de la carcasa para el sistema vibratorio voice coil					■											
Diseño de pruebas para la carcasa para el sistema vibratorio						■	■									
Diseño del soporte de la carcasa al volante de la bicicleta en programa CAD								■								
Manufactura en impresión 3D del soporte al volante de la bicicleta								■	■							
Pruebas de acoplamiento del soporte a la bicicleta										■						
Diseño de plataforma experimental											■	■				
Desarrollo de preguntas para pruebas experimentales													■			
Desarrollo de pruebas experimentales														■		
Análisis de datos																■
Redacción de conclusiones y recomendaciones																■

Nota. Se realizará el diagrama Gantt con las actividades antes trazadas, se señala el itinerario que debe cumplir y se indica un promedio de la duración, elaborado por el autor.

ANÁLISIS DE COSTOS

En este inciso se analizan todos los costos que se generan al llevar a cabo el diseño, en dichos costos se encuentran consideradas todas las actividades que se deben realizar.

Con las especificaciones técnicas definidas a lo largo de este trabajo de titulación se presenta un promedio del costo de la interfaz vibrotáctil, donde se incluye la impresión de la carcasa, el soporte y de igual forma las importaciones.

Tabla 23

Costos de materiales de la interfaz

Materiales para interfaz				
Material	Cantidad	Costo / Unitario	Costo / Total	
WIFI para Arduino	1	\$ 30,00	\$	30,00
Modulo Mp3	1	\$ 10,00	\$	10,00
Amplificador	1	\$ 15,00	\$	15,00
Pulsadores	6	\$ 0.60	\$	3.60
Placa electrónica	1	\$ 1,00	\$	1,00
Televisor 30"	1	\$ 350,00	\$	350,00
Audífonos	1	\$ 150,00	\$	150,00
Bicicleta	1	\$ 250,00	\$	250,00
Sistema de fuerza bicicleta	1	\$ 100,00	\$	100,00
		TOTAL	\$	819,60

Nota. En la Tabla 23 se muestran los valores resultantes de fabricarla plataforma para la interfaz, elaborado por el autor.

La fabricación de la interfaz vibrotáctil es un costo fijo, aunque se fabriquen los actuadores o se importen ya que el mismo es necesario para poder generar las ilusiones táctiles y de igual forma los estímulos de fuerza, visuales y auditivos.

Tabla 24*Materiales para carcasa de sistema Voice-Coil.*

Materiales para carcasa de sistema Voice-Coil.			
Material	Cantidad	Costo / Unitario	Costo / Total
Impresión 3d de sistema Voice- Coil en ABC	2	\$ 5,00	\$ 10,00
Impresión 3d de carcasa del sistema Voice- Coil ABC	2	\$ 8,00	\$ 16,00
Impresión 3d del soporte de volante de la carcasa en TPU	2	\$ 10,00	\$ 20,00
Cable de cobre N°18	1Kg	\$ 7,00	\$ 7,00
Imanes de 10mm de diámetro	2	\$ 5,00	\$ 5,00
Conector de audio monofónico hembra de 6mm	2	\$ 0,40	\$ 0,80
TOTAL			\$ 58,80

Nota. En la Tabla 24 se muestran los valores resultantes para fabricar actuadores vibrotáctiles tipo Voice-Coil, elaborado por el autor.

Para adquirir estos actuadores vibratorios ya fabricados estos deben ser importados. Un ejemplo de las empresas donde se pueden adquirir es Engineering Acoustics, Inc. ubicada en Estados Unidos, Florida (EAI), la cual es líder tecnológico en el desarrollo y aplicación de sistemas vibrotáctiles y hápticos centrados en el ser humano para aplicaciones de defensa, entretenimiento, simulación, capacitación, aviación y atención médica. Tiene a disposición la venta de actuadores vibrotáctiles de tipo C-2 (Voice-Coil) que son los indicados para este tipo de desarrollo, debido a que generan vibraciones de mayor intensidad. Se requiere así porque la bicicleta genera muchas vibraciones. Una de las desventajas de este proveedor es que para el envío de cualquier producto fuera del estado de Florida, la compra debe ser superior a los \$1000 dólares, aparte se cargan los impuestos de aduanas y nacionalización.

Tabla 25*Costos de importación*

Importación de sistemas vibrotáctiles.			
Material	Cantidad	Costo / Unitario	Costo / Total
Tactor C-2 estándar	5	\$ 200,00	\$ 1000,00
Impuestos y aduanas	2	\$ 19,00	\$ 38,00
		TOTAL	\$ 1038,0

Nota. En la Tabla 25 se muestran los valores resultantes de importar los sistemas vibrotáctiles, elaborado por el autor.

Tabla 26*Costos de fabricación de actuadores e interfaz*

Costos fabricación de los actuadores			
Material	Cantidad	Costo / Unitario	Costo / Total
Fabricación de actuadores	1	\$ 49.80	\$ 49.80
Costo de interfaz	1	\$ 719,60	\$ 719.60
		TOTAL	\$ 719.60

Nota. En la Tabla 26 se muestran los valores resultantes fabricación de los actuadores y la interfaz, elaborado por el autor.

Tabla 27*Costos de importación de actuadores e interfaz*

Costos fabricación de los actuadores			
Material	Cantidad	Costo / Unitario	Costo / Total
Importación de actuadores	1	\$ 49.80	\$ 1038.00
Costo de interfaz	1	\$ 719,60	\$ 719.60
		TOTAL	\$ 2438.60

Nota. En la Tabla 27 se muestran los valores resultantes de la importación de los actuadores y la interfaz, elaborado por el autor.

Comparando los dos costos es posible determinar que la solución presentada en este trabajo de titulación es aproximadamente diez veces más económica que la adquisición de este tipo de dispositivos y con menores complicaciones logísticas, teniendo en cuenta que se evitan trámites aduanales de importación compras mínimas por parte de los proveedores.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES

Se concluye, una vez realizada la revisión del estado del arte, que los elementos necesarios para el diseño de un prototipo de interfaz háptica que se requieren son los siguientes: actuador, carcasa del actuador, soporte del actuador, conector de audio monofónico hembra, WIFI para Arduino, modulo Mp3 y amplificador. Estos componentes se encuentran en correspondencia con los últimos avances de la ciencia.

