



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

**Departamento: Electrónica**

**Áreas de Conocimiento: Electrónica, Ingeniería de Sistemas y  
Automática, Tecnología Electrónica**

# **TRABAJO FIN DE GRADO**

**INFLUENCIA DE LA RETROALIMENTACIÓN VISUAL SOBRE  
LA PERCEPCIÓN DE ILUSIONES TÁCTILES DE MOVIMIENTO**

*(Influence of visual feedback on the perception of tactile  
illusions of motion)*

Grado en

Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Autor: Irene Guijarro Molina

Tutor: Andrés Trujillo León

Cotutor: Byron Paúl Remache Vinuesa

MÁLAGA, Septiembre de 2023

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

# Agradecimientos

---

---

Me gustaría expresar mi sincero agradecimiento a mi tutor Andrés Trujillo y cotutor Paúl Remache por su dedicación y apoyo inquebrantable a lo largo de mi Trabajo de Fin de Grado. Su guía experta y su disponibilidad constante han sido fundamentales para el éxito de este proyecto, sin olvidar todos los recursos que han puesto a mi disposición: impresora 3D, despacho, sala del experimento, pantalla táctil, herramientas, algún que otro plano de producción, etc. En todo momento han estado disponibles para resolver mis dudas, aconsejarme y brindarme su experiencia, lo cual ha sido de gran valor para mí.

También quiero dar las gracias a mi familia por su apoyo incondicional durante todo el proceso de realización de este TFG. Su paciencia, comprensión y apoyo en los momentos en los que tuve que dedicar tiempo extra al estudio y la investigación, mientras descuidaba otras responsabilidades, han sido una fuente de fortaleza y motivación.

Además, quiero agradecer sinceramente a todos los voluntarios que han participado en el experimento. A pesar de vivir lejos o tener compromisos laborales, se tomaron el tiempo para acudir y ser parte de este estudio. Su colaboración ha sido fundamental para la recopilación de datos y la obtención de resultados significativos. Estoy realmente agradecida por su disposición y contribución en la investigación.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

# Resumen

---

---

Las ilusiones táctiles son ilusiones percibidas con el sentido del tacto. Entre este tipo de ilusiones, destacan las ilusiones táctiles de movimiento que, cómo su nombre indica, pretenden recrear una sensación de desplazamiento. El objeto de estudio de este Trabajo Fin de Grado es analizar la influencia de la retroalimentación visual sobre la percepción de determinadas ilusiones táctiles de movimiento, concretamente se estudian *Sensaciones Fantasma de Movimiento* e ilusiones *Cutaneous Rabbit*.

Este proyecto plantea comprobar el grado de relación existente entre los sentidos del tacto y la vista, lo cual puede aplicarse en un futuro a diversos campos como la medicina, la rehabilitación o el entretenimiento.

Con la finalidad mencionada, tomando como punto de partida una investigación previa, se realizan dos experimentos diferentes con voluntarios, se recopilan las sensaciones percibidas y se analizan minuciosamente para conseguir unas conclusiones globales. El entorno experimental que se utiliza, se desarrolla de forma específica para el experimento. Primero, se elige una sala amplia, luminosa, silenciosa y prácticamente vacía para reducir al máximo las distracciones en la percepción del estímulo táctil. Después, se realiza el diseño de una interfaz vibrotáctil la cual, acompañada de una interfaz gráfica sencilla y concisa, permiten realizar la fase experimental de este estudio.

Finalmente, se analizan e interpretan los datos recopilados en la fase experimental, obteniéndose resultados relevantes en el campo de las ilusiones táctiles que no sólo confirman que existe una relación entre los estímulos visuales y táctiles. Entre otros hallazgos, destacan: la distancia percibida recorrida por un punto ilusorio táctil puede modificarse variando la duración de determinados estímulos vibrotáctiles, las ilusiones *Cutaneous Rabbit* no son adecuadas para recrear ilusiones de desplazamiento lejos del dispositivo que las reproduce, la dirección de las ilusiones táctiles de movimiento es indiferente en la percepción del punto de finalización del movimiento ilusorio y el sentido de la vista predomina sobre el sentido del tacto.

## Palabras clave

---

---

Ilusiones táctiles, ilusiones fantasma, *Sensaciones Fantasma de Movimiento*, *Conejo Cutáneo*, vibraciones, háptico, retroalimentación, ilusión visual, actuadores vibrotáctiles, campo magnético, imán, corriente, espira, inducción magnética, experimento, experiencia, SolidWorks, MATLAB, AppDesigner, Audacity.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

# Summary

---

---

Tactile illusions are illusions perceived through the sense of touch. Among this type of illusions, tactile illusions of motion stand out, as their name suggests, they aim to recreate a sensation of movement. The object of study for this Bachelor's Final Project is to analyze the influence of visual feedback on the perception of tactile illusions of motion, specifically focusing on Phantom Sensations of Motion and Cutaneous Rabbit illusions.

This project aims to verify the degree of relationship between the senses of touch and sight, which can be applied in the future to various fields such as medicine, rehabilitation, or entertainment.

To achieve this goal, two different experiments are conducted with volunteers, starting from previous research. The perceived sensations are collected and analyzed meticulously to draw overall conclusions. The experimental environment used is specifically designed for the experiment. First, a spacious, well-lit, quiet, and nearly empty room is chosen to minimize distractions in the perception of the tactile stimulus. Then, the design of a vibrotactile interface, accompanied by a simple and concise graphical interface, allows the experimental phase of this study.

Finally, the data collected in the experimental phase are analyzed and interpreted, resulting in relevant findings in the field of tactile illusions that not only confirm the existence of a relationship between visual and tactile stimuli. Among other findings, it is highlighted that the perceived distance traveled by an illusory tactile point can be modified by varying the duration of certain vibrotactile stimuli, Cutaneous Rabbit illusions are not suitable for recreating illusions of movement far from the device reproducing them, the direction of tactile illusions of motion is indifferent in the perception of the point of illusionary motion termination, and the sense of sight predominates over the sense of touch.

## Key words

---

---

Tactile illusions, phantom illusions, *Phantom motion tactile illusions*, *Cutaneous Rabbit*, vibrations, haptic, feedback, visual illusion, vibrotactile actuators, magnetic field, magnet, current, coils, magnetic induction, experiment, experience, SolidWorks, MATLAB, AppDesigner, Audacity

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Descripción general del Trabajo Fin de Grado . . . . .	1
1.2. Motivación del Trabajo Fin de Grado . . . . .	1
1.3. Objetivos del Trabajo Fin de Grado . . . . .	2
1.4. Estructura de la memoria . . . . .	3
<b>2. Marco teórico</b>	<b>5</b>
2.1. Ilusiones en diferentes dominios perceptuales y cognitivos . . . . .	5
2.1.1. Ilusiones visuales . . . . .	5
2.1.2. Ilusiones auditivas . . . . .	6
2.1.3. Ilusiones cognitivas . . . . .	7
2.1.4. Ilusiones temporales . . . . .	7
2.1.5. Realidades virtuales . . . . .	7
2.2. Ilusiones táctiles . . . . .	8
2.2.1. Fundamentos de las ilusiones táctiles . . . . .	8
2.2.2. Ilusiones táctiles clásicas . . . . .	8
2.3. Ilusiones táctiles de movimiento . . . . .	10
2.3.1. Sensaciones fantasma de movimiento . . . . .	10
2.3.2. Cutaneous Rabbit . . . . .	11
2.4. Conceptos físicos en los que se basan los actuadores vibrotáctiles . . . . .	13
2.4.1. Magnetismo . . . . .	13
2.4.2. Inducción electromagnética . . . . .	14
2.4.3. Corriente eléctrica . . . . .	14
2.4.4. Conversión de energía . . . . .	14
2.5. Ergonomía . . . . .	15

<b>3. Diseño experimental</b>	<b>17</b>
3.1. Antecedentes del estudio y punto de partida . . . . .	17
3.2. Experimento 1 - Percepción de un punto vibratorio móvil (continuo y a saltos) . . .	20
3.2.1. Hipótesis . . . . .	20
3.2.2. Entorno experimental . . . . .	20
3.2.3. Participantes . . . . .	22
3.2.4. Protocolo experimental . . . . .	23
3.3. Experimento 2 - Percepción combinada de puntos móviles vibratorios y visuales en sincronía (continuos y a saltos) . . . . .	24
3.3.1. Hipótesis . . . . .	24
3.3.2. Entorno experimental . . . . .	24
3.3.3. Participantes . . . . .	25
3.3.4. Protocolo experimental . . . . .	26
<b>4. Implementación del entorno experimental</b>	<b>27</b>
4.1. Síntesis de las señales ilusorias . . . . .	27
4.2. Interfaz vibrotáctil . . . . .	31
4.2.1. Actuadores vibrotáctiles . . . . .	31
4.2.2. Soporte vibrotáctil . . . . .	43
4.3. Interfaz gráfica . . . . .	50
4.3.1. Experimento 1 . . . . .	51
4.3.2. Experimento 2 . . . . .	60
4.4. Montaje experimental . . . . .	70
<b>5. Resultados de la experimentación</b>	<b>77</b>
5.1. Valoración inicial . . . . .	77
5.1.1. Experimento 1 . . . . .	77
5.1.2. Experimento 2 . . . . .	79
5.2. Posibles mejoras . . . . .	85

<b>6. Conclusiones y líneas de investigación futuras</b>	<b>87</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	87
6.2. Líneas de investigación futuras . . . . .	89
<b>Anexos</b>	<b>91</b>
<b>A. Planos de producción</b>	<b>91</b>
A.1. Actuador (versión uno) . . . . .	91
A.2. Actuador (versión definitiva) . . . . .	94
A.3. Recipiente para la fabricación de amortiguadores de silicona . . . . .	97
A.4. Soporte para actuador vibrotáctil . . . . .	99
A.5. Primer recipiente para la fabricación de la fijación del actuador . . . . .	101
A.6. Segundo recipiente para la fabricación de la fijación del actuador . . . . .	103
<b>B. Medidas del entorno experimental</b>	<b>105</b>
<b>C. Informe favorable del Comité de Ética de la UMA</b>	<b>107</b>
<b>D. Documentación adicional</b>	<b>109</b>
D.1. Infografías de los experimentos . . . . .	109
D.2. Descripción del experimento . . . . .	112
D.3. Consentimiento informado . . . . .	115
D.4. Cuestionario general . . . . .	118
D.5. Protocolo del experimento . . . . .	120
D.6. Paneles informativos . . . . .	123
<b>E. Código completos que conforman las sesiones experimentales</b>	<b>127</b>
E.1. Sesiones de entrenamiento . . . . .	127
E.2. Interfaz gráfica del primer experimento . . . . .	127
E.3. Interfaz gráfica del segundo experimento . . . . .	138

<b>F. Estadísticas</b>	<b>155</b>
F.1. Resultados numéricos de la experimentación . . . . .	155
F.2. Gráficas imprescindibles para el análisis de los datos experimentales . . . . .	160
<b>Símbolos, siglas, glosario</b>	<b>165</b>
<b>Referencias</b>	<b>169</b>

## Lista de figuras

1.	Capturas tomadas de [1] . . . . .	1
2.	Ejemplos de ilusiones visuales . . . . .	6
3.	Representación gráfica de una <i>Sensación Fantasma de Movimiento</i> . . . . .	11
4.	Representación gráfica de la ilusión <i>Cutaneous Rabbit</i> . . . . .	12
5.	Mango largo utilizado en [1] y su vista sagital . . . . .	18
6.	Mango corto utilizado en [1] y su vista sagital . . . . .	19
7.	Esquemático del entorno experimental . . . . .	21
8.	Representación de la interfaz gráfica del primer experimento . . . . .	22
9.	Distribución de la edad de los participantes y estadísticas descriptivas - <i>Experimento 1</i>	23
10.	Representación de la interfaz gráfica del segundo experimento . . . . .	25
11.	Distribución de la edad de los participantes y estadísticas descriptivas - <i>Experimento 2</i>	25
12.	Representación gráfica de la ilusión de movimiento entre actuadores . . . . .	29
13.	Ejemplo de señal sinusoidal con arcotangente envolvente . . . . .	30
14.	Ilusión Cutaneous Rabbit de 380 ms de duración y dirección de derecha a izquierda	31
15.	Estructura altavoz . . . . .	32
16.	Actuadores vibrotáctiles comerciales . . . . .	33
17.	Influencia del número de bobinas en el diseño de actuadores vibrotáctiles . . . . .	34
18.	Modelo de actuador vibrotáctil no funcional . . . . .	35
19.	Modelo base para el diseño del actuador . . . . .	36
20.	Modelo de actuador vibrotáctil funcional . . . . .	37
21.	Esquema de montaje del actuador vibrotáctil . . . . .	39
22.	Fabricación amortiguadores de silicona . . . . .	40
23.	Primeras seis capas de bobinado de un actuador vibrotáctil . . . . .	41
24.	Últimas seis capas de bobinado de un actuador vibrotáctil . . . . .	42
25.	Disposición de los amortiguadores de silicona junto al imán . . . . .	43
26.	Boceto de la interfaz vibrotáctil fabricada e instalada . . . . .	44

27.	Versiones 4 y 6 del soporte vibrotáctil . . . . .	46
28.	Versiones 13, 14 y 15 del soporte vibrotáctil . . . . .	47
29.	Versión 16 del soporte vibrotáctil . . . . .	48
30.	Versión 17 del soporte vibrotáctil . . . . .	49
31.	Representación de la interfaz vibrotáctil fabricada e instalada . . . . .	50
32.	Campos rellenables de las ventanas emergentes iniciales . . . . .	54
33.	Pantalla de inicio de la primera interfaz . . . . .	55
34.	Capturas de la interfaz gráfica del primer experimento (I) . . . . .	58
35.	Espacio de respuesta, experimento 1 . . . . .	58
36.	Capturas de la interfaz gráfica del primer experimento (II) . . . . .	59
37.	Punto rojo en movimiento, segundo experimento . . . . .	66
38.	Espacio de respuesta de la pregunta principal, segundo experimento . . . . .	67
39.	Preguntas adicionales del segundo experimento . . . . .	69
40.	Capturas de la interfaz gráfica del segundo experimento . . . . .	70
41.	Sala de experimentos . . . . .	71
42.	Proceso de soldadura . . . . .	72
43.	Montaje y conexionado de los soportes vibrotáctiles . . . . .	72
44.	Diferentes vistas de una mitad del soporte vibrotáctil . . . . .	73
45.	Montaje y conexionado de los soportes vibrotáctiles . . . . .	74
46.	SetUp experimental . . . . .	75
47.	Exterior de la sala de experimentos . . . . .	76
48.	Influencia de la dirección en la localización del punto final del movimiento para las experiencias Sensación Fantasma de Movimiento (SFM) (Figura 48a) y las experiencias Cutaneous Rabbit, Conejo Cutáneo (CR) (Figura 48b) . . . . .	78
49.	Distribución del valor absoluto de la localización del punto final del movimiento para las experiencias SFM (Figura 49a) y las experiencias CR (Figura 49b) . . . . .	79
50.	SFM - Recuento de las 378 respuestas de los participantes sobre el grado de semejanza entre los movimientos visual y táctil . . . . .	80
51.	Valoración del grado de coherencia de las experiencias SFM . . . . .	81

52.	CR - Recuento de las 315 respuestas de los participantes sobre el grado de semejanza entre los movimientos visual y táctil . . . . .	82
53.	Recuento de las respuestas a las preguntas adicionales . . . . .	83
54.	Respuestas de las preguntas adicionales según el grado de coherencia de las experiencias CR del segundo experimento . . . . .	84
55.	Valoración del grado de coherencia de las experiencias CR . . . . .	85
56.	Medidas de las mesas que conforman el experimento (I) . . . . .	105
57.	Medidas de las mesas que conforman el experimento (II) . . . . .	105
58.	Experimento 1 - SFM, <i>qqplot()</i> de las columnas de datos . . . . .	160
59.	Experimento 1 - CR, <i>qqplot()</i> de las columnas de datos . . . . .	160
60.	Experimento 2 - SFM, <i>qqplot()</i> de las columnas de datos . . . . .	161
61.	Experimento 2 - CR, <i>qqplot()</i> de las columnas de datos . . . . .	162

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

## Lista de Códigos

1.	Función <code>tactiluWAV()</code> . . . . .	27
2.	Script <code>Vib_FS_025s_ID.m</code> . . . . .	29
3.	Declaración de variables globales . . . . .	55
4.	<code>StartUpFcn()</code> o función de inicio de la interfaz . . . . .	55
5.	Bucle <code>while</code> para la reproducción al azar de experiencias . . . . .	57
6.	Función que controla la pulsación sobre la imagen del soporte vibrotáctil . . . . .	59
7.	Programación de la cuenta atrás . . . . .	60
8.	Declaración de variables globales, segundo experimento . . . . .	63
9.	Función <code>movimientoPunto()</code> . . . . .	64
10.	Gestión de los botones de la interfaz . . . . .	67
11.	Sesión de entrenamiento común a los dos experimentos . . . . .	127
12.	Code View completo del primer experimento . . . . .	127
13.	Code View completo del segundo experimento . . . . .	139

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

## 1. Introducción

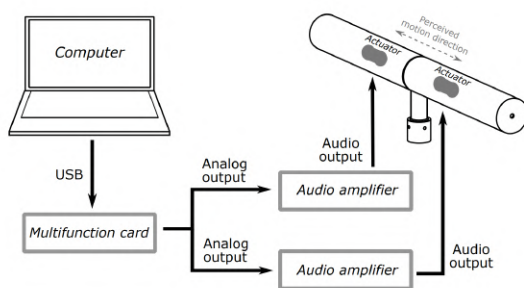
### 1.1. Descripción general del Trabajo Fin de Grado

En la actualidad, el mundo de las ilusiones sensoriales es un campo de interés y constantemente estudiado debido a la infinidad de aplicaciones prácticas en las que pueden ser incluidas. Algunos ejemplos notorios del uso de ilusiones es el mundo de los videojuegos, donde se desarrollan dispositivos que ofrecen a los jugadores la posibilidad de sumergirse en la realidad virtual, o incluso, en el mundo de la medicina donde ya se practican cirugías haciendo uso de modelos virtuales y recreando sensaciones táctiles.