Con la metodología propuesta se realizó el diseño de la carcasa del actuador y el soporte del mismo tomando en consideración: para el actuador una altura de 20mm y 28mm radio; para el conector de audio hembra de 3.5mm una altura de 9mm, 9mm de largo y 9mm de ancho; el soporte tiene 82mm de largo y 61mm de ancho. Para el modelado se utilizó un software de diseño asistido por computador (CAD), el cual permitió generar los planos dando un soporte fundamental en el nivel de detalle y dimensionamiento de los componentes. Este modelo permite la impresión en 3D lo que facilita su posterior manufactura y ensamble. Tanto los elementos seleccionados, el material y el diseño tuvieron como resultado un prototipo portable, que transmite las vibraciones efectivamente, y cuyos elementos están correctamente acoplados.

Se concluye con la validación de los actuadores en una aplicación de movilidad urbana. Fue necesario el diseño de un experimento ciego, aleatorio y controlado, para el cual se reclutaron 23 personas provenientes de la Universidad Indoamérica, las mismas que firmaron una carta de consentimiento para participar de manera voluntaria en el experimento. Se implementó una plataforma de simulación de conducción de una bicicleta en una ciudad, donde se indican direcciones a través de la interfaz háptica, donde se identificó que para determinar la dirección correcta la ilusión táctil FN obtuvo un 67%, PM 64% y CR 22%. Al determinar que CR no es recomendable para esta aplicación y que FN y PM son igualmente efectivas al transmitir una sensación de dirección, se analizó mediante una prueba de T de Wilcoxon si FN y PM son significativamente diferentes en cuanto a claridad y nivel de distracción. Los resultados indican que PM es la mejor ilusión para esta aplicación ya que se percibe con mayor claridad y produce menor distracción que FN.

Discusión

Con base en los resultados del presente proyecto se demuestra la posibilidad de transmitir instrucciones de dirección mediante ilusiones táctiles a través de una interfaz con actuadores vibrotáctiles, los cuales, según la literatura (Loayza Paredes et al., 2017) pueden aportar al mejoramiento de la navegación en la conducción de una bicicleta o un vehículo.

Se pudo identificar que las ilusiones táctiles FN y PM son las que mejor facilitan la identificación de la dirección. De igual forma en Topòn-Visarrea et al., (2022) se determina que FN es mejor percibida por los participantes, mientras que CR tiene solo pulsos puntuales cortos que se pierden con las vibraciones generadas por la bicicleta, que a su vez provocan confusión en cuanto a la dirección percibida. FN y PM cumplen con el objetivo de claridad en el direccionamiento por lo que se sugiere su aplicación junto con el prototipo en sistemas de ubicación y geolocalización.

El uso de las ilusiones táctiles para entender la eficiencia de la comunicación con el usuario es una novedad para estas aplicaciones; usualmente este tipo de investigaciones se centran en la conexión entre la aplicación y dispositivos de vibración. En el caso de Taipei, (2021), donde como conclusión relevante se reporta que el usuario no entiende con claridad las vibraciones emitidas por los actuadores en un chaleco, se podría complementar con los actuadores y las ilusiones táctiles para mejorar la identificación de las direcciones.

Los costos de fabricación son bajos y representan un ahorro de 10 veces el valor de adquirir los sistemas vibratorios, esto principalmente debido a que estos dispositivos no se encuentran en el mercado local por lo que deben importarse, lo que implica altos costos de nacionalización y aranceles. De manera adicional se exigen compras mínimas que pueden estar relacionadas con valores del flete o con el hecho de que los procesos de manufactura no son en serie o a gran escala, lo que implicaría la existencia de lotes mínimos de producción.

RECOMENDACIONES

Para futuros desarrollos se recomienda tener presente en el diseño y el análisis de la posible resonancia del prototipo entre el actuador y la carcasa, ya que esto provocó 6 modificaciones al modelo, hasta concluir un ajuste perfecto con el actuador, tapa y cuerpo de la carcasa; atributo que no fue considerado en el inicio.

Para poder generalizar los datos de este proyecto se debería replicar el experimento con una muestra más grande y controlando las variables, especialmente en la sesión de práctica donde se identificaron sesgos al obtener niveles de claridad bajos comparados con los obtenidos en otras investigaciones como Raisamo et al., (2017).

También se debe considerar la necesidad de ventilación para el interior de la carcasa en el diseño de los sistemas de sujeción de los actuadores vibrotáctiles al vehículo, esto para evitar el sobrecalentamiento de los mismos que posteriormente puede llevar a la falla del sistema o a riesgos de seguridad para el usuario; no considerar este punto implicó 5 iteraciones adicionales en el desarrollo del presente trabajo.

El encapsulador para el actuador vibrotáctil tipo pila desarrollado es versátil por lo que se puede implementar en otros vehículos como; motos, patines eléctricos o dispositivos personales de ubicación (por ejemplo, brazaletes). Para utilizarlo solo se requeriría el desarrollo puntual del sistema de sujeción para la aplicación, incluso para implementaciones en otras áreas como por ejemplo medicina y rehabilitación.

Este prototipo de interfaz vibrotáctil transmite de manera efectiva indicaciones de dirección, por lo que es posible utilizarlo en cualquier aplicación que requiera transmitir una instrucción mediante vibración; su tamaño y portabilidad permiten el acople a cualquier sistema según la necesidad.