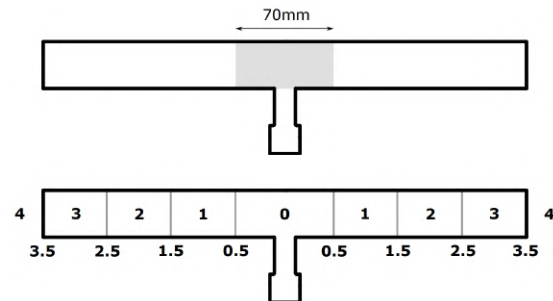
Este Proyecto Fin de Grado se focaliza en las ilusiones táctiles, concretamente pretende estudiar la influencia de estímulos visuales sobre la percepción de ilusiones táctiles de movimiento. A lo largo del capítulo, se realiza una introducción general al proyecto, se indica cuál es la motivación que impulsa la elaboración de este estudio, así como los diversos objetivos que se plantean alcanzar en este Trabajo Fin de Grado (TFG). Posteriormente, en los siguientes capítulos se explican detalladamente las bases sobre las que sustentan el presente estudio, cómo se desarrolla el mismo, los experimentos que se realizan y, finalmente, se justifican las conclusiones que se obtienen.

### 1.2. Motivación del Trabajo Fin de Grado

La realización de este Trabajo de Fin de Grado se fundamenta en una sólida motivación para mejorar y ampliar una investigación anterior sobre *Sensaciones Fantasma de Movimiento*. En el estudio [1] se realizan diversos experimentos empleando el entorno experimental de la Figura 1a. Los participantes sujetan un dispositivo que contiene dos actuadores vibrotáctiles y reportan cuál es el punto de finalización del movimiento ilusorio que perciben en su mano, señalando una coordenada en la hoja de respuesta (ver Figura 1b). Los actuadores vibrotáctiles están separados 7 cm y reproducen *Sensaciones Fantasma de Movimiento* de diferentes duraciones. Así pues, se demuestra que un aumento en la duración de una *Sensación Fantasma de Movimiento* resulta en un punto final percibido fuera de la mano o fuera del objeto. Además, los resultados sugieren que una *Sensación de Fantasma Movimiento*, dependiendo de su duración, no está limitada por la posición de los actuadores.



(a) Esquema del entorno experimental



(b) Hoja de respuesta de los participantes

Figura 1: Capturas tomadas de [1]

No obstante, el artículo *Phantom Sensation: When the phantom escapes the bounds of the actuators and the end-point is sensed in the air* [1] posee limitaciones destacables:

- No se emplea una interfaz táctil para registrar la posición exacta del punto final del movimiento.
- Por el diseño de la interfaz vibrotáctil, existe transferencia de vibraciones entre actuadores y la *Sensación Fantasma de Movimiento* no se puede reproducir limpiamente.
- El número de participantes es reducido, lo que implica que las observaciones no son demasiado fiables.
- No se procesan los datos en función de la dirección de la *Sensación Fantasma de Movimiento*, lo cual es importante porque según [2] parece existir una diferencia en la percepción de la distancia según la dirección.

En consecuencia, este Proyecto Fin de Grado pretende replicar y mejorar el estudio previo, eliminando las limitaciones de este. Asimismo, se desea ampliar la investigación añadiendo un estímulo visual en sincronía con el estímulo vibrotáctil e incluir otro tipo de ilusión táctil de movimiento.

Por otro lado, este TFG también posee otras motivaciones subyacentes. La integración de la retroalimentación visual y táctil en las interfaces hombre-máquina es un campo en constante evolución y con amplias implicaciones en diferentes áreas, como la realidad virtual, la robótica y la medicina. Comprender cómo la retroalimentación visual puede influir en el sentido del tacto es fundamental para optimizar el diseño de interfaces hápticas más inmersivas y efectivas. Además, demostrar la relación existente entre ambos sentidos, permite revelar nuevas perspectivas sobre cómo se integran y procesan estas señales sensoriales en el cerebro humano.

En resumen, la motivación principal para realizar este TFG es culminar un estudio ya empezado sobre las ilusiones táctiles de movimiento, eliminando las limitaciones que presenta, añadiendo retroalimentación visual y analizando los resultados. Sin embargo, otras motivaciones también afloran en el estudio pues contribuye al avance en el campo de las interfaces hápticas y proporciona una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de las ilusiones sensoriales.

### 1.3. Objetivos del Trabajo Fin de Grado

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es tomar el relevo de una investigación previa [1] para conocer la influencia de la retroalimentación visual sobre la percepción de ilusiones táctiles de movimiento. Con este objetivo, primero se diseña un entorno experimental que elimina las limitaciones que se observan en la investigación anterior y después se amplía para incluir la influencia de la retroalimentación visual en la investigación. Se plantean dos hipótesis:

- **Hipótesis 1.** *La distancia percibida recorrida por un punto ilusorio táctil puede modificarse variando la duración del estímulo vibrotáctil, incluso provocando que el punto ilusorio se per-*

ciba fuera de la mano (espacio real entre actuadores). Para verificarla se diseña el *Experimento 1* (Subsección 3.2).

- **Hipótesis 2.** *La distancia percibida recorrida por un punto ilusorio táctil puede modificarse variando la distancia recorrida por un punto visual que se mueve en sincronía, incluso provocando que el punto ilusorio táctil se perciba fuera de la mano (siendo el espacio real entre actuadores de 7 cm).* Para verificarla se diseña el *Experimento 2* (Subsección 3.3).

Para poder verificar las hipótesis propuestas, en este TFG de investigación se siguen una serie de pasos:

- **Estudio de los antecedentes y la bibliografía científica asociada.** Se pretende ahondar en el conocimiento sobre ilusiones táctiles de movimiento aparente, el tema central sobre el cual se sustenta este Proyecto Fin de Grado. Se analiza especialmente el artículo base [1] pues es el punto de partida del TFG, primero se ha de replicar y mejorar parte de los experimentos descritos en [1] para después, intentar verificar si es posible mejorar la percepción de estímulos táctiles fuera de la mano usando retroalimentación visual. Asimismo, es necesario dominar la síntesis de las señales que generan la ilusión táctil.
- **Estudio teórico.** Implica asimilar los conceptos básicos en los que se sustenta el proyecto.
- **Familiarización con los actuadores vibrotáctiles.** Para poder realizar el experimento, previamente se debe comprender el funcionamiento de los dispositivos vibrotáctiles y asimilar las distintas ilusiones táctiles que se generan con ellos.
- **Preparación de entorno experimental.** Abarca todo el proceso de diseño de hardware y software del TFG, desde el diseño en 3D, la construcción de dispositivos vibrotáctiles, la programación de las interfaces gráficas y la puesta a punto del entorno experimental.
- **Realización de experimentos.** Hace referencia a la realización de los experimentos bajo un riguroso protocolo y la recopilación de los resultados aportados por cada participante.
- **Análisis de resultados y conclusiones.** Los datos aportados por los voluntarios se agrupan en un mismo fichero de Excel, se trasladan al entorno de MATLAB y se realizan las estadísticas adecuadas. Después, en base a los resultados de las estadísticas, se redactan las conclusiones pertinentes del estudio realizado.
- **Escritura de la memoria.**

## 1.4. Estructura de la memoria

La memoria de este Proyecto Fin de Grado se divide en seis capítulos y seis anexos con sus subapartados correspondientes. Además del resumen del TFG, al principio de la memoria se incluye la declaración de originalidad del trabajo, una página con agradecimientos, un índice general, una lista de tablas y una lista de figuras. De igual modo, al final del documento se encuentran reflejadas las referencias bibliográficas, un glosario, una lista de siglas empleadas y de definiciones utilizadas.

A continuación, se proporciona un resumen conciso del contenido de cada capítulo. Sin embargo, es importante destacar que al inicio de cada uno se incluye una introducción detallada que aborda el contenido específico, resalta las ideas clave abordadas y describe los procedimientos llevados a cabo.

- **Capítulo 1.** Es la introducción general del Trabajo Fin de Grado, en él se explica en qué consiste, cuál es la motivación que propicia su desarrollo, así como los objetivos que se plantean alcanzar.
- **Capítulo 2.** Constituye una parte fundamental de esta memoria, ya que brinda una visión teórica exhaustiva que sienta los cimientos sobre los cuales se construyen los conocimientos y desarrollos posteriores. A través de un análisis riguroso y conciso, se exploran las teorías y conceptos fundamentales que respaldan este trabajo y las decisiones que se toman a lo largo del mismo.
- **Capítulo 3.** Se sumerge en el diseño de los dos experimentos constituyentes de esta investigación. Para cada experimento, se plantea una hipótesis, se describe el entorno experimental, la muestra de la que se obtienen los datos y el protocolo experimental. Este capítulo, describe globalmente los experimentos desde un punto de vista psicofísico, es decir, se diseñan los experimentos y sus detalles sin incidir en los aspectos técnicos subyacentes.
- **Capítulo 4.** Partiendo del diseño experimental previo, este capítulo trabaja en la implementación del mismo. Brinda una visión meticulosa y completa de los diferentes elementos y etapas involucrados, desde la síntesis de las señales ilusorias y el diseño de actuadores vibrotáctiles hasta el desarrollo de la interfaz gráfica y los soportes que se diseñan. Cada aspecto es cuidadosamente abordado desde un punto de vista técnico, para la realización de los experimentos y la adecuada toma de datos.
- **Capítulo 5.** Se dedica a un análisis detallado y preciso de los resultados de la experimentación, proporcionando una valoración inicial de los hallazgos recopilados y planteando perspectivas de mejora. Este análisis crítico contribuye a una comprensión más profunda de los resultados que se obtienen y sirve como base para la conclusión final del TFG.
- **Capítulo 6.** Se desarrollan las conclusiones donde se sintetizan los resultados analizados y se extraen las principales implicaciones de la experimentación que se realiza. Estas conclusiones contribuyen al conocimiento existente en el campo de las ilusiones táctiles y la retroalimentación visual.

## 2. Marco teórico

Este capítulo es el pilar conceptual para la comprensión del estudio. En su transcurso, diversos subapartados exploran las ilusiones existentes en los diferentes campos sensitivos, analizan las ilusiones táctiles y la generación de movimiento aparente, desglosan los conceptos físicos subyacentes y profundizan en los principios ergonómicos que se emplean en la fabricación de ciertos elementos que se utilizan en el proyecto. Todos estos apartados se fusionan para ofrecer una comprensión integral de los fundamentos teóricos que guían la investigación en el ámbito de las ilusiones táctiles y la percepción multisensorial.

### 2.1. Ilusiones en diferentes dominios perceptuales y cognitivos

#### 2.1.1. Ilusiones visuales

Estas ilusiones se caracterizan por generar discrepancias entre la información sensorial recibida por el sentido de la vista y la interpretación que el cerebro realiza de dicha información. A lo largo de décadas, investigadores de la percepción demuestran cómo la mente humana puede ser manipulada por patrones visuales complejos que resultan en percepciones distorsionadas o erróneas. Estas ilusiones se producen debido a la manera en que el cerebro procesa y organiza la información visual.

Un estudio pionero en el campo de las ilusiones visuales es el clásico trabajo de Kanizsa (1955) [3], que presenta el fenómeno conocido como “contornos de Kanizsa”. En esta ilusión, el cerebro rellena automáticamente los espacios en blanco entre fragmentos incompletos de un objeto, creando así la percepción nítida de un objeto completo (ver Figura 2a). Además, ilusiones como la de Müller-Lyer (1889), en las que se basan diversos artículos como el que publica Thorsten Plewan [4], muestran cómo la disposición de las líneas llevan al observador a percibir diferencias en la longitud de las líneas, cuando en realidad son idénticas. Estos ejemplos resaltan cómo la percepción visual puede ser influenciada no solo por la información proveniente de los sentidos, sino también por la organización y las expectativas cognitivas.

Investigaciones más contemporáneas profundizan en cómo las ilusiones visuales pueden estar relacionadas con la forma en que el cerebro procesa y compara diferentes características visuales, como el tamaño, la orientación y la posición de los elementos en una escena. Por ejemplo, el trabajo de Rock (1983) [5] sobre la “ilusión de la habitación Ames” revela cómo la percepción de un espacio tridimensional puede ser alterada mediante la manipulación de la perspectiva, generando así una ilusión de tamaño y forma de los objetos en la habitación.

No obstante, es el oftalmólogo estadounidense Adelbert Ames, Jr quién inventa la ilusión óptica de Ames en 1951. Esta ilusión que se basa en conceptos aportados por Hermann von Helmholtz <sup>1</sup>, consiste en una habitación trapezoidal (ver Figura 2b). La mente interpreta que esa habitación tiene que ser recta, pero la perspectiva está totalmente deformada, ya que el lado iz-

---

<sup>1</sup>Hermann von Helmholtz: científico alemán conocido principalmente por la ley de conservación de la energía y por la invención del oftalmoscopio. Sus aportaciones en el campo de la fisiología, la psicología, la óptica, la acústica y la electrodinámica impulsaron mucho el pensamiento científico del siglo XIX y sus trabajos más importantes están en la frontera entre la física y la fisiología

quierdo es más grande que el derecho. Las paredes están inclinadas, al igual que el suelo y el techo, y la esquina derecha está más cerca para el observador frontal que la esquina izquierda. Esta disorción visual de la realidad se emplea asiduamente en el mundo cinematográfico, de hecho, una de las películas donde más se utiliza es *El Señor de los Anillos*, de Peter Jackson, donde aplica esta ilusión para hacer parecer a los hobbits mucho más bajos de lo que son con respecto al resto de personajes de la película.

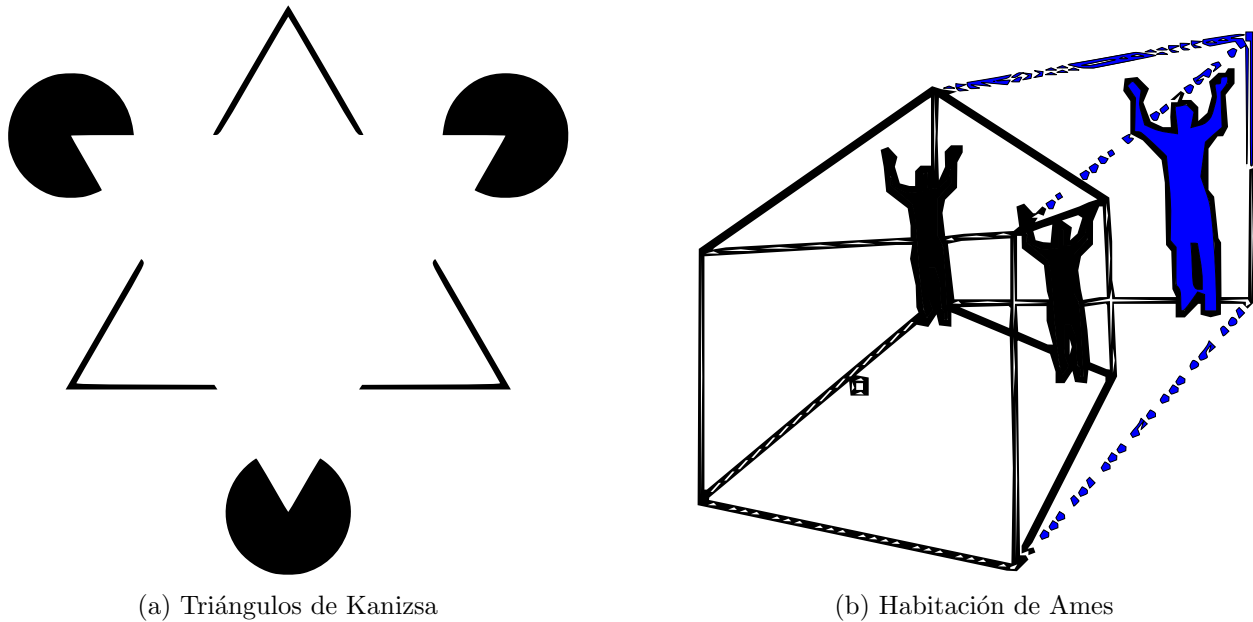


Figura 2: Ejemplos de ilusiones visuales

### 2.1.2. Ilusiones auditivas

Estas ilusiones son fenómenos en los que el sentido del oído interpreta el sonido de una manera que difiere de la información real presente en el entorno. A través de la manipulación de características como la frecuencia, la duración y la ubicación espacial del sonido, las ilusiones auditivas cuestionan la relación entre los estímulos auditivos y la interpretación que el cerebro les otorga.

Una obra influyente en el ámbito de las ilusiones auditivas es el trabajo de Plomp, R., y Levelt, Willem Johannes Maria (1965), *Tonal Consonance and Critical Bandwidth* [6]. En esta investigación, los autores exploran la percepción del tono fundamental (el fenómeno “The Missing Fundamental”) en la música, demostrando cómo el sistema auditivo humano es capaz de reconstruir un tono fundamental que no está presente en un estímulo auditivo, basándose en las relaciones armónicas entre las frecuencias de los tonos superiores. Este fenómeno ilustra cómo las percepciones auditivas son moldeadas por mecanismos cognitivos y cómo el cerebro completa activamente la información faltante para formar una experiencia auditiva coherente.

### 2.1.3. Ilusiones cognitivas

Dentro del panorama de las ilusiones, las ilusiones cognitivas resaltan cómo los procesos de pensamiento y razonamiento influyen en la percepción humana. Estas ilusiones muestran cómo las suposiciones, creencias y expectativas pueden conducir a conclusiones erróneas, revelando así la interacción profunda entre los aspectos perceptuales y cognitivos de la experiencia humana.

Un artículo relevante en este campo es *Towards a science of magic* (2008) [7]. Este estudio aborda el fenómeno de la magia desde un punto de vista novedoso, explorando cómo los trucos de magia pueden ilustrar la interacción entre la atención, la percepción y la cognición. Los autores sugieren que los efectos de ilusión utilizados en la magia pueden proporcionar información valiosa sobre cómo el cerebro procesa la información, anticipa eventos y construye la realidad percibida.

Por otro lado, un trabajo seminal<sup>2</sup> en el estudio de las ilusiones cognitivas es el artículo *Cognition does not affect perception: Evaluating the evidence for top-down effects* de Firestone, C., y Scholl, B. J. (2016) [8]. En contraste con los recientes estudios que alegan que estados como creencias, deseos, emociones, motivaciones o intenciones ejercen influencias directas en lo que vemos, los autores Scholl y Firestone recuperan la tradicional comprensión “modular” de la percepción, según la cual el procesamiento visual está encapsulado y separado de la cognición de nivel superior.

### 2.1.4. Ilusiones temporales

Las ilusiones temporales son fenómenos perceptuales en los que la percepción del tiempo y su transcurso se ve distorsionada. Estas ilusiones pueden manifestarse en diversas formas, como la sobreestimación o subestimación del tiempo transcurrido, la alteración de la secuencia temporal de eventos o la percepción de intervalos temporales que difieren de la realidad.

Una contribución destacada en el estudio de las ilusiones temporales es el artículo *Timing in the absence of clocks: encoding time in neural network states* de Buonomano y Karmarkar (2007) [9]. En esta investigación, los autores exploran cómo el sistema auditivo humano percibe y procesa intervalos temporales en el rango de milisegundos a segundos. A través de experimentos neurofisiológicos y modelos computacionales, Buonomano y Karmarkar analizan cómo las células cerebrales individuales y las redes neuronales contribuyen a la percepción temporal. Este trabajo resalta cómo la percepción del tiempo no es una experiencia pasiva, sino que está mediada por procesos cerebrales dinámicos y cómo las ilusiones temporales exponen a los mecanismos subyacentes.

### 2.1.5. Realidades virtuales

En el contexto actual de avances tecnológicos, las Realidades Virtuales (RVs) se convierten en un terreno fértil para explorar nuevas dimensiones de ilusiones perceptuales. A través de la interacción entre la tecnología y la percepción humana, las RVs ofrecen un entorno inmersivo en el que los estímulos visuales, auditivos y en algunos casos táctiles, pueden ser manipulados con precisión para inducir ilusiones que desafían la percepción sensorial convencional.

---

<sup>2</sup>Seminal: de la semilla o relativo a ella. Hace referencia al origen o comienzo de algo

Un estudio importante en el campo de las RVs es el trabajo titulado *Visual Realism Enhances Realistic Response in an Immersive Virtual Environment* [10]. En esta investigación, los autores exploran cómo la percepción y las respuestas emocionales pueden ser influidas por el nivel de realismo visual en un entorno virtual. Los resultados indican que las respuestas emocionales y la percepción de la propia presencia en la escena virtual aumentan con el mayor grado de realismo visual.

En un ámbito más amplio, a parte de las conocidas aplicaciones en videojuegos [11], las RVs trascienden la mera experimentación perceptual para convertirse en herramientas impactantes en campos como la educación [12], la psicoterapia, la rehabilitación médica y la capacitación industrial. La simulación de situaciones y entornos en realidad virtual permite a los usuarios experimentar escenarios realistas en un ambiente controlado, generando ilusiones que pueden influir en la toma de decisiones, la adquisición de habilidades y la superación de fobias. Además, en la medicina y rehabilitación, la aplicación de ilusiones en entornos virtuales puede acelerar la recuperación motora y cognitiva al estimular procesos de aprendizaje y plasticidad neuronal. De hecho, un artículo de 2017 [13], aborda el uso de la realidad virtual como un complemento en el tratamiento del dolor en pacientes con quemaduras durante la terapia física.

En resumen, la expansión en los campos de uso de las RVs no solo es fascinante desde el punto de vista sensorial, sino también es valiosa en sus muy diversas áreas de aplicación.

### 2.2. Ilusiones táctiles

#### 2.2.1. Fundamentos de las ilusiones táctiles

Las ilusiones táctiles hacen referencia a fenómenos que se perciben por el sentido del tacto que son confusos para el cerebro y resultan en unas percepciones que difieren de la estimulación física real.

Por otro lado, las ilusiones hápticas desempeñan un papel fundamental en la percepción háptica<sup>3</sup> porque una ilusión háptica es en esencia, táctil, puesto que la palabra “háptico” proviene del griego háptō (relativo al tacto).

Los mecanismos perceptuales involucrados en la generación de ilusiones táctiles son diversos e incluyen la interacción compleja entre las entradas táctiles y la interpretación del cerebro. La adaptación sensorial y la integración multisensorial contribuyen a la experiencia de ilusiones táctiles, lo que sugiere que las percepciones táctiles dependen de la información sensorial y de factores cognitivos.

#### 2.2.2. Ilusiones táctiles clásicas

Las ilusiones táctiles, desde los primeros estudios existentes como el artículo *El sentido del tacto y la sensibilidad común* de Ernst Weber (1834) [14], desafían la comprensión de cómo se

---

<sup>3</sup>Ilusión o percepción háptica: es el efecto o ilusión que busca recrear las sensaciones corporales de cualquiera de los sentidos de forma artificial

interpreta y experimenta el mundo a través del sentido del tacto. Estas ilusiones representan un campo de investigación fascinante donde la percepción sensorial puede ser magistralmente alterada, revelando una interesante relación entre los sentidos y la mente. Entre las ilusiones táctiles más conocidas, destacan:

- **Síndrome de la extremidad fantasma.** Es una patología común entre las personas amputadas, las cuales perciben dolor, picor, disestesias<sup>4</sup> y/o sensación térmica en un miembro que ya no poseen. Este fenómeno afecta a dos tercios de los amputados.
- **La ilusión de Aristóteles.** Ocurre cuando uno cruza los dedos y toca un objeto, como una zanahoria o un bolígrafo. Dean Burnett en su libro *El cerebro idiota* [15] la explica así: “Parte de nuestra capacidad para identificar cosas tocándolas se produce gracias a que el cerebro es consiente de cómo están dispuestos nuestros dedos, por lo que, si tocamos algo pequeño (una canica, por ejemplo) con los dedos índice y corazón, sentiremos un solo objeto. Pero si cruzamos esos dos dedos y cerramos los ojos, sentiremos más bien dos objetos distintos.” Esta ilusión se debe a la comunicación entre el córtex somatosensorial que procesa el tacto y el córtex motor, que mueve los dedos, tal como se explica en la web de divulgación científica *Xataka Ciencia* [16].

---

<sup>4</sup>Disestesia: del griego antiguo “sensación anormal”, es una sensación o percepción que se suele describir como dolor, picor, quemazón o de restricción. Principalmente ocurre por daños en el tejido nervioso

- **La ilusión de la mano de goma.** Destaca por su capacidad para crear una sensación de cuerpo alterado. Este fenómeno se explora en el estudio de Botvinick y Cohen, *Rubber Hands “Feel” Touch That Eyes See* (1998) [17], donde demuestran cómo la sincronización de toques visibles en una mano de goma y toques reales en la mano del participante puede llevar a la ilusión de que la mano de goma es parte del propio cuerpo.
- **La ilusión del tamaño.** Investigada por M. R. Longo and P. Haggard. en *An implicit body representation underlying human position sense* (2010) [18], revela cómo la estimulación táctil en diferentes áreas corporales puede influir en la percepción del tamaño de las partes del cuerpo.
- **La ilusión de la pizarra.** Escribir en la pizarra sin tapones para los oídos, luego borrar y volver a escribir usando tapones para los oídos. Al no oír el sonido de la tiza, el tacto de esta con la pizarra se percibe con mayor suavidad de forma inconsciente, tal como se menciona en el artículo *El tacto también es una alucinación controlada* (2015) [19].

En lo que sigue, el capítulo se centra en las ilusiones táctiles que generan sensación de movimiento y se emplean en este trabajo.

## 2.3. Ilusiones táctiles de movimiento

### 2.3.1. Sensaciones fantasma de movimiento

La *Sensación Fantasma de Movimiento* se refiere a la percepción de una sensación de movimiento continuo aunque no se esté produciendo un desplazamiento real. Este fenómeno, se puede entender de dos formas diferentes:

- Un movimiento ficticio situado en una parte del cuerpo, como podría ser un brazo. Por ejemplo, en la Figura 3a, se aprecia la existencia de dos dispositivos capaces de alterar la percepción de la realidad, recreando un desplazamiento ilusorio de un punto entre dos localizaciones diferentes de un mismo brazo.
- Una sensación táctil de expansión o lejanía. Al igual que cuando se abre un paraguas automático, se percibe en el mano la expansión del objeto más allá de la propia mano, una *Sensación Fantasma de Movimiento* puede manipular la percepción táctil y crear una ilusión de movimiento fuera del alcance del sentido del tacto, tal como se parecía en la Figura 3b.

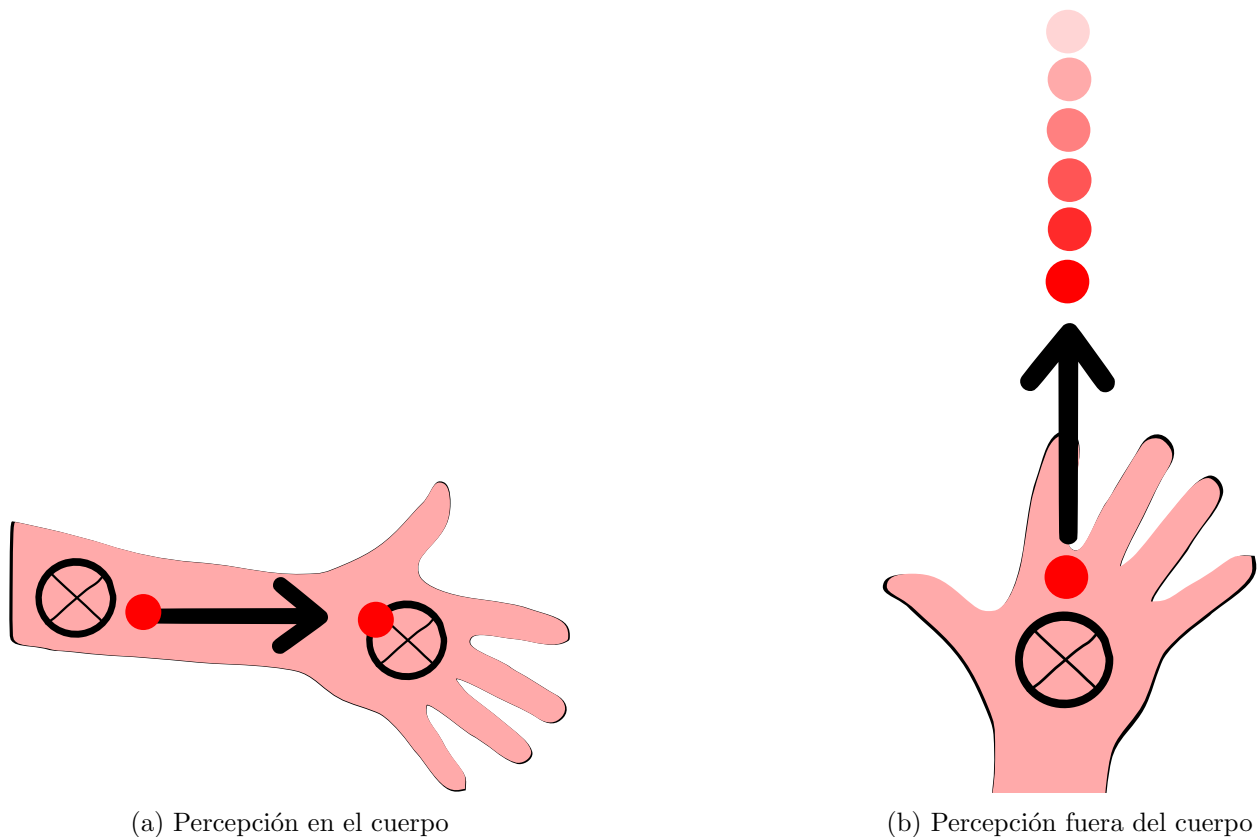


Figura 3: Representación gráfica de una *Sensación Fantasma de Movimiento*

En relación con las *Sensaciones Fantasma de Movimiento*, el artículo *Information Transmission by Phantom Sensations* (David S. Alles, 1970) [20] desarrolla un sistema de ayuda sensorial a través de un movimiento vibratorio en la piel. La ubicación de la sensación está controlada mediante el uso del fenómeno de la *Sensación Fantasma de Movimiento*. Este estudio, expone que las *Sensación Fantasma de Movimiento* son efectivas para proporcionar información cinestésica<sup>5</sup> y táctil a amputados por encima del codo a través de una retroalimentación vibratoria controlada por la posición del codo de una prótesis. Aunque no es igual a la retroalimentación humana original, el sistema es capaz de proporcionar información útil en movimientos moderados y de posicionamiento absoluto.

### 2.3.2. Cutaneous Rabbit

En el artículo *The Cutaneous Rabbit: A Perceptual Illusion* (F. A. Geldard y C. E. Sherrick, 1972) [21], se describe la ilusión perceptual conocida como el “conejo cutáneo”, en la cual se generan localizaciones anómalas de pulsos mecánicos o eléctricos en la piel al estimular puntos corporales distantes con secuencias sucesivas de toques.

<sup>5</sup>Cinestésico: de la cinestesia o relativo a ella. La cinestesia, kinestesia o quinesia es la rama de la ciencia que estudia el movimiento humano

En el experimento, se observa que al entregar cinco pulsos breves en la piel (cada uno con una duración de  $2\text{ ms}$ ) a un punto cerca de la muñeca, seguidos de cinco pulsos en un punto a  $10\text{ cm}$  del anterior (en mitad del brazo) y luego otros cinco pulsos en un punto  $10\text{ cm}$  más alejado (próximo al codo), los participantes perciben una serie de saltos suaves a lo largo del brazo, similar al movimiento de un “conejo saltando” (ver Figura 4). La percepción de estos saltos parece depender del intervalo de tiempo entre los pulsos (Interstimulus Interval (ISI)), con intervalos óptimos entre  $40$  y  $60\text{ ms}$  para una percepción clara y uniforme de los saltos. Además, se encuentra que la cantidad de pulsos entregados en cada punto (N) también influye en la experiencia, siendo un N entre 4 y 6 lo más efectivo.

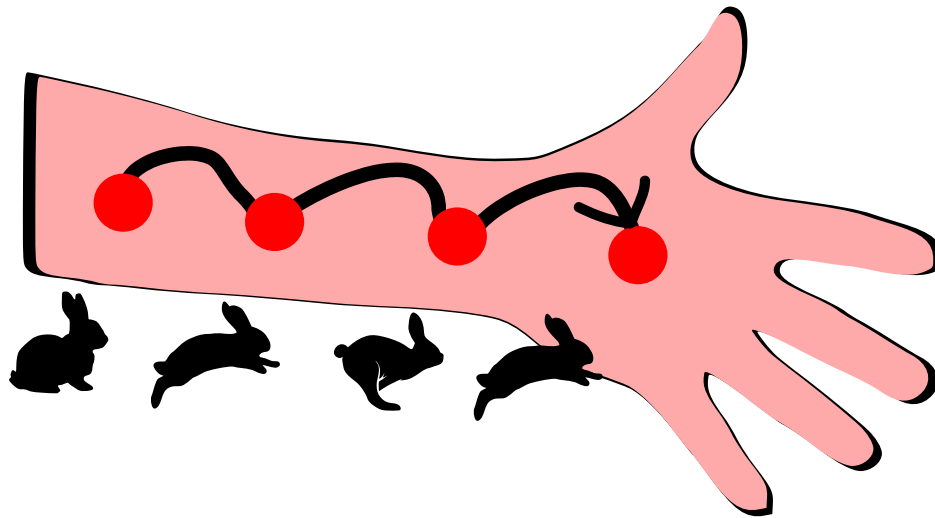


Figura 4: Representación gráfica de la ilusión *Cutaneous Rabbit*

Asimismo, los investigadores exploran la dirección de la secuencia de estímulos, la distancia entre los puntos de contacto y la regularidad de los pulsos como factores que afectan la percepción del “conejo cutáneo”. Se encuentra que la dirección de la secuencia no es crucial, ya que el efecto ocurre igual tanto en sentido ascendente como descendente. La distancia entre los puntos de contacto varía de  $2\text{ cm}$  a  $35\text{ cm}$  y se observa que, incluso puntos ampliamente separados pueden contribuir a la ilusión. Sin embargo, la irregularidad en la secuencia de pulsos perturba la percepción del “conejo”, lo que sugiere una dependencia de la regularidad temporal en la generación de la ilusión.

En resumen, el “conejo cutáneo” o *Cutaneous Rabbit* es un fenómeno perceptual que ilustra cómo el cerebro humano puede crear una experiencia de percepción unificada a partir de estímulos discretos en diferentes ubicaciones corporales. Al efectuar repetidos “toques” de zonas próximas de la piel, el cerebro tiende a “rellenar” el espacio entre los “golpecitos”, modelando una percepción táctil completa. Por ello, la ilusión sensorial *Cutaneous Rabbit* destaca la manera en la que el cerebro interpreta y organiza la información sensorial para crear una experiencia perceptual coherente, incluso cuando los estímulos son discretos y discontinuos en el espacio. Aunque la base teórica detrás de este fenómeno no está completamente comprendida, los investigadores identifican condiciones específicas, como el ISI y el N, que influyen en la experiencia de esta ilusión.