Se recomienda dar continuidad a esta investigación, por ejemplo, diseñando experimentos en un ambiente real controlado para determinar la veracidad de los resultados obtenidos en la simulación propuesta en este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- Ashby , M. F., & H. Jones, D. R. (27 de junio de 2009). *Materiales para ingeniería* (2 ed., Vol. 2). (J. B. Llidó, Trad.) Barcelona: Reverté.
- Asmal Arias, P. A. (abril de 2019). *Prototipo didáctico para la ayuda en el aprendizaje y aplicación del alfabeto Braille de niños no videntes*.
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17383>
- Autodesk. (05 de enero de 2022). *Introduction to Mechanical Engineering Design and Manufacturing with Fusion 360*. Coursea: <https://www.coursera.org/learn/mechanical-engineering-design-manufacturing/home/welcome>
- Ballesteros, S. (2014). *Percepción háptica de objetos y patrones realzados: una revisión*. (U. d. Oviedo, Ed.) Psicothema: <https://www.redalyc.org/pdf/727/72705209.pdf>
- Banco Mundial. (19 de marzo de 2021). *BIRF+AIF*.
<https://www.bancomundial.org/es/topic/disability>
- Barria Bignotti, C. (noviembre de 2019). *Los cinco sentidos del Paisaje. Tacto, olfato, vista, audición y gusto en la teoría del paisaje de Alexander von Humboldt*. Univercidad de Roma: https://www.researchgate.net/profile/Cristobal-Barria-Bignotti/publication/340987986_Los_5_sentidos_del_paisaje_Tacto_olfato_vista_audicion_y_gusto_en_la_teoría_del_paisaje_de_Alexander_von_Humboldt_Lecture_IV_Encuentro_de_Jovenes_Investigadores_en_Teoría
- Blenkinsopp, R. (10 de junio de 2019). *Qué es Hápticos*. ultraleap:
<https://www.ultraleap.com/company/news/blog/what-is-haptics/>
- Carrión, J. B. (julio de 2017). *Diseño de una interfaz para la captura de patrones de vibración hápticos*. E.T.S.I. Industriales (UPM): <https://oa.upm.es/49199/>
- Choi, S., & Kuchenbecker, K. (09 de septiembre de 2019). *VibrotactileDisplay: Perception, Technology and Applications*. Proceedings of the IEEE:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6353870/authors>
- Cruz Sánchez, J. P. (diciembre de 2017). *Incremento de inmersividad en usuarios de entornos de realidad virtual utilizando una interfaz háptica para limitación de movimiento en dedos*. Retrieved 10 de 2022, from Ultraleap: <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/1579>
- Depetris Chauvin, I. (2018). *Mirar y escuchar. Percepción háptica y narrativa sensorial en El limonero real*. Universidad Nacional de Cordoba:
<https://core.ac.uk/display/492738921?source=2>
- Díaz Tribaldos, M. R., Escobar ocampo, J. M., & Vivas Albán, Ó. A. (30 de agosto de 2015). *Interfaz háptica tipo guante con realimentación vibratoria*. Universidad del Cauca, Colombia.: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372015000100003
- Döll Gálvez , A. A. (2013). *La piel como camino al pensamiento*. http://www.atopos.es/pdf_14/24-

- 34_La%20piel%20como%20camino%20al%20pensamiento.pdf
- El Telégrafo. (28 de septiembre de 2017). *La discapacidad auditiva afecta a 360 millones de personas en el mundo*. <https://www.itelegrafo.com.ec/noticias/sociedad/6/la-discapacidad-auditiva-afecta-a-360-millones-de-personas-en-el-mundo>
- Electronics, Ineed. (abril de 2019). *Electronics, Ineed*. (Hong Kong) Limited. y Dongguan Ineed Technology Co.: <http://www.ineed-motor.com/vibration-motor/cylinder-vibration-motor/vibrator-motor.html>
- Fenández, R. (23 de julio de 2022). *Número de usuarios de realidad aumentada móvil en el mundo 2019-2024*. Statista: <https://es.statista.com/estadisticas/599951/numero-de-usuarios-de-realidad-aumentada-movil-en-el-mundo/>
- Gago Alegre, G. (29 de agosto de 2017). *Estudio de la influencia en la resistencia y ductilidad de las fibras de carbono utilizadas como reforzamiento de vigas de concreto armado*. Universidad Católica le Perú: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/9254>
- Guamán Taípe, D. A., & Soto Bermello, K. B. (13 de septiembre de 2021). *Implementación de un sistema de navegación para ciclistas, que le permita llegar a una dirección*. Escuela Politécnica nacional del Ecuador: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21780>
- Hernández, L. (2019). *ESP8266 todo lo que necesitas saber del módulo WiFi para Arduino*. programarfacil: <https://programarfacil.com/podcast/esp8266-wifi-coste-arduino/>
- Hik, F. (2022). *High-speed conducting polymer actuators for thin, flexible vibrotactile displays : fabrication, electro-chemo-mechanical characterization, and feasibility*. University of British Columbia: <https://dx.doi.org/10.14288/1.0413772>
- Hinojosa Iza, J. M., & Raura Díaz, E. A. (febrero de 2018). *Análisis de las propiedades mecánicas de la aleación aluminio AA6063 en el proceso de homogenizado en la Empresa Cedral*. Universidad Técnica de Cotopaxi: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/4503>
- IN Mediaciones. (enero de 2019). *Leer con las manos. Una revisión sobre los estudios hápticos*. <https://doi.org/10.18861/ic.2019.14.1.2890>
- Irusta, M. (2017). *La piel*. El Mundo: https://centroderecursos.educarchile.cl/bitstream/handle/20.500.12246/15196/articles-28945_recurso_pdf.pdf?sequence=1
- Jadán Altamirano, J. I. (agosto de 2021). *Sensory replacement system for the creation of psychophysical sensations of sound sources in space-fixed audio*. Repositorio: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/11185>
- Loayza Paredes, F. R., Arguello Andrade, G. M., & Vaca Benavides, D. A. (08 de diciembre de 2017). *Diseño, construcción y evaluación de dispositivos de estimulación vibrotáctil en extremidades inferiores, para ayudar a pacientes parkinsonianos con problemas de congelamiento de la marcha*. Escuela Superior Politecnica Del Litoral: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/41808?locale=es>

- Losada , O., & Angarita, W. (04 de septiembre de 2018). *Implementación de máquina extrusora Open Hardware de filamento de ácido poliláctico (PLA) para el reciclaje de residuos plásticos de impresión 3d*.
<https://conferences.eagora.org/index.php/tecnoysoc/tech2019/paper/view/6883>
- Marcos-Fernández, Á., León, M., & Rodríguez-Hernández, J. (15 de mayo de 2019). *Elásticos, Impresión 3D con materiales*. (Digital.CSIC, Ed.) DIGITAL.CSIC:
<http://hdl.handle.net/10261/203003>
- Martínez, H., Solaz Sanahuja, J. S., Signes Pérez, E., Soler Valero, A., Palomares Olivares, N., & Jornet, J. (1 de junio de 2018). *Tecnologías hápticas para mejorar la seguridad en la conducción*. Instituto de Biomecánica de Valencia:
https://www.academia.edu/34306373/Tecnolog%C3%ADas_h%C3%A1pticas_para_mejorar_la_seguridad_en_la_conducci%C3%B3n
- Oliver, B., & Ivan, P. (2012). *Tactile Feedback Technology for Augmented Reality*. <https://s3-us-west-1.amazonaws.com/disneyresearch/wp-content/uploads/20141222202845/REVEL.pdf>
- Paiba Diaz, C. Y. (08 de mayo de 2020). *Implementar un bastón inteligente para facilitar la identificación de objetos circundantes y productos de un almacén para la población invidente*. Universidad Santo Tomás.: <http://hdl.handle.net/11634/29849>
- Pasquale, J. A. (agosto de 2021). *Facultad de Informática*. Univercidad Nacional de la Plata:
<file:///Users/alecanoacosta/Downloads/Tesina%20Julian%20Pasquale.pdf-PDFA.pdf>
- Porras Solorzano, J. P. (11 de noviembre de 2018). *Diseño de una máquina recicladora orientada a la producción de filamentos de plástico ABS para la impresión 3D en la PUCP*. Univercidad católica del Perú: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/13008>
- Quenta Silva, E. (febrero de 2019). *Simulación clínica, Realidad virtual háptica (RVH): Herramienta docente para la enseñanza en estomología*. Universidad Peruana Cayetano Heredia, Perú: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=421564248002>
- Raisamo, J., Raisamo, R., & Surakka, E. (21 de julio de 2017). *Comparison of Saltation, Amplitude Modulation, and a Hybrid Method of Vibrotactile Stimulation*. 10.1109/TOH.2013.25
- Ramos, O. S. (noviembre de 2019). *Los sentidos del cuerpo*. Universidad Nacional Autónoma de México: <https://cieg.unam.mx/detalles-libro.php?l=MTM0>
- Remache-Vinueza B., Trujillo-León, A., Clim, M. A., Sarmiento-Ortiz, F., Topon-Visarrea, L., Refsum Jensenius, A., & Vidal-Verdú, F. (18 de agosto de 2022). *Mapping Monophonic MIDI Tracks to Vibrotactile Stimuli Using Tactile Illusions*. SpringerLink:
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-15019-7_11
- Remache-Vinueza B., Trujillo-León, A., Zapata, M., Sarmiento-Ortiz , F., y Vidal-Verdú , F. (30 de septiembre de 2021). *Audio-Tactile Rendering: A Review on Technology and Methods to Convey Musical Information through the Sense of Touch*. MDPI:
<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/19/6575>