## 2.4. Conceptos físicos en los que se basan los actuadores vibrotáctiles

Un actuador vibrotáctil es un dispositivo diseñado para generar vibraciones perceptibles en la piel. Existen principalmente tres tipos de actuadores según se describe en el artículo *Vibrotactile Display: Perception, Technology, and Applications* [22]:

- **Actuadores electromagnéticos lineales.** Utilizan el electromagnetismo para generar estímulos vibrotáctiles. Están compuestos por una bobina con un alambre conductor y un material aislante, que al tener corriente eléctrica constante crea un campo magnético. Al acercarse materiales ferromagnéticos se generan fuerzas. Aplicando una corriente, se produce un campo magnético variable que genera vibraciones táctiles. Estos actuadores lineales se dividen en solenoides y bobinas de voz, ambos aplicados en retroalimentación táctil y fabricados en diversas dimensiones por varios fabricantes.
- **Actuadores electromagnéticos rotativos.** Utilizan motores de corriente continua (DC) para producir sensaciones vibrotáctiles. Estos motores están diseñados para rotar continuamente cuando se aplica un voltaje o corriente constante. Su estructura interna es más compleja que la de solenoides o bobinas de voz. Comúnmente, se fija una masa descentrada al eje de salida para ejercer fuerzas radiales sobre el cuerpo del motor al girar. Esto acopla tanto la frecuencia como la amplitud de la vibración al ritmo de rotación del motor. La sensación varía según la tensión aplicada, lo que limita las combinaciones de frecuencia y amplitud.
- **Actuadores no electromagnéticos.** Emplean el efecto piezoeléctrico para crear sensaciones vibrotáctiles. Este efecto implica que ciertos materiales sólidos cambian de forma al someterse a una tensión eléctrica, siendo reversibles. Los actuadores piezoeléctricos cerámicos de varias capas, en forma de disco o viga, son comunes en aplicaciones de retroalimentación táctil. Los actuadores de (Polímeros Electroactivos (PEA)), una opción más reciente, emplean elastómeros en lugar de cerámicas y logran deformaciones mayores con voltajes más bajos, aunque pueden presentar problemas de desgaste eléctrico y mecánico. Otras opciones incluyen actuadores de Shape Memory Alloy, aleación con memoria de forma (SMA), capaces de alterar sus propiedades mecánicas.

Los actuadores vibrotáctiles electromecánicos lineales se fundamentan en principios físicos sólidos para generar vibraciones perceptibles en la piel. Estos principios son esencialmente cuatro:

- Magnetismo
- Inducción electromagnética
- Corriente eléctrica
- Conversión de energía

### 2.4.1. Magnetismo

En el caso del magnetismo, el principio de la repulsión y atracción magnética es fundamental para crear movimientos oscilatorios. La corriente eléctrica que fluye a través de una bobina induce

un campo magnético que interactúa con imanes permanentes. Esta interacción genera fuerzas de atracción y repulsión que impulsan los movimientos vibratorios. Investigaciones como *New Magnetic Microactuator Design Based on PDMS Elastomer and MEMS Technologies for Tactile Display* (2010) [23] demuestran cómo el magnetismo se explota en la construcción de actuadores que generan patrones específicos de vibración en la piel, ofreciendo una gama diversa de sensaciones táctiles.

#### 2.4.2. Inducción electromagnética

La inducción electromagnética es otro principio crucial en la generación de vibraciones en actuadores vibrotáctiles. Mediante cambios en el flujo magnético alrededor de una bobina, se induce una corriente eléctrica en la bobina, lo que resulta en la generación de fuerzas mecánicas que impulsan el movimiento vibratorio. La publicación *The Touch Thimble: Providing Fingertip Contact Feedback During Point-Force Haptic Interaction* (2008) [24] ilustra no sólo cómo fabricar dispositivos hápticos sino también, cómo la inducción electromagnética puede ser utilizada para proporcionar retroalimentación táctil en aplicaciones interactivas.

#### 2.4.3. Corriente eléctrica

La corriente eléctrica también tiene un propósito clave en la generación de vibraciones hápticas. Aplicar una corriente eléctrica oscilante a una bobina crea un campo magnético que varía con el tiempo, proporcionando un método sencillo para generar vibraciones táctiles. Este mismo principio físico se utiliza en los altavoces de audio para crear las variaciones de presión de aire de amplia frecuencia que los humanos perciben como sonidos.

Además, la modulación precisa de la corriente eléctrica permite controlar la frecuencia y la amplitud de las vibraciones generadas, contribuyendo a la rica variedad de experiencias táctiles que los actuadores vibrotáctiles pueden ofrecer.

#### 2.4.4. Conversión de energía

En la conversión de energía, los actuadores vibrotáctiles transforman energía eléctrica en mecánica. En el contexto de la retroalimentación táctil, la eficiencia en la conversión de energía es crucial. La optimización de la conversión energética contribuye a la durabilidad y eficacia de los dispositivos hápticos. Investigaciones como *A Miniature Multimodal Actuator for Effective Tactile Feedback: Design and Characterization* (2016) [25] exploran cómo maximizar la eficiencia en la conversión de energía para crear actuadores compactos y eficaces. Los autores de este artículo, utilizan dos modalidades diferentes de actuadores al mismo tiempo para conseguir estimular diferentes tipos de mecanorreceptores y, por lo tanto, aumentar el ancho de banda para transferir información táctil.

## 2.5. Ergonomía

Las puntas de los dedos son de las zonas del cuerpo humano que continen más terminaciones nerviosas, de ahí que se asocie instintivamente el sentido del tacto a las manos, en vez de a toda la piel. Las manos son órganos muy complejos, cada una consta de 27 huesos diferentes.

En el artículo *Ergonomía II* (2017) [26], se estudia la anatomía de la mano, las capacidades y limitaciones motoras, así como la antropometría<sup>6</sup> de la mano. Teniendo en cuenta las medidas de las manos según la norma DIN 33 402, entre los 10,8 *mm* y 15,4 *mm* de diámetro de agarre de la mano, se encuentran el 95 % de los hombres y prácticamente el 100 % de las mujeres. De este modo, para fabricar una herramienta de trabajo, lo más conveniente es proporcionarle un diámetro de agarre entre 10,8 *mm* y 15,4 *mm*.

Las medidas mencionadas por [26] son adecuadas para la fabricación de herramientas que se deben manipular y se puede aplicar fuerza sobre ellas. No obstante, si la funcionalidad que se desea obtener es diferente, dichas medidas cambian. Por ejemplo, los manillares de las motocicletas se diseñan con el objetivo de que el conductor del vehículo se apoye sobre los mismos y que los pueda girar con comodidad. Por ello, según [27], los manillares de las motocicletas tienen un diámetro de agarre entre los 22 *mm* y 35 *mm*, siendo este último el diámetro más ergonómico para la funcionalidad de manillar pero también es la opción más costosa y pesada.

---

<sup>6</sup> Antropometría: es el estudio cuantitativo de las características físicas del ser humano

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco



### 3. Diseño experimental

Este capítulo es una guía detallada de los dos experimentos centrales de esta investigación. Cada experimento se diseña minuciosamente, comenzando por una hipótesis, seguida por la descripción del entorno experimental, la muestra de participantes y el protocolo experimental. El capítulo se enfoca en el diseño psicofísico, resaltando la interacción entre la retroalimentación visual y los estímulos táctiles sin entrar en detalles técnicos, lo que proporciona una base sólida para comprender la metodología detrás de los experimentos.

#### 3.1. Antecedentes del estudio y punto de partida

El presente trabajo se fundamenta en el artículo *Phantom Sensation: When the phantom escapes the bounds of the actuators and the end-point is sensed in the air* (2019) [1]. Este artículo presenta un estudio experimental llevado a cabo en París que se enfoca en la investigación de las *Sensaciones Fantasma* y la percepción de interacciones espacio-temporales en el ámbito táctil. Consta de diferentes experimentos, en los que los participantes sujetan un dispositivo (con apariencia de mango) provisto de *Sensaciones Fantasma de Movimiento* de diferente duración. Dichas ilusiones, se reproducen haciendo uso de dos actuadores vibrotáctiles separados 7 cm entre sí que vibran según una onda arcotangente de frecuencia 2 KHz que se genera a través de MATLAB <sup>7</sup> y se envía a los actuadores por medio de la tarjeta NI USB6001, tal como se muestra en la Figura 1a.

En primer lugar, se emplea el dispositivo de la Figura 5. Se examina la capacidad de los participantes para detectar la dirección de la ilusión táctil. Tras el análisis de los datos correspondientes, se revela que la duración del estímulo no tiene un efecto significativo en la discriminación de la dirección cuando las duraciones del mismo están en el rango de 0,25 s a 2,5 s.

---

<sup>7</sup>MATLAB: MATLAB (MATrix LABoratory) es un lenguaje basado en matrices que permite la expresión natural de las matemáticas computacionales. Es una plataforma de programación diseñada específicamente para los ingenieros y científicos.

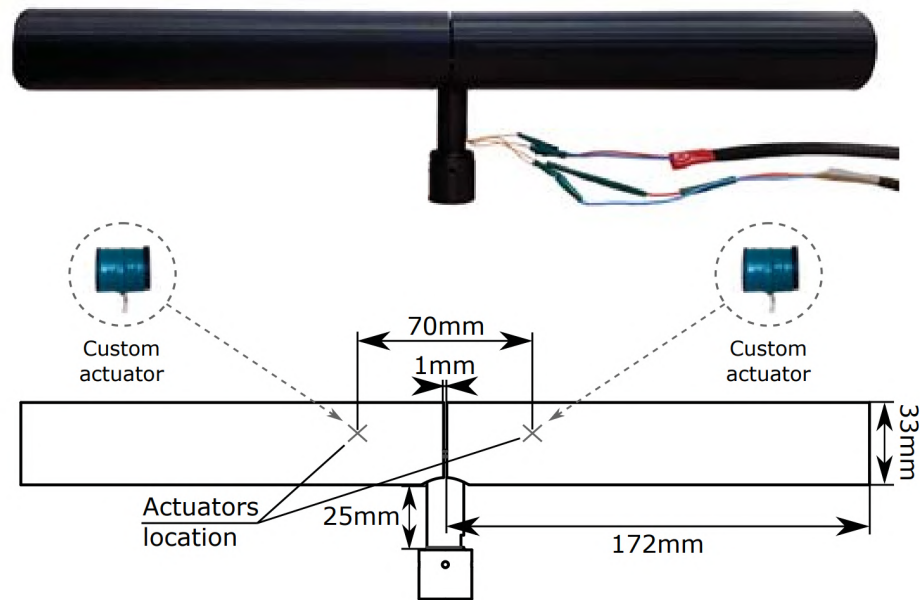


Figura 5: Mango largo utilizado en [1] y su vista sagital

En segundo lugar, se investiga la percepción del punto final del movimiento fuera de la mano del participante. Se utiliza el mismo mango largo de la Figura 5. Los participantes reciben estímulos táctiles con diferentes duraciones e indican dónde perciben el punto final del movimiento en una hoja de papel que representa el mango que sujetan (ver Figura 1b). Los resultados muestran que cuando la duración del estímulo es mayor a 0,77 s, los participantes perciben el punto final fuera de su mano, incluso más allá de los límites físicos del objeto que sostienen.

En tercer lugar, se explora la percepción del punto final del movimiento fuera del objeto que los participantes sostienen. Se utiliza un mango o soporte vibrotáctil más corto (ver Figura 6), pero se presenta a los participantes la representación visual de un mango largo (ver Figura 1b). De nuevo, los participantes sienten las ilusiones táctiles y se les pide que indiquen dónde perciben el punto final del movimiento en la hoja de papel que representa el mango largo. Los resultados indican que cuando la duración del movimiento es mayor a 1,5 s, los participantes perciben el punto final del movimiento fuera del objeto, incluso en el espacio circundante, en lugar de limitarse a la forma física del objeto que sostienen.

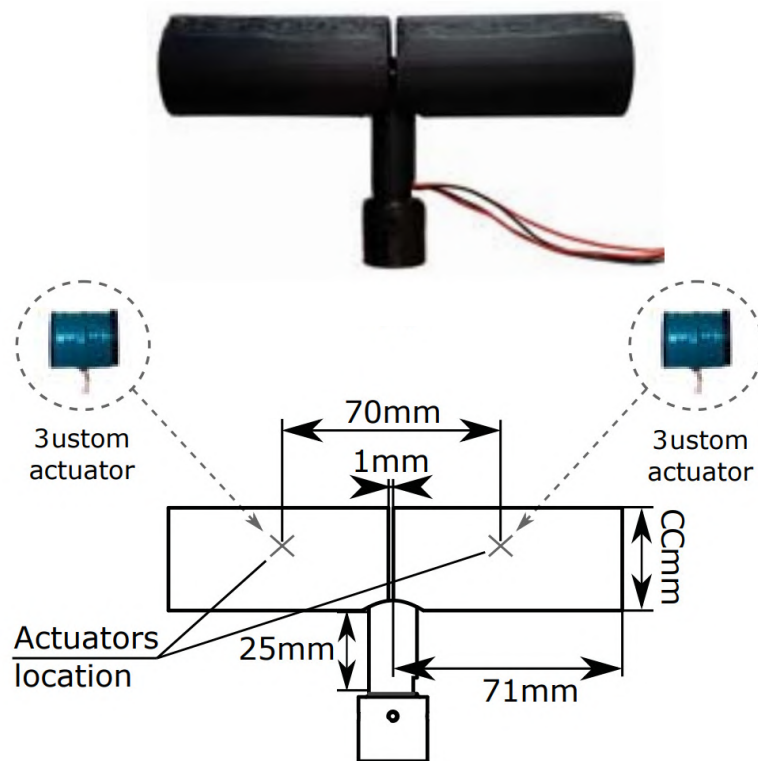


Figura 6: Mango corto utilizado en [1] y su vista sagital

Respecto a los experimentos que se desarrollan en este Trabajo Fin de Grado, son dos:

- **Experimento 1.** Se diseña con el objetivo de eliminar las limitaciones de [1].
- **Experimento 2.** Es la ampliación natural del *Experimento 1*, donde se desean añadir estímulos visuales en sincronía con estímulos vibrotáctiles.

Al analizar y comparar los resultados de ambos experimentos, se pretende averiguar si realmente existe una interacción compleja subyacente entre la retroalimentación visual y táctil. Además, esta exploración tiene el potencial de generar insights<sup>8</sup> valiosos para aplicaciones prácticas como sistemas de asistencia, rehabilitación y entornos de realidad virtual.

En resumen, esta sección de la memoria establece los antecedentes de la investigación y marca el punto de partida para el desarrollo del proyecto. Se replica y mejora un experimento y se expande el análisis al introducir retroalimentación visual. Con el propósito de comprender la relación entre la percepción táctil y visual en mayor profundidad, este proyecto contribuye al avance del conocimiento en un campo de estudio en constante evolución.

<sup>8</sup>Insight: “visión interna” o “clave”, es la esencia que permite entender la verdad o resolver un problema



## 3.2. Experimento 1 - Percepción de un punto vibratorio móvil (continuo y a saltos)

### 3.2.1. Hipótesis

Se establece la hipótesis que se debe constatar, la cual condiciona el diseño del primer experimento. En la Subsección 1.3, se enuncia previamente esta hipótesis:

*La distancia percibida recorrida por un punto ilusorio táctil puede modificarse variando la duración del estímulo vibrotáctil, incluso provocando que el punto ilusorio se perciba fuera de la mano (espacio real entre actuadores).*

Para verificarla se diseña el *Experimento 1* (Subsección 3.2).

Con esta finalidad, el primer experimento de este TFG aspira a implementar una réplica mejorada de uno de los experimentos ejecutados en [1]. La realización de este experimento no solo permite verificar la hipótesis enunciada, sino que también posibilita eliminar las limitaciones previas que se resaltan en [1] y establecer una base sólida sobre la que comparar el segundo experimento (con retroalimentación visual), empleando un mismo escenario e iguales condiciones.

### 3.2.2. Entorno experimental

El entorno experimental se basa principalmente en una interfaz vibrotáctil y una interfaz gráfica. La interfaz vibrotáctil se compone de dos soportes vibrotáctiles situados en la parte inferior de dos mesas contiguas. Estos soportes vibrotáctiles tienen forma de “L”, el segmento más largo de 181 mm de longitud constituye el área donde se reproducen las ilusiones vibrotáctiles, mientras que el segmento más corto mide 50 mm y se emplea para enlazar el soporte con la mesa (ver Figura 7). En el interior de la estructura vibrotáctil, cuyo diseño tiene un enfoque ergonómico, se alojan dos actuadores vibrotáctiles separados 7 cm entre sí. Los actuadores, se colocan en posición vertical, con la tapa orientada hacia la mesa y se inmovilizan horizontalmente haciendo uso de dos topes de silicona fabricados específicamente con esta función. Además, el cable de los actuadores atraviesa uno de los dos topes de siliconas que lo envuelven, lo que implica que los dos actuadores se inmovilizan verticalmente también.

Respecto a la interfaz gráfica, se muestra en una pantalla táctil que se instala sobre un soporte móvil. La colocación precisa del soporte en una de las dos mesas se debe a la necesidad de situar la pantalla alineada con los soportes vibrotáctiles, sobre las mesas pero sin apoyarse sobre estas, para evitar cualquier interferencia entre los actuadores vibrotáctiles. Al emplearse un soporte móvil, ajustar la posición exacta de la pantalla y su inclinación resulta fácil y cómodo.

Por otro lado, el entorno experimental consta de unos auriculares para reproducir ruido marrón y una silla regulable en altura y provista de apoyabrazos, con la finalidad de que los participantes del experimento apoyen el brazo de su mano dominante en la silla y mantengan una posición ergonómica y estable durante la sesión. Asimismo, una tela blanca cubre la interfaz vibrotáctil para evitar que el tamaño que posee condicione las respuestas de los voluntarios.

El entorno experimental se esquematiza en la Figura 7, donde se muestra a grandes rasgos

el conexionado y disposición de los diferentes elementos que conforman el entorno experimental.

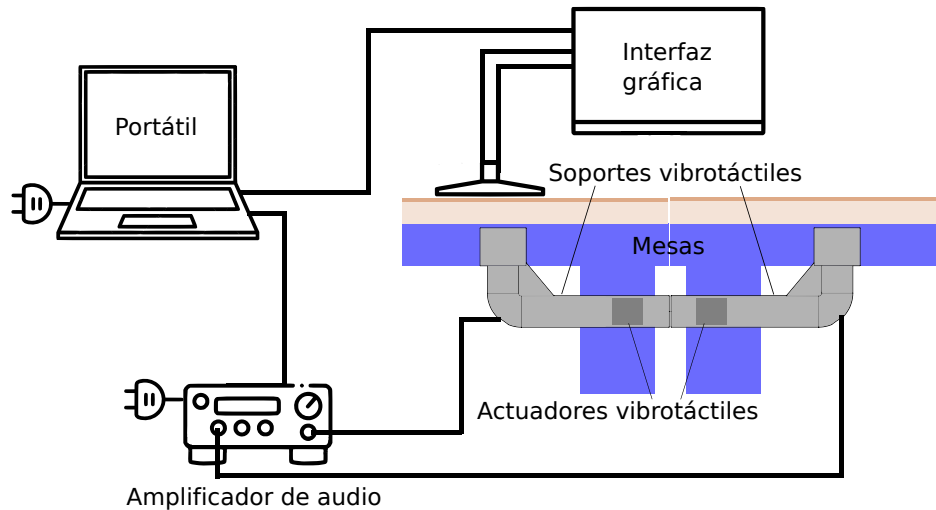


Figura 7: Esquemático del entorno experimental

El entorno experimental funciona de la siguiente forma:

- MATLAB y Audacity se emplean para generar las señales que se envían a los actuadores vibratorios, creando las *Sensaciones Fantasma de Movimiento* y las ilusiones *Cutaneous Rabbit*, respectivamente.
- La salida de audio del portátil utilizado para el experimento, se conecta a un amplificador de audio (modelo *Fosi audio TDA7498E mini power amplifier*) que amplifica la señal generada antes de que esta se envíe a los actuadores vibratorios.
- AppDesigner de MATLAB se utiliza para el diseño y la programación de la interfaz gráfica que se muestra a los participantes en la pantalla táctil conectada al portátil del experimento. La interfaz gráfica, presenta dos programas diferentes, uno para cada experimento que componen este estudio.

La interfaz del primer experimento, muestra una representación gráfica de los dos soportes vibratorios como si fuera un único tubo de mayor longitud. La localización exacta de la mano del participante aparece representada con un recuadro sombreado de 7 cm de longitud, localizado en el centro del “tubo”. Esta interfaz gráfica, pregunta por el punto de finalización del movimiento ilusorio que tiene lugar en la interfaz vibratoria (ver Figura 8). De este modo, recoge las coordenadas exactas de pulsación en la pantalla que efectúan los participantes al responder ante las diferentes experiencias.

- MATLAB también se utiliza para realizar las sesiones de entrenamiento previas a los experimentos. Estas sesiones de entrenamiento, se diseñan con el objetivo de que los voluntarios comprendan y asimilen las *Sensaciones Fantasma de Movimiento* y las ilusiones *Cutaneous Rabbit* antes de realizar el experimento.
- Los auriculares *JBL*, son Bluetooth y poseen cancelación activa del ruido externo, resultando ser idóneos para el experimento. Reproducen ruido marrón y evitan posibles distracciones sonoras de los participantes durante la sesión experimental.



Figura 8: Representación de la interfaz gráfica del primer experimento

### 3.2.3. Participantes

Un total de 21 voluntarios participan en el primer experimento de este TFG. De los 21 voluntarios, 13 son hombres y 8 son mujeres, cuyas edades están comprendidas entre 21 y los 61 años. La media de edad de los participantes es 40,43 años, la mediana es 37 años y la desviación típica es 15,48. Esto último implica que los datos se encuentran dispersos respecto a la media. Es importante destacar que uno de los participantes se descarta por no superar adecuadamente las sesiones de entrenamiento y proporcionar resultados incoherentes. En la Figura 9 se reúnen gráficamente los resultados estadísticos anteriores y se descubre que las edades de los participantes no siguen una distribución normal (Gaussiana).

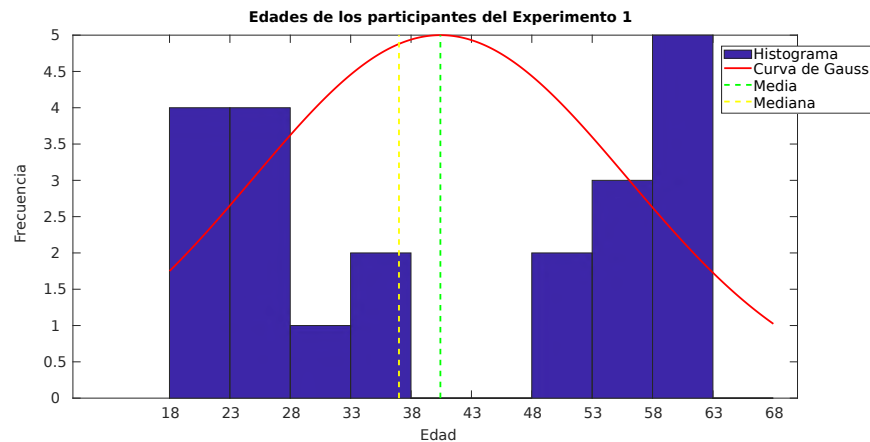


Figura 9: Distribución de la edad de los participantes y estadísticas descriptivas - *Experimento 1*

Los participantes que toman parte en el experimento reportan no padecer ningún tipo de trastorno motor, sensorial o neurológico. No se les informa sobre el objetivo del estudio, se le explica el experimento y aceptan su participación en la investigación firmando un consentimiento informado por escrito. Tanto el consentimiento informado (Anexo D.3), como el cuestionario general previo al experimento (Anexo D.4), aparecen en el Anexo D destinado a la documentación adicional.

La ejecución de los dos experimentos que constituyen esta investigación con participantes mayores de edad, tiene la aprobación del comité ético de la UMA, tal como se plasma en el Anexo C.

### 3.2.4. Protocolo experimental

Los participantes del experimento se acomodan en la silla ajustable en altura y con apoyabrazos que se les proporciona y sujetan la interfaz vibrotáctil con su mano dominante. La posición exacta de la silla depende de la altura del participante y de cuál sea su mano dominante, si es diestro la silla se sitúa ligeramente a la izquierda de la interfaz gráfica, de manera que coincida verticalmente la posición de la mano en el soporte vibrotáctil, con la representación gráfica de la mano en la interfaz gráfica. Igualmente, si el participante es zurdo, la silla se coloca levemente a la derecha de la interfaz gráfica.

El experimento se encuentra dividido en dos, una primera mitad de *Sensaciones Fantasma de Movimiento* con 10 experiencias distintas y una segunda mitad de ilusiones *Cutaneous Rabbit* con 6 experiencias diferentes. Antes de cada mitad del experimento, se somete al participante a una sesión de entrenamiento relacionada con el tipo de experiencias que le correspondan en cada momento. Así pues, los participantes usan auriculares bluetooth con ruido marrón y cierran sus ojos durante las sesiones de entrenamiento y en la segunda repetición de cada experiencia.

El objetivo de este experimento no es discernir la dirección del movimiento, por lo que una flecha en la interfaz gráfica indica la dirección del movimiento ilusorio (ver Figura 8). Además, es importante destacar que todas las experiencias se repiten dos veces y se ofrece al participante la posibilidad de repetir el movimiento vibratorio ilusorio las veces que estime oportuno.

El experimento dura aproximadamente 25 minutos, incluyendo la explicación inicial y 2 minutos de descanso en el ecuador de la sesión experimental.

### 3.3. Experimento 2 - Percepción combinada de puntos móviles vibratorios y visuales en sincronía (continuos y a saltos)

#### 3.3.1. Hipótesis

Antes de diseñar el segundo experimento de este TFG, se plantea la hipótesis que se debe constatar. Al igual que en la Subsección 3.2, la hipótesis se enuncia por primera vez en la Subsección 1.3:

*La distancia percibida recorrida por un punto ilusorio táctil puede modificarse variando la distancia recorrida por un punto visual que se mueve en sincronía, incluso provocando que el punto ilusorio táctil se perciba fuera de la mano (siendo el espacio real entre actuadores de 7 cm).*

Para verificarla se diseña el *Experimento 2* (Subsección 3.3).

El segundo experimento, se concibe como una expansión natural del *Experimento 1* y busca explorar el papel que desempeña la retroalimentación visual en la percepción de estímulos táctiles. Para lograr esto, se introduce un componente visual en sincronía con el estímulo táctil, lo que posibilita una evaluación precisa del grado de influencia de la retroalimentación visual en la percepción y localización de los estímulos táctiles, así como la verificación de la hipótesis enunciada.

#### 3.3.2. Entorno experimental

El entorno experimental es similar al utilizado para el primer experimento (ver Subsubsección 3.2.2), la única diferencia es la interfaz gráfica desarrollada.

La interfaz gráfica de este segundo experimento que se diseña y programa en AppDesigner de MATLAB, también se muestra en la pantalla táctil del experimento. Contiene una representación gráfica de los dos soportes vibrotáctiles que consiste en un rectángulo con apariencia de tubo. Asimismo, la interfaz incluye la representación de un punto rojo del tamaño de una canica, que se desplaza en sincronía con el movimiento ilusorio de la interfaz vibrotáctil (ver Figura 10a). De nuevo, la localización exacta de la mano del participante aparece representada con un recuadro sombreado de 7 cm de longitud, localizado en el centro del “tubo”. Esta interfaz gráfica, posee diversos botones para recopilar las respuestas de los participantes sobre el grado de coherencia o semejanza entre el movimiento del punto rojo en la interfaz gráfica y el movimiento vibratorio ilusorio que se reproduce en la interfaz vibrotáctil, como se aprecia en la Figura 10b.

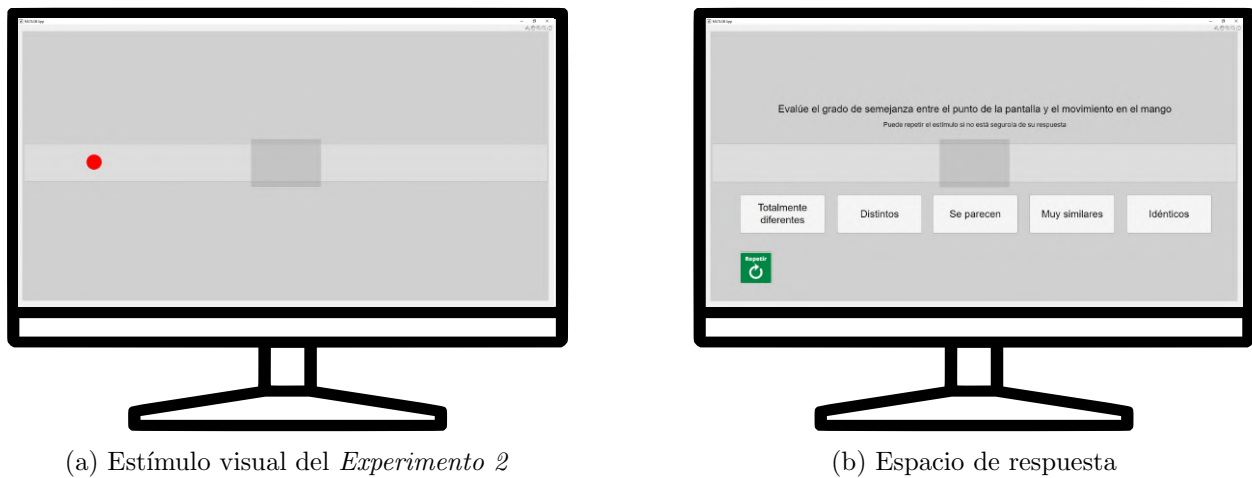


Figura 10: Representación de la interfaz gráfica del segundo experimento

A diferencia del *Experimento 1* (Subsección 3.2), a los participantes no se les indica que cierren los ojos durante la sesión experimental porque se desea estudiar la influencia de la retroalimentación visual sobre las ilusiones táctiles de movimiento.

### 3.3.3. Participantes

Un total de 21 voluntarios participan en el segundo experimento de este Trabajo Fin de Grado. De los 21 voluntarios, 13 son hombres y 8 mujeres, cuyas edades están comprendidas entre 18 y los 68 años. La media de edad de los participantes es 36,67 años, la mediana es 29 años y la desviación típica es 14,48, lo que indica que los datos se encuentran dispersos respecto a la media. En la Figura 11 se recogen gráficamente los resultados estadísticos anteriores y se evidencia que las edades de los participantes no siguen una distribución normal.

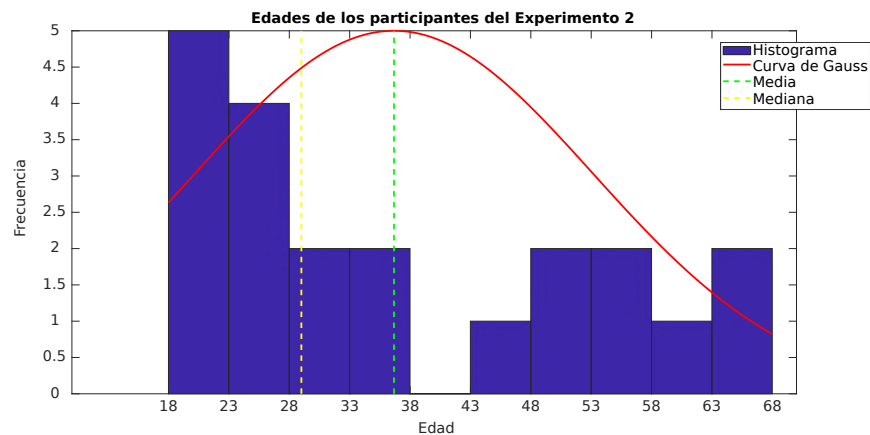


Figura 11: Distribución de la edad de los participantes y estadísticas descriptivas - *Experimento 2*

Los voluntario que participan en este segundo experimento reportan no padecer ningún tipo



de trastorno motor, sensorial o neurológico. Al igual que en la Subsubsección 3.2.3, no se informa a los participantes del estudio, se les explica el experimento y estos aceptan su participación en la investigación firmando un consentimiento informado por escrito (Anexo D.3).

La realización de los dos experimentos que constituyen esta investigación, tiene la aprobación del comité ético de la UMA, tal como se recoge en el Anexo C.

### 3.3.4. Protocolo experimental

El protocolo experimental del *Experimento 2*, es similar al del *Experimento 1* (ver Subsubsección 3.2.4).

Los participantes del experimento se sientan en la silla del experimento habilitada para ello y ajustan la posición de la misma, según su altura y mano dominante. La mano dominante, sujeta el soporte vibrotáctil de manera que la representación gráfica de la mano en la interfaz gráfica sea coherente con la posición real de la mano en la interfaz vibrotáctil.

De nuevo, el experimento se encuentra dividido en dos, una primera mitad de *Sensaciones Fantasma de Movimiento* con 18 experiencias distintas y una segunda mitad de ilusiones *Cutaneous Rabbit* con 15 experiencias diferentes. Los participantes realizan una sesión de entrenamiento previa a cada mitad del experimento. Igualmente, los participantes usan auriculares bluetooth con ruido marrón para aislarse de posibles perturbaciones externas, pero no cierran los ojos durante el experimento.

Todas las experiencias se repiten dos veces y se ofrece al participante la posibilidad de reproducir (las veces que lo necesite) el movimiento vibratorio ilusorio en sincronía con el movimiento visual. Tras cada experiencia diferente, la interfaz gráfica realiza al participante entre una y tres preguntas sobre el grado de semejanza existente entre los movimientos visuales y táctiles en sincronía. Por ello, poder repetir cada pareja de estímulos es esencial para responder con seguridad.

El experimento dura aproximadamente 35 minutos, incluyendo la explicación inicial y 2 minutos de descanso en el ecuador de la sesión experimental.



## 4. Implementación del entorno experimental

### 4.1. Síntesis de las señales ilusorias

En este TFG se manejan dos tipos diferentes de señales ilusorias, una de ellas para representar puntos móviles vibratorios que se muevan de forma continua y el otro para trazar el movimiento de un punto vibratorio a saltos.

El movimiento de puntos vibratorios móviles continuos se emplea en el conjunto de experiencias de *Sensaciones Fantasma de Movimiento* donde se pretende que, sujetando la interfaz vibrotáctil, el usuario sea capaz de percibir el movimiento continuo de derecha a izquierda o de izquierda a derecha de un punto a través de su mano. Este movimiento continuo se recrea del mismo modo que en el experimento realizado en [1], una señal sinusoidal con una arcotangente envolvente, se crea usando una función de MATLAB, se envía a los actuadores vibrotáctiles contenidos en un soporte. Antes de llegar a los actuadores, la señal sinusoidal se reproduce a través de la salida de audio de un portátil y se amplifica en un amplificador de audio adicional.