- Romero Muñiz, E. F. (octubre de 2018). *Diseño de un sistema de retroalimentación háptico*. Universidad católica del Perú para una prótesis mioeléctrica transradial de miembro superior: <https://core.ac.uk/download/pdf/196534218.pdf>
- Rumbo Barros, I. M. (junio de 2018). *Interfaz háptica de cuatro grados de libertad para cirugía Laparoscópica: diseño*. La Universidad Pontificia Bolivariana: <https://repository.upb.edu.co/browse?value=Rumbo%20Barros,%20Iliana%20Mar%C3%ADa&type=author>
- Salas Noain, D., Delgado Del Casillo, M. A., & Subauste Oviden, D. A. (01 de diciembre de 2020). *Videojuego de realidad virtual para realizar ejercicios en bicicleta estacionaria mediante el uso de un sistema de detección de movimiento y visor Google Cardboard*. Repositorio Academico UPC: <http://hdl.handle.net/10757/655365>
- Sandoval-Gonzalez, O. O., Guadalupe Salas , L., Herrera Aguilar, I., & Tripicchio, P. (09 de mayo de 2017). *Diseño y desarrollo de un sistema vibrotáctil utilizado en un robot planar para la rehabilitación de las extremidades superiores*. ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/262143977_Diseño_y_desarrollo_de_un_sistema_vibrotactil_utilizado_en_un_robot_planar_para_la_rehabilitacion_de_las_extremidades_superiores
- Slawiński, E., Mut, V. A., & Penizzotto, F. (noviembre de 2018). *Sistema de Alerta al Conductor Basado en Realimentación Vibro-Táctil*. Universidad Nacional de san juan: https://www.researchgate.net/publication/270007339_Sistema_de_Alerta_al_Conductor_Basado_en_Realimentacion_Vibro-Tactil
- Tirumala Bukkapatnam, A. (17 de febrero de 2020). *Definición de un conjunto de herramientas vibrotáctiles para instrumentos musicales digitales: caracterización de actuadores de bobina móvil, efectos de carga y ecualización de la respuesta de frecuencia*. SpringerLink: <https://doi.org/10.1007/s12193-020-00340-0>
- Topòn-Visarrea, B., Iza, C., Arteaga , G., & Remache , B. (22 de noviembre de 2022). *Desing of a portable interface for vibrotactile feedback applications*. SpringerLink: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-19679-9_12
- Torres Castillo, J. R., Pérez Lomelí, J. S., Camargo Casallas, E., & Padilla Castañeda, M. Á. (junio de 2018). *Dispositivo háptico vibrotáctil inalámbrico para asistencia de actividades motoras/Wearable Haptic Vibrotactile System for Assistance of Motor Activities.*, 12. Gale onefile: <https://go.gale.com/ps/i.do?p=IFME&u=googlescholar&id=GALE|A569114330&v=2.1&it=r&sid=IFME&asid=66ce278a>
- Tren, R. E. (18 de octubre de 1972). *The Quest for Environmental Indices*. Science: <https://www.science.org/toc/science/178/4057>
- Vaca Benavides, D. A., & Arguello Andrade, G. M. (diciembre de 2017). *Diseño, construcción y*

evaluación de dispositivos de estimulación vibrotáctil en extremidades inferiores, para ayudar a pacientes parkinsonianos con problemas de congelamiento de la marcha.

Depositorio Despace: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/41808>

Yao, H. Y. (09 de agosto de 2010). *Design and analysis of a recoil-type vibrotactile transducer.*

The Journal of the Acoustical Society of America:

<https://asa.scitation.org/doi/pdf/10.1121/1.3458852>

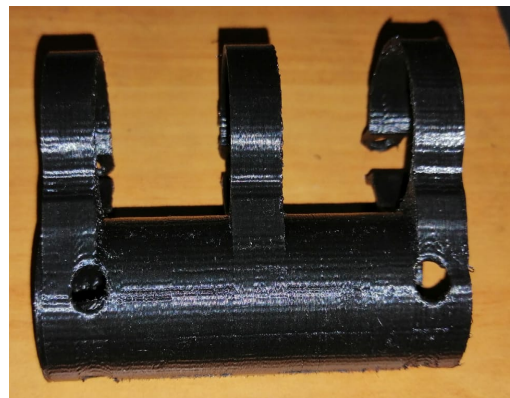
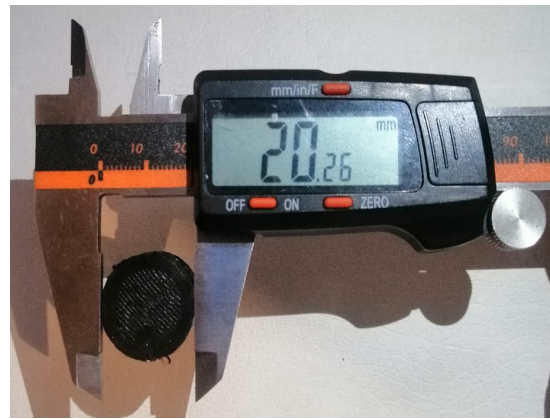
YIC Electronics. (noviembre de 2019). *Mecánica Computacional.* [https://www.yic-](https://www.yic-electronics.es/pdf/TI/TPA3116D2.html)

[electronics.es/pdf/TI/TPA3116D2.html](https://www.yic-electronics.es/pdf/TI/TPA3116D2.html)

ANEXOS

Anexo 1

Registro fotográfico



Anexo 2

Cuestionarios

GENERAL

1. ¿Cuál es su género? Masculino ___ Femenino ___ Otro ___
2. ¿Cuál es su edad? ___
3. ¿Sufre de algún tipo de discapacidad? Si ___ No ___
- 3.1. ¿Si respondió Si a la pregunta anterior, podría describir rápidamente su discapacidad?