Entonces, en este estudio se emplea la función de MATLAB *tactiluWAV.m* incluida en el Código 1. Esta función crea un fichero *.wav* con la ilusión táctil de movimiento aparente a partir de ciertos parámetros de entrada:

- **Primer parámetro:** es el nombre del fichero wav. que se origina.
- **Segundo parámetro:** es la frecuencia de muestreo en hercios del fichero de audio.
- **Tercer parámetro:** es la frecuencia de la señal portadora en hercios.
- **Cuarto parámetro:** indica el tipo de función de la señal portadora. Las opciones disponibles son 'sin', 'saw', 'square', según sea una señal sinusoidal, de diente de sierra o cuadrada.
- **Quinto parámetro:** indica el tipo de función que da forma a la envolvente. Las posibilidades son 'tan', 'log', 'sin', según sea una función envolvente arcotangente, logarítmica o sinusoidal, respectivamente.
- **Sexto parámetro:** es la duración de la ilusión táctil en segundos.
- **Séptimo parámetro:** es el punto inicial del movimiento aparente, su valor está comprendido entre cero y uno.
- **Octavo parámetro:** es el punto final del movimiento aparente, su valor debe estar comprendido entre '0' y '1', siendo siempre superior al punto inicial. El movimiento aparente completo tiene lugar cuando el punto inicial toma el valor '0' y el punto final el valor '1'.
- **Noveno parámetro:** es la dirección del movimiento aparente, se indica con un '0' que el movimiento es de izquierda a derecha y con un '1' que es de derecha a izquierda.

```

1 function tactiluWAV(nombre,Fs,Fc,funcionC,funcionE,duracion,li,lf,LR)
2 % ENVOLVENTE
3 if strcmp(funcionE,'sin')||strcmp(funcionE,'log')
4     p_i=0.1;
5     p_f=1.4;

```

```

6   else % por defecto sera tangente 'tan'
7       p_i=1.58;
8       p_f=1.64;
9   end
10  paso=(p_f-p_i)/(Fs*duracion);
11  t=p_i:paso:(p_f-paso);
12  switch funcionE
13      case 'sin'
14          y=sin(t);
15      case 'log'
16          y=log(t);
17      otherwise
18          y=tan(t);
19  end
20
21  % Se normaliza la envolvente entre 0 y 1
22  y=y-min(y);
23  y=y/(max(y)-min(y));
24
25  % PORTADORA (es una senoide/diente de sierra de frecuencia Fc)
26  paso=2*pi*Fc/Fs;
27  t=0:paso:(2*pi-paso);
28  % paso=2*pi/(Fs*duracion);
29  % t=0:paso:(2*pi-paso);
30
31  switch funcionC
32      case 'saw'
33          y_c=sawtooth(t);
34      case 'square'
35          y_c=square(t);
36      otherwise
37          y_c=sin(t);
38  end
39
40  % En el paso anterior, en y_c hay un periodo de la portadora a Fc
41  % La portadora ha de tenerla misma duracion que la envolvente, por lo que se concatenan periodos
42  % hasta conseguirlo
43  n=floor(length(y)/length(y_c)); %Numero entero de repeticiones
44  r=mod(length(y),length(y_c)); % Resto para llegar al numero exacto de muestras
45  y_c_mod=y_c(1:r);
46  y_c=[repmat(y_c,1,n) y_c_mod];
47
48  % SE MONTA ENVOLVENTE SOBRE LA PORTADORA
49  y_ti=y_c.*y;
50
51  % Se selecciona la parte de la ilusion tacil entre li y lf
52  if (lf>li)
53      if (lf<=1)&&(li>=0)
54          y_ti=y_ti(round(li*length(y_ti)+1):round(lf*length(y_ti)));
55      end
56  else
57      disp('lf debe ser mayor que li. Ademas ambos deben estar entre 0 y 1');
58  end
59
60  % Se crea la senal estereo con el otro canal invertido, en UNA DIRECCION U OTRA
61  y_inv=flip(y_ti);
62  if LR
63      y_stereo=[y_ti(:),y_inv(:)];
64  else
65      y_stereo=[y_inv(:),y_ti(:),];
66  end
67
68  audiowrite(strcat(nombre, '.wav'), y_stereo, Fs);
69  end

```

Código 1: Función tactiluWAV()

Respecto a la función incluida en el Código 1, es importante comprender la finalidad de las señal portadora y la señal envolvente en la formación de la ilusión. La señal portadora es la señal que hace vibrar a los actuadores, mientras que la envolvente es la que transporta la información. De esta manera, modificando la señal portadora se puede conseguir una ilusión de desplazamiento entre los dos actuadores, activando la vibración en un actuador y desactivándola en el otro de forma progresiva, tal como se aprecia en la Figura 12.

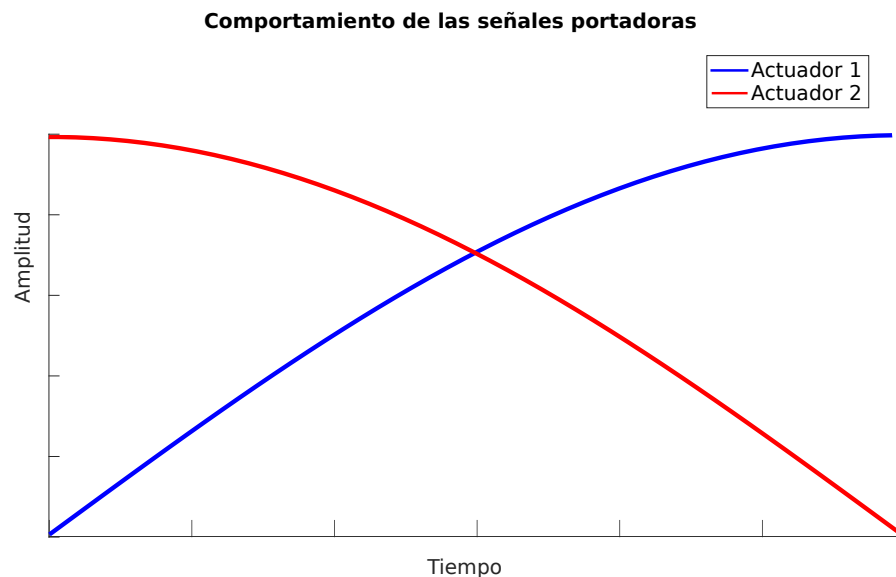


Figura 12: Representación gráfica de la ilusión de movimiento entre actuadores

En los experimentos de este estudio se emplean un total de catorce movimientos aparentes de este tipo diferentes. Todos ellos, poseen una frecuencia de muestreo de  $44100 \text{ Hz}$ , una frecuencia de atenuación de  $250 \text{ Hz}$ , una señal portadora sinusoidal y una señal envolvente arcotangente. El movimiento aparente siempre es completo, por lo que los dos únicos parámetros que se modifican para formar los catorce movimientos de *Sensación Fantasma de Movimientos* distintos son:

- La duración del movimiento aparente. Se emplean 7 duraciones en este estudio:  $0,25 \text{ s}$ ,  $0,5 \text{ s}$ ,  $1 \text{ s}$ ,  $1,5 \text{ s}$ ,  $2 \text{ s}$ ,  $2,5 \text{ s}$ ,  $3 \text{ s}$ .
- La dirección del movimiento, de derecha a izquierda y de izquierda a derecha.

Combinando las siete duraciones distintas con las dos direcciones disponibles, se crean las catorce *Sensaciones Fantasma de Movimiento* del estudio. El Código 2 es uno de los scripts incluidos en el experimento que utiliza a la función *tactilu.WAV*, concretamente este script se emplea para crear un movimiento aparente de izquierda a derecha y  $0,25 \text{ s}$  de duración. El archivo *.wav* que genera el código es la señal de la Figura 13.

```

1 % FS
2 % 0.25 s de duracion
3 % De izquierda a derecha
4 app.direccion = 0;
5 tactiluWAV('MovAp_0_25s_ID',44100,250,'sin','tan',0.25,0,1,0);
6 [y,Fs]=audioread('MovAp_0_25s_ID.wav');
7 pause(1);
8 sound(y,Fs);

```

Código 2: Script Vib\_FS\_025s\_ID.m

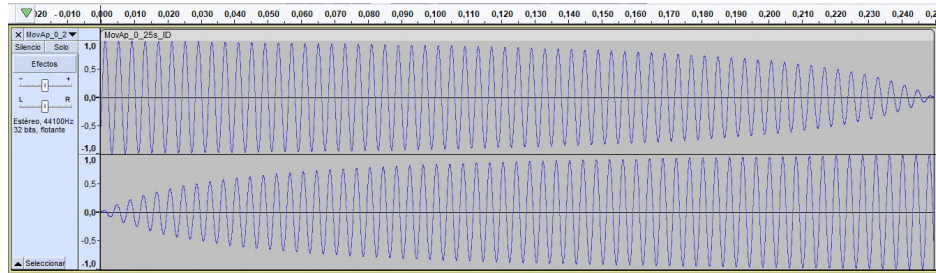


Figura 13: Ejemplo de señal sinusoidal con arcotangente envolvente

Por otro lado, los puntos móviles vibratorios a saltos se establecen haciendo uso de la ilusión *Cutaneous Rabbit* (“Conejo Cutáneo” en español). En la Subsubsección 2.3.2 se explica en qué consiste, cómo se implementa y las características que han de tener las señales que conforman la ilusión para que se aprecie la misma. Entonces, anteriormente se expone que la ilusión *Cutaneous Rabbit* que mejor se percibe consta de 10 pulsos, de 2 ms de anchura y con una separación entre pulsos de 40 a 60 ms. Este tipo de ilusión táctil no se trabaja en el estudio original en el que se basa este Trabajo Fin de Grado, por lo que se seleccionan las ilusiones que mejor se perciben (según la Subsubsección 2.3.2) para incluirlas en el proyecto.

En total, se utilizan siete tipos diferentes de ilusiones *Cutaneous Rabbit*, de las cuales únicamente se modifica la separación entre pulsos, el ancho de pulso permanece fijo a 2 ms:

- Ilusión de 380 ms de duración, separación de 20 ms entre pulsos, dirección del movimiento de izquierda a derecha
- Ilusión de 380 ms de duración, separación de 20 ms entre pulsos, dirección del movimiento de derecha a izquierda
- Ilusión de 470 ms de duración, separación de 50 ms entre pulsos, dirección del movimiento de izquierda a derecha
- Ilusión de 560 ms de duración, separación de 60 ms entre pulsos, dirección del movimiento de izquierda a derecha
- Ilusión de 560 ms de duración, separación de 60 ms entre pulsos, dirección del movimiento de derecha a izquierda
- Ilusión de 740 ms de duración, separación de 80 ms entre pulsos, dirección del movimiento de izquierda a derecha
- Ilusión de 740 ms de duración, separación de 80 ms entre pulsos, dirección del movimiento de derecha a izquierda

En los experimentos de este estudio, se establecen scripts que leen las ilusiones *Cutaneous Rabbit* contenidas en los archivos .wav creados con el software Audacity. Un ejemplo de ilusión *Cutaneous Rabbit* utilizada es la de la Figura 14. A diferencia de las *SFM*, las ilusiones *Cutaneous Rabbit* generan la ilusión de movimiento entre actuadores haciendo vibrar primero un actuador y después el otro, sin ningún tipo de transición entre las vibraciones.

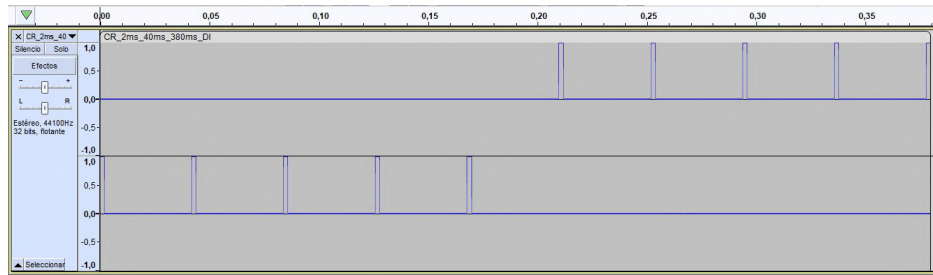


Figura 14: Ilusión Cutaneous Rabbit de 380 ms de duración y dirección de derecha a izquierda

En resumen, en este TFG se utilizan dos tipos de ilusiones de movimiento, *Sensación Fantasma de Movimiento* y *Cutaneous Rabbit*. Las señales ilusorias que recrean el movimiento aparente, se incluyen en archivos *.wav* generados en MATLAB o Audacity para su correcta reproducción posterior en AppDesigner de MATLAB. Al ejecutar los scripts correspondientes, surgen señales tipo pulso o sinusoidales con envolvente arcotangente de la salida de audio de un portátil, se amplifican en un amplificador de audio y finalmente llegan a dos actuadores vibrotáctiles que reproducen la ilusión táctil de movimiento.

## 4.2. Interfaz vibrotáctil

### 4.2.1. Actuadores vibrotáctiles

Los actuadores vibrotáctiles son dispositivos que generan vibraciones mecánicas o movimientos oscilatorios en respuesta a una señal eléctrica. Principalmente, están diseñados para producir sensaciones táctiles mediante la estimulación del sentido del tacto a través de las vibraciones, por lo que se emplean en una amplia variedad de aplicaciones: retroalimentación háptica, realidad virtual y aumentada, medicina, entretenimiento, entre otros.

Entre los distintos tipos de actuadores descritos en la Subsección 2.4, se seleccionan los actuadores de bobina de voz (*voice coil* en inglés) para realizar los experimentos. Entonces, en lo sucesivo se emplearán las palabras “actuadores vibrotáctiles” para referirse a los actuadores de bobina de voz. Los motivos que justifican la elección de este tipo de actuadores son diversos:

- Son actuadores económicos. Son dispositivos que están compuestos comúnmente por un imán y un hilo de cobre bobinado, complementados con materiales aislantes o que contribuyen al esqueleto del actuador.
- Son elementos compatibles con la tecnología de audio actual. Así pues, para poder usar los actuadores, solo es necesaria su adquisición, pues cualquier dispositivo con salida de audio (móvil, portátil, ordenador, tablet, MP4...) puede hacerlos funcionar, sin necesidad de comprar ningún componente adicional. Económicamente, esto es una ventaja importante.
- Son dispositivos prácticos. Al funcionar con tecnología de audio, cualquier programa que sirva para manipular señales de audio es útil para generar las señales que se deseen reproducir en los actuadores. Además su uso y manipulación es sencillo, una vez conectados adecuadamente, solo se deben sostener para percibir las vibraciones que reproducen.

Estructuralmente, los actuadores de bobina de voz son unos altavoces y pueden efectuar esa función. Los altavoces convencionales funcionan al convertir la energía eléctrica en energía mecánica. La energía mecánica comprime el aire y convierte el movimiento en nivel de presión sonora (Sound Pressure Level, Nivel de Presión Sonora (SPL)). En los altavoces, una corriente se envía a través de la bobina, lo que produce un campo eléctrico que interactúa con el campo magnético del imán permanente del altavoz, es decir, la corriente eléctrica induce un campo magnético. Las cargas similares se repelen y las diferentes se atraen, por lo que cuando se envía una señal de audio a través de la bobina, la bobina es atraída y repelida por el imán permanente. Esto hace que el cono<sup>9</sup> en el que está la bobina (ver Figura 15), se mueva hacia adelante y hacia atrás. Dicho movimiento crea ondas de presión en el aire que percibimos como sonido.

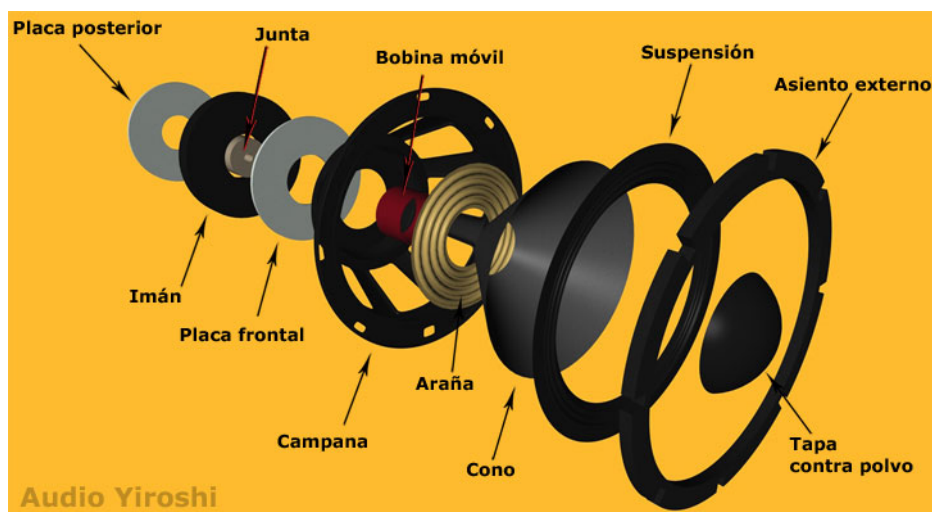


Figura 15: Estructura altavoz

El funcionamiento del actuador vibrotáctil es similar al de un altavoz convencional: la corriente eléctrica se envía a través de la bobina e induce un campo magnético. Consecuentemente, el imán se mueve en consonancia a la señal que recorre la bobina, originándose así las vibraciones. Dichas vibraciones son las que se utilizan para recrear la sensación de movimiento en los experimentos que se realizan en este TFG.

Respecto a los actuadores que se utilizan en este TFG, debido a su composición sencilla, es posible adquirir actuadores vibrotáctiles comerciales del tipo seleccionado a un precio relativamente económico, oscilando entre los 5 y los 10 euros por unidad en su versión estándar, aunque también existe la posibilidad de fabricarlos de forma casera. Con el objetivo de obtener un estímulo vibrotáctil claro y altamente perceptible, en este TFG se evalúan las dos opciones disponibles: actuadores comerciales adquiridos y actuadores de fabricación propia. Por consiguiente, se lleva a cabo una comparativa para determinar cuál de las dos alternativas resulta más adecuada para el experimento propuesto.

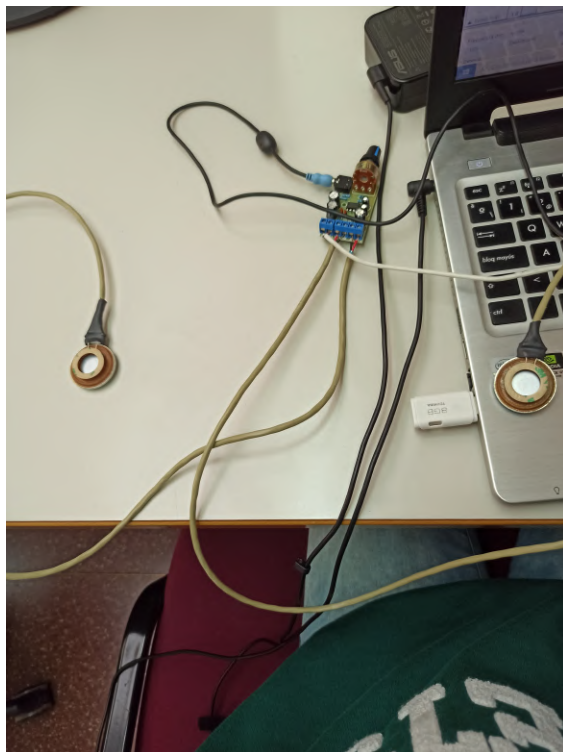
<sup>9</sup>Cono: componente de un altavoz encargado de mover el aire para producir sonido

### Actuadores vibrotáctiles comerciales

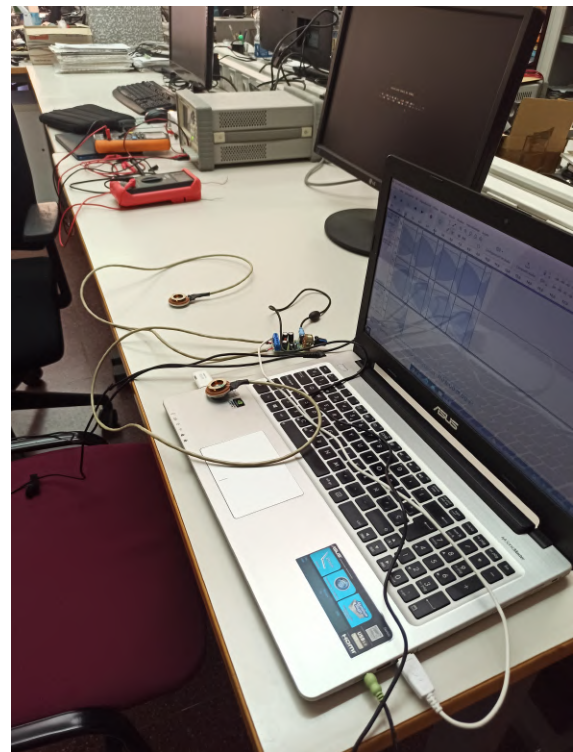
Con el objetivo de implementar el experimento y proporcionar una estructura cómoda de sujetar donde se puedan alojar sin problemas los actuadores, se ha seleccionado el modelo *TEAX19C01-8* [28] de la reconocida marca *Tectonic* como actuador vibrotáctil comercial (ver Figura 16a). Esta elección se basa principalmente en su destacada calidad y su tamaño compacto (41 mm de largo, 33,8 mm de ancho, 12,9 mm de espesor y 29,6 gramos de masa).