-
4. ¿Con un visto señale cuál de los siguientes títulos le describen mejor?

Seleccione solamente uno:

<input type="checkbox"/>	No conduce bicicleta
<input type="checkbox"/>	Conduce una bicicleta esporádicamente
<input type="checkbox"/>	Conduce bicicleta regularmente, la usa como transporte
<input type="checkbox"/>	Ciclista Semiprofesional - participa regularmente en competencias, la usa como transporte
<input type="checkbox"/>	Ciclista Profesional – seleccionado de ciclismo profesional, entrena y conduce una bicicleta diariamente.

SESIÓN DE PRÁCTICA

En esta sesión de práctica se va a familiarizar con lo que debe percibir y reportar:
“Una sensación de movimiento continuo de un único punto vibratorio de una mano a otra”

Estímulo 1

¿Ha logrado percibir el movimiento? Si ___ No ___

¿Qué tan clara ha sido esta sensación?

Muy clara	<input type="checkbox"/>
Clara	<input type="checkbox"/>
Poco clara	<input type="checkbox"/>
Casi imperceptible	<input type="checkbox"/>

SESIÓN DE PRÁCTICA

En esta sesión de práctica se va a familiarizar con lo que debe percibir y reportar:
“Una sensación de un único punto vibratorio moviéndose a manera de saltos de una mano a otra”

Estímulo 1

¿Ha logrado percibir el punto cambiando de posición de una mano a otra? Si ___ No ___

¿Qué tan clara ha sido esta sensación?

Muy clara	<input type="checkbox"/>
Clara	<input type="checkbox"/>
Poco clara	<input type="checkbox"/>
Casi imperceptible	<input type="checkbox"/>

SESIÓN DE PRÁCTICA

En esta sesión de práctica se va a familiarizar con lo que debe percibir y reportar:
“Una sensación de un punto o pulso saltando de una mano a otra”

Estímulo 1

¿Ha logrado percibir el punto cambiando de posición de una mano a otra? Si__ No__
¿Qué tan clara ha sido esta sensación?

Muy clara	<input type="checkbox"/>
Clara	<input type="checkbox"/>
Poco clara	<input type="checkbox"/>
Casi imperceptible	<input type="checkbox"/>

Aquí termina la sesión de práctica

**CUESTIONARIO
PRUEBA 1**

ESTIMULO 1 (FUN-hacia la izquierda)

PERCEPCIÓN DE DIRECCIÓN

1. ¿Qué dirección le indicó el estímulo?

Izquierda	Derecha

2. ¿Con qué nivel de claridad percibió la indicación de dirección?

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Imperceptible										Muy claro

3. ¿En qué nivel el estímulo vibrotáctil le distrajo de la actividad de conducción virtual?

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No me distrajo para nada										Me distraje totalmente

ESTIMULO 2 (CR-hacia la izquierda)

1. ¿Qué dirección le indicó el estímulo?

Izquierda	Derecha

2. ¿Con qué nivel de claridad percibió la indicación de dirección?

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Imperceptible										Muy claro

3. ¿En qué nivel el estímulo vibrotáctil le distrajo de la actividad de conducción virtual?

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No me distrajo para nada										Me distraje totalmente

ESTIMULO 3 (Fun-hacia la derecha)

PERCEPCIÓN DE DIRECCIÓN

1. ¿Qué dirección le indicó el estímulo?

Izquierda	Derecha

2. ¿Con qué nivel de claridad percibió la indicación de dirección?

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Imperceptible										Muy claro

3. ¿En qué nivel el estímulo vibrotáctil le distrajo de la actividad de conducción virtual?

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No me distrajo para nada										Me distraje totalmente

ESTIMULO 4 (CR-hacia la derecha)

PERCEPCIÓN DE DIRECCIÓN

1. ¿Qué dirección le indicó el estímulo?

Izquierda	Derecha

2. ¿Con qué nivel de claridad percibió la indicación de dirección?

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Imperceptible										Muy claro

3. ¿En qué nivel el estímulo vibrotáctil le distrajo de la actividad de conducción virtual?

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No me distrajo para nada										Me distraje totalmente

ESTIMULO 5 (PM-hacia la derecha)

1. ¿Qué dirección le indicó el estímulo?

Izquierda	Derecha

2. ¿Con qué nivel de claridad percibió la indicación de dirección?

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Imperceptible										Muy claro

3. ¿En qué nivel el estímulo vibrotáctil le distrajo de la actividad de conducción virtual?

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No me distrajo para nada										Me distraje totalmente

ESTIMULO 6 (PM-hacia la izquierda)

PERCEPCIÓN DE DIRECCIÓN

1. ¿Qué dirección le indicó el estímulo?

Izquierda	Derecha

2. ¿Con qué nivel de claridad percibió la indicación de dirección?

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Imperceptible										Muy claro

3. ¿En qué nivel el estímulo vibrotáctil le distrajo de la actividad de conducción virtual?