El *TEAX19C01-8* es un excitador de panel de audio capaz de convertir una amplia variedad de superficies planas en altavoces de gran calidad o High Fidelity, Alta Fidelidad (Hi-Fi). El dispositivo en cuestión posee una impedancia de  $8 \Omega$  de valor nominal y está formado por un imán de neodimio que permite aumentar el flujo magnético alrededor de la bobina.

Tras realizar diversas pruebas con este modelo, se ha determinado que su uso genera vibraciones perceptibles y de buena calidad. Si bien inicialmente no se descarta como candidato para ser el actuador del experimento, se considera necesario evaluar otras opciones debido a su forma relativamente plana y la dificultad asociada para colocarlo en un tubo y mantenerlo en posición horizontal durante todos los experimentos.



(a) Dispositivos comerciales



(b) Probando los actuadores en Audacity

Figura 16: Actuadores vibrotáctiles comerciales

### Actuadores vibrotáctiles de fabricación propia

Después de efectuar diversas pruebas de funcionamiento con actuadores comerciales, pretendiendo mejorar la percepción de las vibraciones, se decide fabricar unos actuadores. Con esta finalidad, se utiliza el software SolidWorks para el diseño de una cobertura 3D imprimible en la que se pueda bobinar el hilo de cobre e introducir un imán en su interior. Se realizan diversos modelos hasta encontrar el tamaño y forma óptimos para un correcto funcionamiento y una adecuada adaptación de los actuadores al experimento que se desea realizar.

En el diseño de los actuadores de fabricación propia, se decide incluir dos bobinas de cobre con bobinado en dirección contraria, en lugar de una (como tienen los actuadores comerciales). Esta elección se debe a la función que cumple la bobina dentro del diseño. Al pasar la corriente eléctrica por la bobina, se induce un campo magnético que hace que el imán se mueva en consonancia con la señal que recorre la bobina. Realmente, la bobina atrae o repele el imán tal como se aprecia en la Figura 17a. Al igual que ocurre al intentar mover una carga pesada, si una persona tira de la carga, le cuesta más moverla que si le ayuda alguien empujando la carga por detrás. Análogamente, esto es lo que se quiere conseguir en el diseño del actuador, si en vez de una bobina se usan dos bobinas opuestas (ver Figura 17b), una de las bobinas repele al imán (“empuja la carga”) mientras que la otra lo atrae (“tira de la carga”) y viceversa. De este modo, el movimiento es más eficaz.

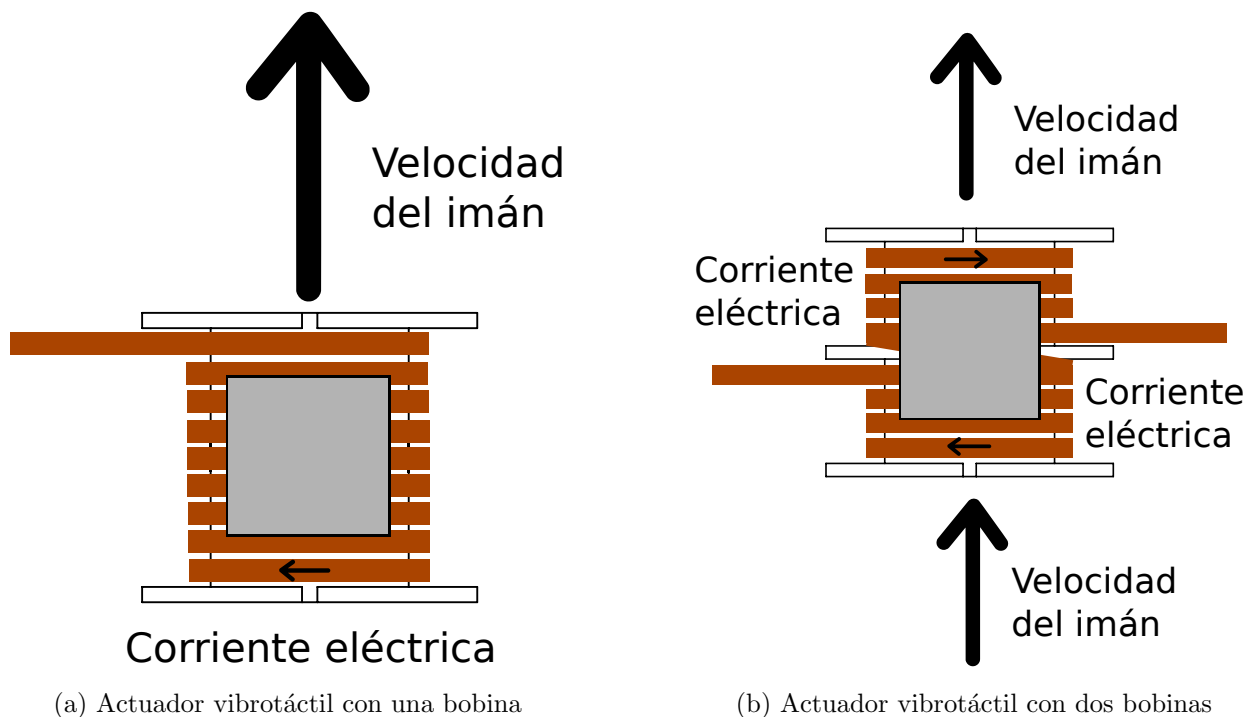


Figura 17: Influencia del número de bobinas en el diseño de actuadores vibrotáctiles

Seguidamente, se esboza un primer modelo basado en el vídeo explicativo *Building a recoil-type actuator* [29], en el que se detalla la fabricación de un par de actuadores. El diseño del modelo se basa en la forma de los actuadores presentados en el citado vídeo, prestando especial atención al tamaño del actuador y la configuración de la tapadera, la cual debe tener un saliente que se acople a la perfección a la estructura del esqueleto del actuador. Este primer modelo (ver Anexo A.1) de 21 mm de alto y 17 mm de diámetro, se imprime junto con los cuatro recipientes necesarios para fabricar los amortiguadores de silicona<sup>10</sup> (4 mm de espesor y 10,5 mm de diámetro) constituyentes de los actuadores vibrotáctiles de fabricación propia. Tras la construcción del actuador, se advierte que el diámetro de bobinado es reducido (la zona bobinable es aquella comprendida entre los 12 mm y los 17 mm del actuador), lo que deriva en un bobinado insuficiente (apenas 3 capas) e impide el funcionamiento de este primer modelo.

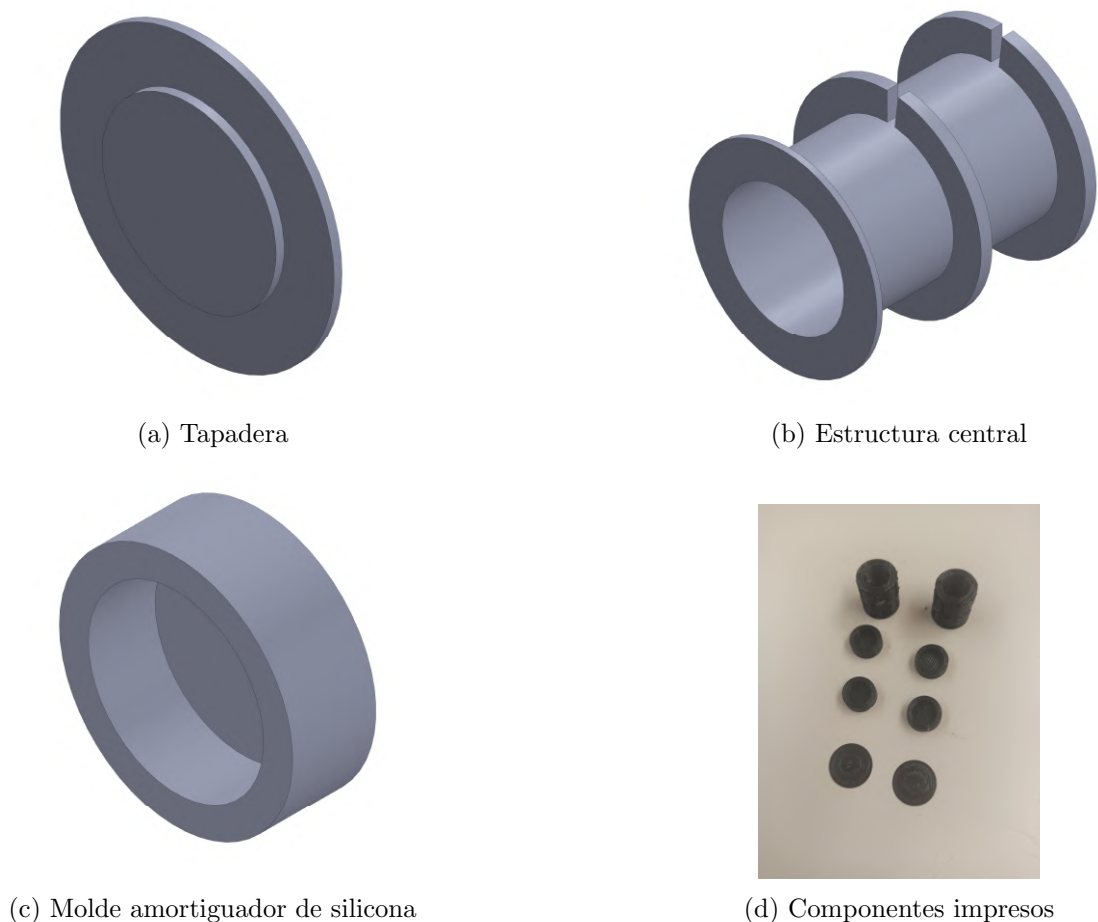


Figura 18: Modelo de actuador vibrotáctil no funcional

<sup>10</sup> Amortiguadores de silicona: o *dampers* en inglés, son pequeñas siliconas empleadas para amortiguar el golpe del imán de neodimio contra los extremos del actuador vibrotáctil, evitando rebotes bruscos del mismo que enturbian la percepción de las vibraciones deseadas

Posteriormente, se elabora un nuevo modelo tomando las medidas del plano de la Figura 19, modificando levemente las dimensiones de las tapaderas y otras medidas para adaptarse al grado de sensibilidad de la impresión y teniendo en cuenta la dilatación/contracción del material. La impresora 3D empleada es el modelo *SideWinder Artillery x2* y el material utilizado es Ácido poliláctico o poliláctico (PLA)<sup>11</sup>.

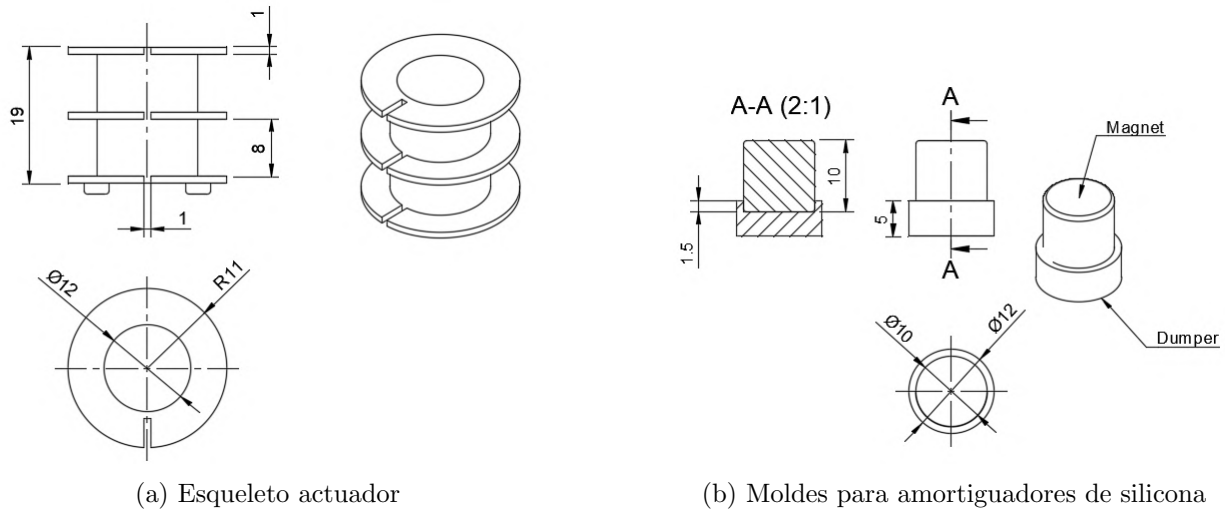


Figura 19: Modelo base para el diseño del actuador

Cabe destacar que se modifican los recipientes de los amortiguadores de silicona porque en la publicación *Design of a Portable Interface for Vibrotactile Feedback Applications* [30], se demuestra que los amortiguadores de silicona cilíndricos convencionales no amortiguan lo suficiente el impacto del imán contra los extremos del actuador, provocando un calentamiento excesivo de las zonas plásticas de los mismos y, en consecuencia, una vida útil muy corta de los actuadores. La mejora propuesta consiste en que el imán se introduzca 1 o 2 mm en los amortiguadores de silicona, de esta forma se incrementa considerablemente la amortiguación, eliminando el sobrecalentamiento y prolongando la vida útil de los actuadores. El recipiente es el de la Figura 20c, cuyas medidas se aprecian en el plano del Anexo A.3 y permite fabricar amortiguadores de silicona de 5 mm de espesor y 12 mm de diámetro con un hueco para el imán de 1,5 mm de espesor y 10 mm de diámetro.

El segundo modelo (20 mm de espesor y 22 mm de diámetro, para más detalles ver el Anexo A.2) se imprime dos veces debido a fallos técnicos de la impresora. De nuevo, se construye el actuador y se comprueba que funciona. Seguidamente, se evalúa la pureza de la vibración del actuador, que resulta ser sorprendentemente limpia y precisa, prácticamente idéntica a la producida por los actuadores comerciales pero con la gran ventaja de tener un tamaño y forma adaptados para poder ser integrados en un mango. No obstante, debido al éxito conseguido en la fabricación de esta primera versión funcional de actuadores propios, se decide fabricar un segundo par de actuadores partiendo del mismo modelo de SolidWorks. Al conocer el proceso de fabricación de los actuadores, se pretende obtener una vibración más clara y exacta, por lo que se procede a realizar un bobinado

<sup>11</sup>PLA: ácido poliláctico, es un polímero que se obtiene a partir de materias primas provenientes de la naturaleza. Resulta ser un plástico ecológico, renovable y biodegradable bajo ciertas condiciones de temperatura y humedad

más minucioso.

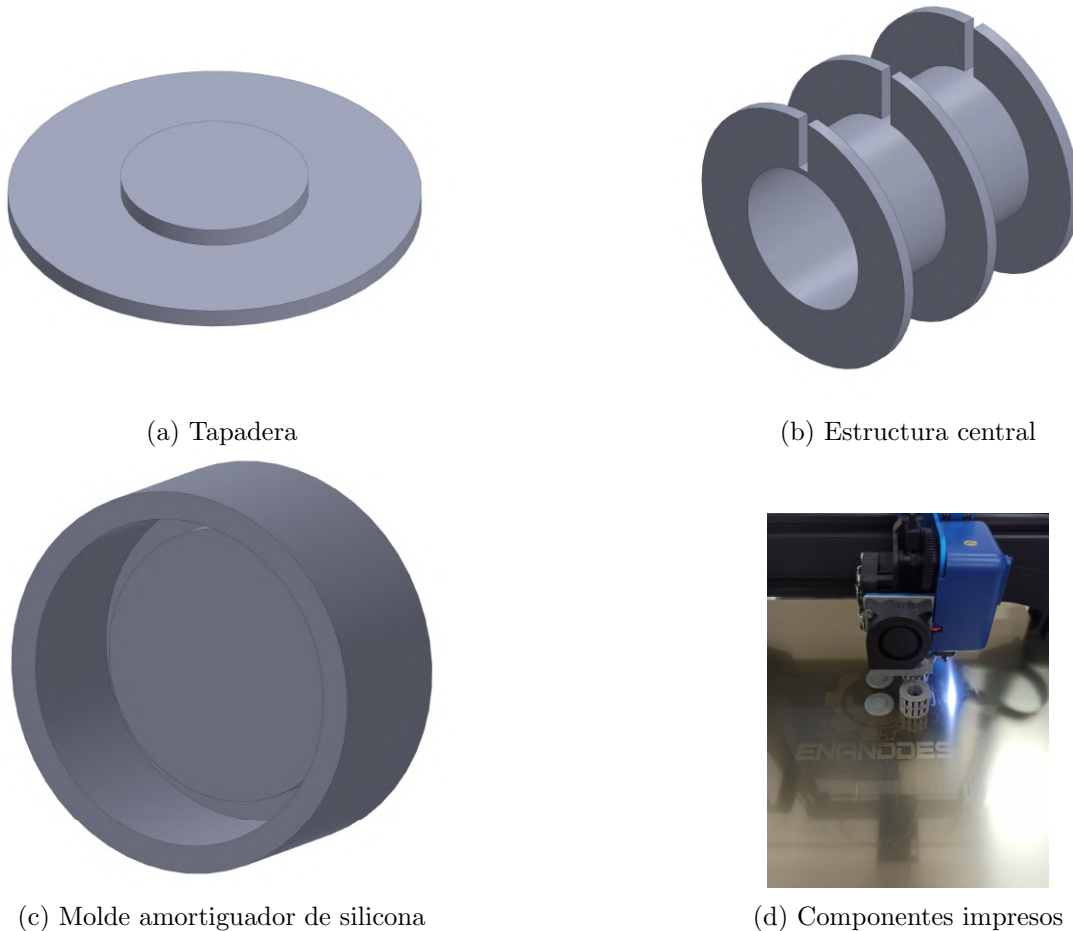


Figura 20: Modelo de actuador vibrotáctil funcional

Tras finalizar la construcción del tercer par de actuadores, se advierte que funcionan correctamente pero no muestran el comportamiento esperado. Las vibraciones producidas por esta segunda versión del mismo modelo, resultan ser prácticamente imperceptibles empleando la misma amplitud de la señal de entrada que se emplea en la versión previa. Sin embargo, aumentando la amplitud de la onda de entrada al actuador, se logra igualar el efecto conseguido anteriormente aunque con un sobrecalentamiento de los dispositivos que resulta inviable en la realización de los experimentos. Entre las principales causas del empeoramiento del funcionamiento de esta versión respecto a la anterior, destaca la realización del bobinado pues al efectuarse un bobinado más minucioso se redujo considerablemente el espacio existente entre las espiras, lo que impide recrear el efecto deseado.