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No me distrajo para nada										Me distraje totalmente

Anexo 3

Código de programación

```
include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include "Arduino.h"
#include "SoftwareSerial.h"
#include "DFRobotDFPlayerMini.h"

Adafruit_SSD1306 display = Adafruit_SSD1306(128, 64, &Wire);
//Pulsadores
const int s1 = 0; // pulsadores
const int s2 = 2;
const int s3 = 14;

const int s4 = 12; // pulsadores
const int s5 = 10;
const int s6 = 1;
const int s7 = 3;

int state1 = 0; // estados para las entradas digitales
int last1 = 1;
int state2 = 0;
int last2 = 1;
int state3 = 0;
int last3 = 1;

int state4 = 0; // estados para las entradas digitales
int last4 = 1;
int state5 = 0;
int last5 = 1;
int state6 = 0;
int last6 = 1;

int state7 = 0;
int last7 = 1;

SoftwareSerial mySoftwareSerial(13, 15); // RX, TX

DFRobotDFPlayerMini myDFPlayer;

void printDetail(uint8_t type, int value);

void setup()
{
  //*****
```

```

display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C); // Otra direccion es la 0x3D
display.clearDisplay();
display.setTextColor(SSD1306_WHITE);

mySoftwareSerial.begin(9600);
Serial.begin(115200);
Serial.println();
Serial.println(F("DFRobot DFPlayer Mini Demo"));
Serial.println(F("Initializing DFPlayer ... (May take 3~5 seconds)"));
if (!myDFPlayer.begin(mySoftwareSerial)) { //Use softwareSerial to communicate with
mp3.
    Serial.println(F("Unable to begin:"));
    Serial.println(F("1.Please recheck the connection!"));
    Serial.println(F("2.Please insert the SD card!"));
    while (true);
}
Serial.println(F("DFPlayer Mini online."));
myDFPlayer.setTimeout(500); //Set serial communication time out 500ms
//----Set volume----
myDFPlayer.volume(28); //Set volume value (0~30).
myDFPlayer.volumeUp(); //Volume Up
myDFPlayer.volumeDown(); //Volume Down
//----Set different EQ----
myDFPlayer.EQ(DFPLAYER_EQ_NORMAL);
//----Set device we use SD as default----
myDFPlayer.outputDevice(DFPLAYER_DEVICE_SD);
pinMode(s1, INPUT_PULLUP);
pinMode(s2, INPUT_PULLUP);
pinMode(s3, INPUT_PULLUP);
pinMode(s4, INPUT_PULLUP);
pinMode(s5, INPUT_PULLUP);
pinMode(s6, INPUT_PULLUP);
pinMode(s7, INPUT_PULLUP);

// pinMode(led, OUTPUT);

display.clearDisplay(); // Borra la pantalla
display.setTextSize(1); // Tamaño de la fuente del texto 1 - 2 - 3 - 4 - 5
display.setCursor(20,15); // (X,Y) . (Horizontal, Vertical)
display.print("1. "); // texto a mostrar / si es variable sin comillas
display.setCursor(30,30); // (X,Y) . (Horizontal, Vertical)
display.print("UTI"); // texto a mostrar / si es variable sin comillas
display.display();
delay(200);

}
void loop()

```

```

{
state1 = digitalRead(s1);
state2 = digitalRead(s2);
state3 = digitalRead(s3);
state4 = digitalRead(s4);
state5 = digitalRead(s5);
state6 = digitalRead(s6);
state7 = digitalRead(s7);

/* display.clearDisplay(); // Borra la pantalla
display.setTextSize(2); // Tamaño de la fuente del texto 1 - 2 - 3 - 4 - 5
display.setCursor(20,15); // (X,Y) . (Horizontal, Vertical)
display.print("HAPTICA"); // texto a mostrar / si es variable sin comillas
display.display();
delay(200);*/

if (state1 != last1) {
  if (state1 == LOW) {
    myDFPlayer.play(1);

    display.clearDisplay(); // Borra la pantalla
    display.setTextSize(1); // Tamaño de la fuente del texto 1 - 2 - 3 - 4 - 5
    display.setCursor(20,30); // (X,Y) . (Horizontal, Vertical)
    display.print("FUNNELING R-L"); // texto a mostrar / si es variable sin comillas
    display.display();

    myDFPlayer.loop(1);
    delay(1000);
  }
}

last1 = state1;
if (state2 != last2 ) {
  if (state2 == LOW) {

    display.clearDisplay(); // Borra la pantalla
    display.setTextSize(1); // Tamaño de la fuente del texto 1 - 2 - 3 - 4 - 5
    display.setCursor(20,30); // (X,Y) . (Horizontal, Vertical)
    display.print("CRABITT R-L"); // texto a mostrar / si es variable sin comillas
    display.display(); // Muestra el Texto en la pantalla

    myDFPlayer.loop(2);

    delay(1000);
  }
}

last2 = state2;

```

```

if (state3 != last3 ) {
  if (state3 == LOW) {
    display.clearDisplay();    // Borra la pantalla
    display.setTextSize(1);    // Tamaño de la fuente del texto 1 - 2 - 3 - 4 - 5
    display.setCursor(20,30);  // (X,Y) . (Horizontal, Vertical)
    display.print("FUNNELING L-R"); // texto a mostrar / si es variable sin comillas
    display.display();
    myDFPlayer.loop(3);

    delay(1000);
  }
}
last3 = state3;

if (state4 != last4 ) {
  if (state4 == LOW) {
    display.clearDisplay();    // Borra la pantalla
    display.setTextSize(1);    // Tamaño de la fuente del texto 1 - 2 - 3 - 4 - 5
    display.setCursor(20,30);  // (X,Y) . (Horizontal, Vertical)
    display.print("CRABITT L-R"); // texto a mostrar / si es variable sin comillas
    display.display();
    myDFPlayer.loop(4);

    delay(1000);
  }
}
last4 = state4;

if (state5 != last5 ) {
  if (state5 == LOW) {
    display.clearDisplay();    // Borra la pantalla
    display.setTextSize(1);    // Tamaño de la fuente del texto 1 - 2 - 3 - 4 - 5
    display.setCursor(20,30);  // (X,Y) . (Horizontal, Vertical)
    display.print("PHANTONM R-L"); // texto a mostrar / si es variable sin comillas
    display.display();
    myDFPlayer.loop(5);

    delay(1000);
  }
}
last5 = state5;

if (state6 != last6 ) {
  if (state6 == LOW) {
    display.clearDisplay();    // Borra la pantalla
    display.setTextSize(1);    // Tamaño de la fuente del texto 1 - 2 - 3 - 4 - 5
    display.setCursor(20,30);  // (X,Y) . (Horizontal, Vertical)

```

```

display.print("PHANTONM L-R"); // texto a mostrar / si es variable sin comillas
display.display();
myDFPlayer.loop(6);

delay(1000);
}
}
last6 = state6;

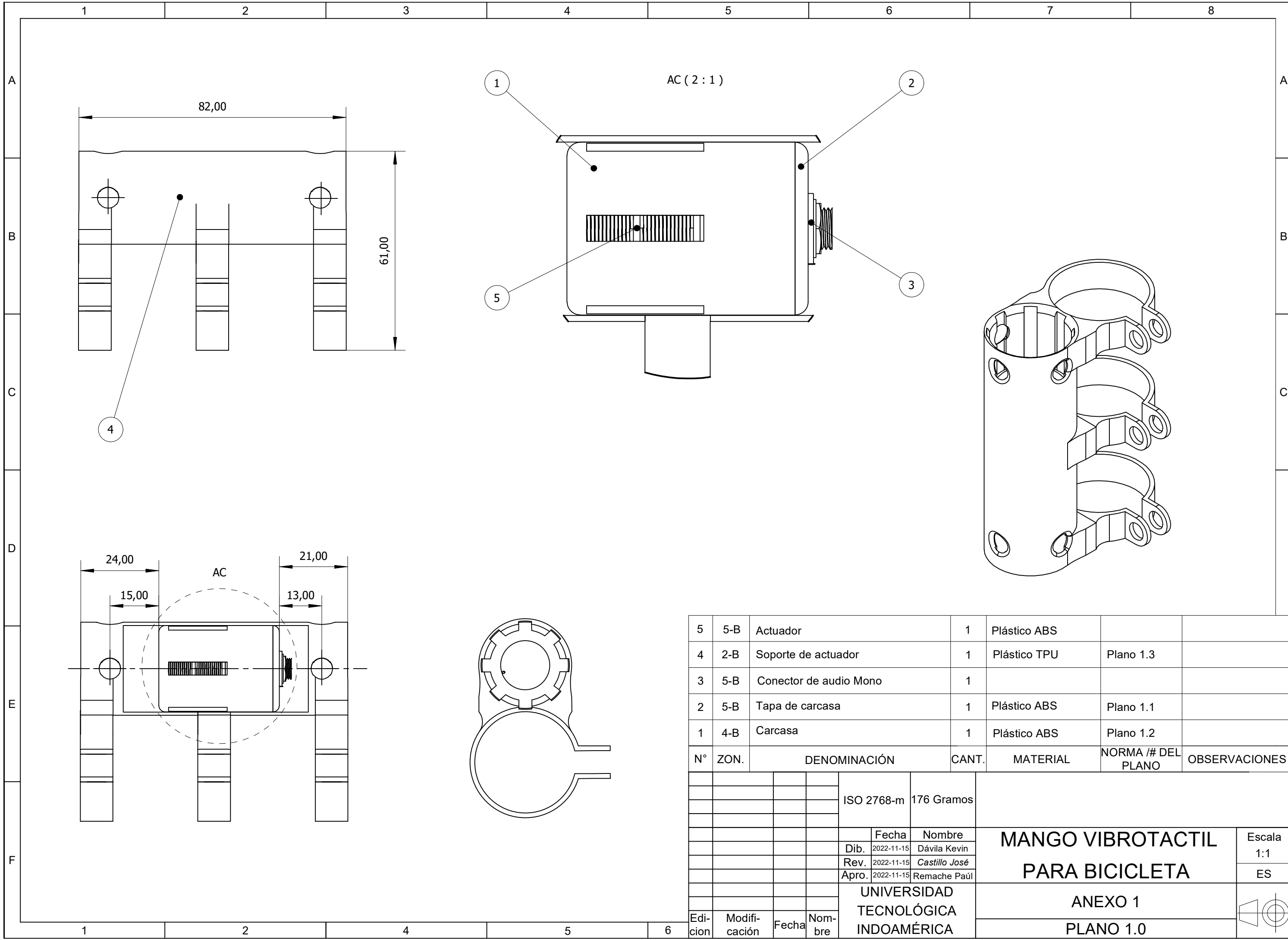
if (state7 != last7 ) {
  if (state7 == HIGH) {
    display.clearDisplay(); // Borra la pantalla
    display.setTextSize(1); // Tamaño de la fuente del texto 1 - 2 - 3 - 4 - 5
    display.setCursor(20,30); // (X,Y) . (Horizontal, Vertical)
    display.print("STOP"); // texto a mostrar / si es variable sin comillas
    display.display();
    myDFPlayer.disableLoopAll();
    delay(2000);
  }
}
last7 = state7;

}

```

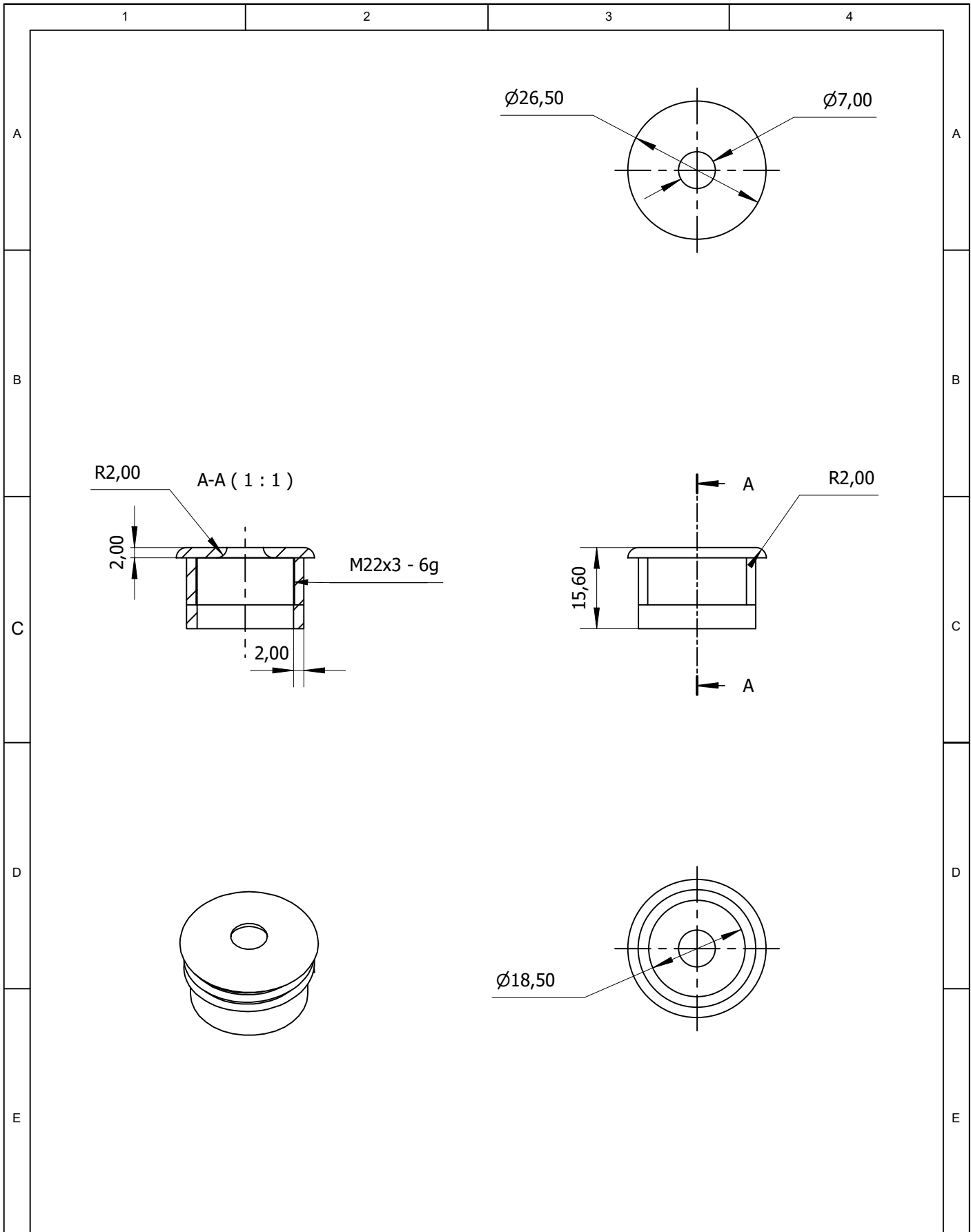

Anexo 4

Planos

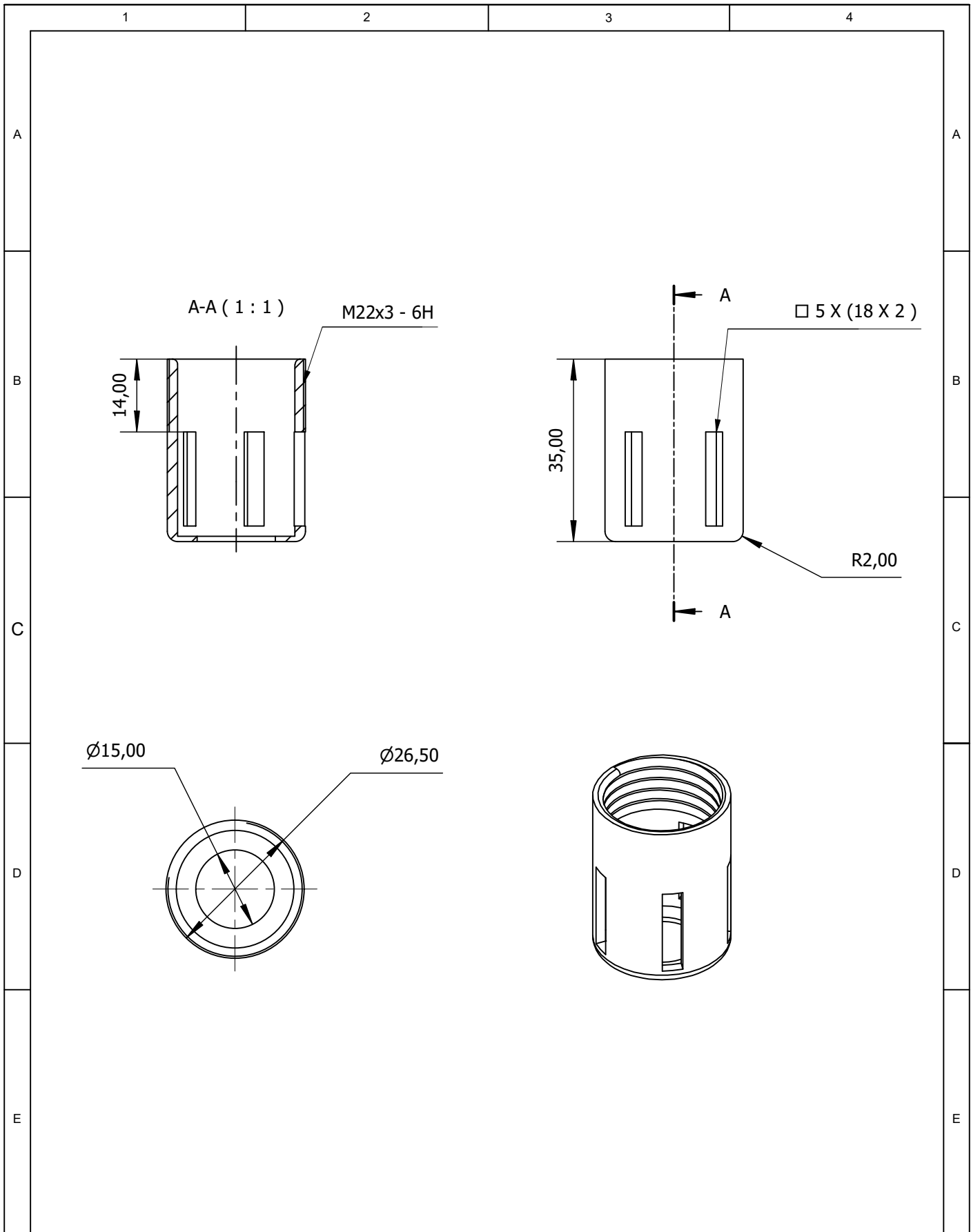


N°	ZON.	DENOMINACIÓN	CANT.	MATERIAL	NORMA /# DEL PLANO	OBSERVACIONES
5	5-B	Actuador	1	Plástico ABS		
4	2-B	Soporte de actuador	1	Plástico TPU	Plano 1.3	
3	5-B	Conector de audio Mono	1			
2	5-B	Tapa de carcasa	1	Plástico ABS	Plano 1.1	
1	4-B	Carcasa	1	Plástico ABS	Plano 1.2	

		ISO 2768-m		176 Gramos				
		Fecha	Nombre		MANGO VIBROTACTIL PARA BICICLETA		Escala	
		Dib.	2022-11-15	Dávila Kevin			1:1	
		Rev.	2022-11-15	Castillo José			ES	
		Apro.	2022-11-15	Remache Paúl				
		UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA		ANEXO 1 PLANO 1.0				
Edi- cion	Modifi- cación	Fecha	Nom- bre					



				ISO 2768-m	10 Gramos	PLÁSTICO ABS		
						TAPA DE CARCASA	Escala 1:1	
				Dib.	2022-11-08		Dávila Kevin	ES
				Rev.	2022-11-08		Castillo José	
				Apro.	2022-11-10		Remache Paúl	
				UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA		ANEXO 2		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			PLANO 1.1		



				ISO 2768-m	10 Gramos	PLÁSTICO ABS	
				Fecha	Nombre	CARCASA	Escala
			Dib.	2022-11-08	Dávila Kevin		1:1
			Rev.	2022-11-08	Castillo José		ES
				Apro.	2022-11-10	Remache Paúl	
				UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA		ANEXO 3	
Edi- ción	Modifi- cación	Fecha	Nom- bre	PLANO 1.2			