Por consiguiente, dado el correcto funcionamiento de la primera versión funcional de los actuadores de fabricación propia, se decide emplear este par en el experimento a desarrollar, dejando de fabricar nuevos modelos.

En cuanto a la construcción de los actuadores vibrotáctiles (ver Figura 21, se necesitan

diversos elementos:

- **Esqueleto del actuador:** es la estructura sobre la cual se realiza el bobinado y se coloca el imán, aporta el cuerpo al actuador. Se necesitan dos por cada par de actuadores que se desee construir.
  
- **Tapadera del actuador:** es el elemento que culmina el montaje del actuador y ha de encajar a la perfección con el esqueleto del mismo, encierra a los amortiguadores de silicona y el imán de neodimio.
  
- **Alambre de cobre Block CUL500, sección 0,5 mm y acabado esmaltado:** es el hilo de cobre utilizado para el bobinado del actuador.
  
- **Cinta adhesiva de doble cara:** se emplea para facilitar el bobinado porque fija el alambre y sirve para separar las capas de hilo de cobre entre sí.
  
- **Esparadrapo deportivo OMNIPLAST:** es un esparadrapo fabricado en tejido de tela de gran permeabilidad y alta adherencia, permite inmovilizar el bobinado del actuador de manera que mantenga su forma compacta y no se desenrollen las espiras.
  
- **Imán de neodimio:** es el corazón del actuador, es un imán cilíndrico de 10 mm de diámetro y 10 mm de altura. Se necesita un imán para cada actuador vibrotáctil.
  
- **Moldes para la fabricación de amortiguadores de silicona:** son los recipientes sobre los que se vierte un material plástico que al secarse durante 24 horas adquiere consistencia de silicona. Se imprimen en 3D y son necesarios cuatro moldes por cada par de actuadores.
  
- **RTV 101:** es un tipo de elastómero que al someterse al proceso de catálisis cambia su consistencia y se utiliza para la fabricación de los amortiguadores de silicona contenidos en los actuadores.
  
- **CAT 101:** es un catalizador positivo, cuya finalidad es acelerar la reacción química del compuesto RTV-101.

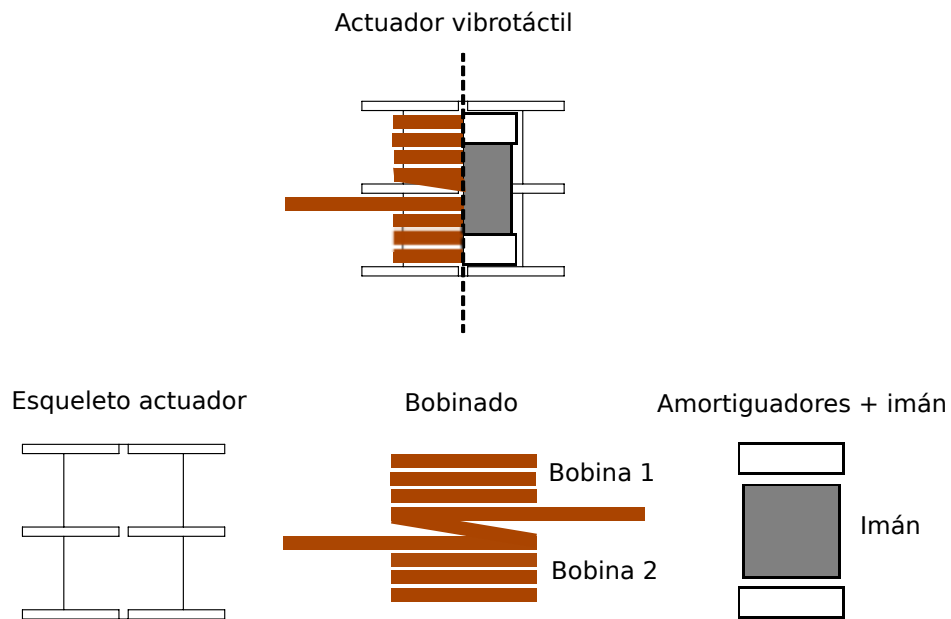
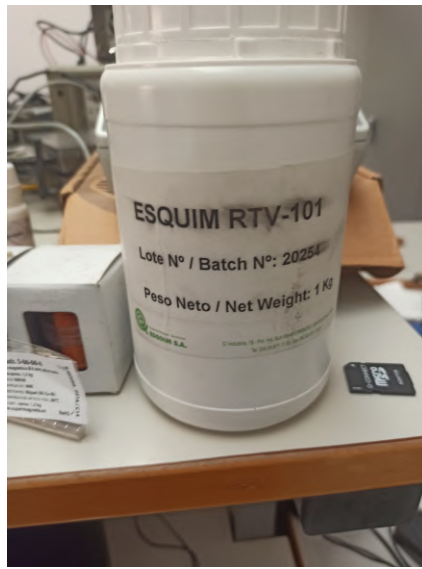


Figura 21: Esquema de montaje del actuador vibrotáctil

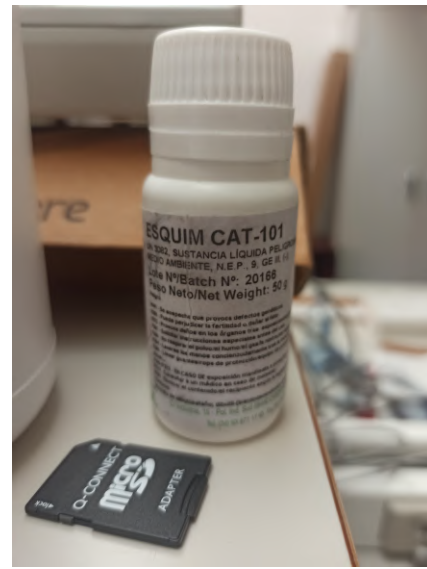
Respecto al procedimiento seguido para la fabricación de la versión funcional de actuadores vibrotáctiles, a continuación se describe paso a paso.

Primero se imprime el modelo 3D de los actuadores (dos esqueletos y dos tapaderas) junto con los cuatro moldes necesarios para fabricar los amortiguadores de silicona (ver Figura 20d).

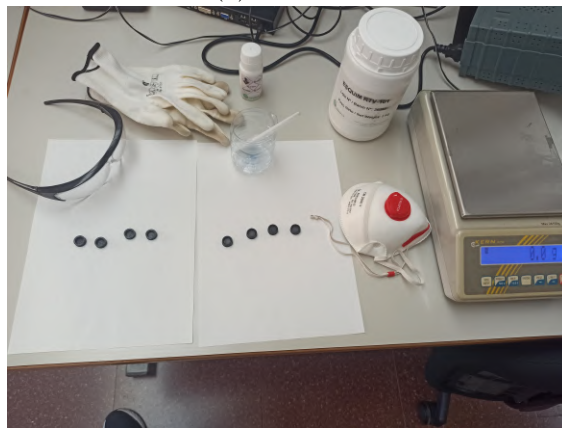
Los amortiguadores de silicona están fabricados con un tipo de elastómero, ese material elástico se crea mediante la reacción al 95 % (RTV-101 y CAT-101, de la marca ESQUIM). Se realiza la mezcla midiendo meticulosamente las cantidades con una balanza de precisión, se remueve todo durante un par de segundos y se vierte el contenido en los moldes de los amortiguadores de silicona. Tras la impresión del modelo, este ha de ser el segundo paso pues la mezcla tarda 24 horas en secarse completamente.



(a) RTV-101



(b) Catalizador



(c) Materiales



(d) Secado de los amortiguadores de silicona

Figura 22: Fabricación amortiguadores de silicona

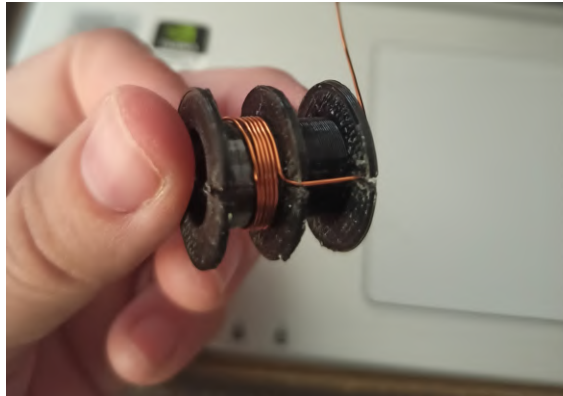
Seguidamente, se toma la estructura del actuador de la impresora 3D y se eliminan los soportes de impresión con la ayuda de pinzas, usando un alicate de pico de loro y un cúter.

Una vez limpios los esqueletos de los actuadores, se puede comenzar el bobinado. En la muesca de la base de la estructura, se encaja el hilo de cobre dejando un extremo de unos 5 cm de margen. Se añade una capa de cinta adhesiva de doble cara en la base de la mitad superior del actuador para facilitar el bobinado. Se comienza a bobinar desde la muesca del centro del actuador, donde también se ha encajado el alambre, hasta llegar al extremo donde se coloca la tapadera. El bobinado de cada mitad del actuador se realiza siempre en la misma dirección, por lo que se bobina en el sentido de las agujas del reloj todas las espiras mientras se ajustan entre sí haciendo uso de pequeñas pinzas o las propias uñas, evitando huecos indeseados. Una vez completada la primera capa de bobinado, se encaja el hilo de cobre en la muesca correspondiente al extremo de la tapadera del actuador para poder colocar una nueva capa de cinta adhesiva de doble cara y continuar el bobinado de la segunda capa. Es fundamental añadir cinta adhesiva entre las capas de

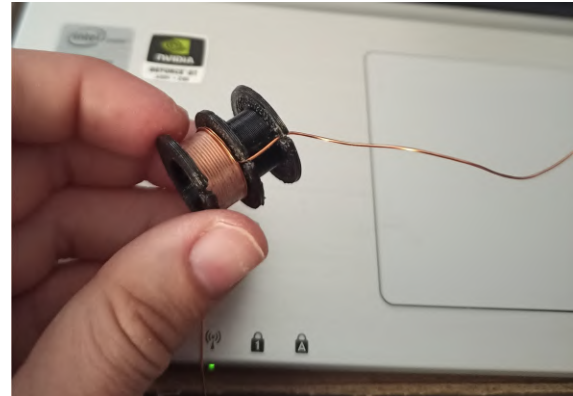
#### 4 IMPLEMENTACIÓN DEL ENTORNO EXPERIMENTAL

hilo de cobre porque crea una leve separación entre las mismas que facilita la formación del campo eléctrico que induce el campo magnético y permite que tenga lugar el efecto vibratorio.

Posteriormente, manteniendo la dirección del bobinado, se libera el hilo de cobre de la muesca superior y se enrolla formando nuevas espiras desde la tapadera hasta el centro del actuador, donde se vuelve a encajar el hilo y se añade otra capa de cinta adhesiva. Este paso y el anterior, se repiten dos veces más hasta realizar las seis capas de bobinado que conforman la media bobina izquierda del actuador.



(a) Primer bobinado



(b) Segundo bobinado



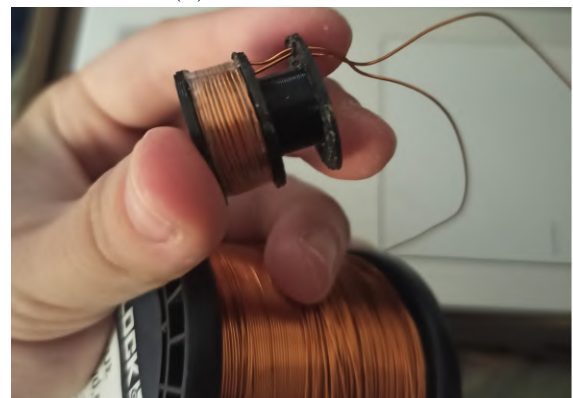
(c) Tercer bobinado



(d) Cuarto bobinado



(e) Quinto bobinado



(f) Sexto bobinado

Figura 23: Primeras seis capas de bobinado de un actuador vibrotáctil

Tras completar la mitad del bobinado, se necesita bobinar el lado derecho del mismo por lo que el extremo de 5 *cm* de margen que se deja al principio, cambia de lado al igual que lo hace el otro extremo del alambre. Para efectuar el bobinado de la media bobina derecha, se repite el mismo procedimiento seguido para la otra mitad del actuador pero cambiando la dirección del bobinado (ahora sentido antihorario).



(a) Séptimo bobinado



(b) Octavo bobinado



(c) Noveno bobinado



(d) Décimo bobinado



(e) Undécimo bobinado



(f) Duodécimo bobinado

Figura 24: Últimas seis capas de bobinado de un actuador vibrotáctil

Una vez terminadas las doce capas de bobinado, se añade una última capa de cinta adhesiva

de doble cara y se enrolla todo con esparadrapo deportivo para que no se desarme. En un principio, se plantea usar cinta aislante pero difícilmente se mantiene pegada (y mucho menos inmoviliza el bobinado) debido a la escasa adherencia de ese material al hilo de cobre. El esparadrapo deportivo resulta ser la mejor opción para cumplir la función de sujeción por ser un material elástico, pegajoso y resistente.

Por último, se insertan los amortiguadores de silicona y el imán en el centro del esqueleto del actuador. Los amortiguadores de silicona han de englobar al imán, por lo que se colocan a ambos extremos del mismo para amortiguar su movimiento. El conjunto de la Figura 25b se encierra haciendo uso de la tapadera impresa previamente, a la que se le añade pegamento instantáneo para lograr una mayor fijación.



(a) Elementos



(b) Colocación

Figura 25: Disposición de los amortiguadores de silicona junto al imán

### 4.2.2. Soporte vibrotáctil

En esta subsección se aborda la necesidad existente fabricar una estructura que albergue en su interior a los actuadores vibrotáctiles diseñados previamente en la Subsubsección 4.2.1. Con la finalidad de obtener un diseño que elimine la transferencia indeseada de vibraciones entre los actuadores, se opta por fabricar un tubo dividido en dos mitades idénticas que alojan a un actuador vibrotáctil cada una. Dicho tubo debe aparentar ser un único elemento que se pueda asir con una sola mano y se debe localizar en una posición fija, estable y oculta a la vista. Además, el soporte con enfoque ergonómico de los actuadores ha tener la mayor longitud posible por dos motivos:

- El tamaño exacto del dispositivo háptico ha de ser desconocido para el participante durante todo el experimento, por ello, disponer de un soporte vibrotáctil de grandes dimensiones dificulta o imposibilita la detección fortuita de los extremos del mismo. Se recuerda que evitar cualquier sugestión de los participante es esencial en este estudio.
- Físicamente, los actuadores vibrotáctiles funcionan emitiendo vibraciones. Se pretende reducir el área de percepción de las vibraciones al área del propio actuador (la vibración ideal tiene lugar justo en el punto donde se localiza el actuador vibrotáctil) para proporcionar al usuario una falsa ilusión de movimiento. El aire hace que haya menos distorsión entre actuadores y evita que las vibraciones se alejen del mismo. En consecuencia, para minimizar que la

vibración se expanda, se diseñan piezas lo más huecas posibles.

Se selecciona el *laboratorio 2.3.11* de la *Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación* de la Universidad de Málaga como ubicación experimental. Esta sala se elige por su localización (próxima al despacho, facilitando la logística), su ambiente silencioso, buena luminosidad y amplio espacio, lo que proporciona un entorno óptimo para llevar a cabo los experimentos y obtener resultados fiables. En *laboratorio 2.3.11*, se eligen dos mesas bajo las cuales se desean instalar los soportes vibrotáctiles. Ambas mesas están compuestas por una estructura metálica, atornillada a una tabla de material aglomerado. Al estudiar el método de acomplamiento de los soportes vibrotáctiles a las mesas, se advierte la presencia de un tornillo que une la estructura metálica con el aglomerado, por lo que se toma en consideración la posibilidad de aprovechar dicho tornillo y la estructura metálica de la mesa para fijar los mangos.

En la Figura 56 y en la Figura 57 del Anexo B, se recogen las medidas relevantes del área de las mesas donde se han de colocar los dos soportes. En la Figura 57, se observa que la separación entre los tornillos de las dos mesas (posible punto de unión de los soportes vibrotáctiles con las mesas) es de unos  $40\text{ cm}$ , longitud idónea para el tubo del experimento, por lo que se valida la idea inicial de conexionado de los elementos. En consecuencia, una vez decidido el método de sujeción del mango y adquirido todas las medidas pertinentes, se puede comenzar el diseño de los soportes de los actuadores vibrotáctiles. Para facilitar el diseño, se boceta la estructura que se desea construir en la Figura 26.

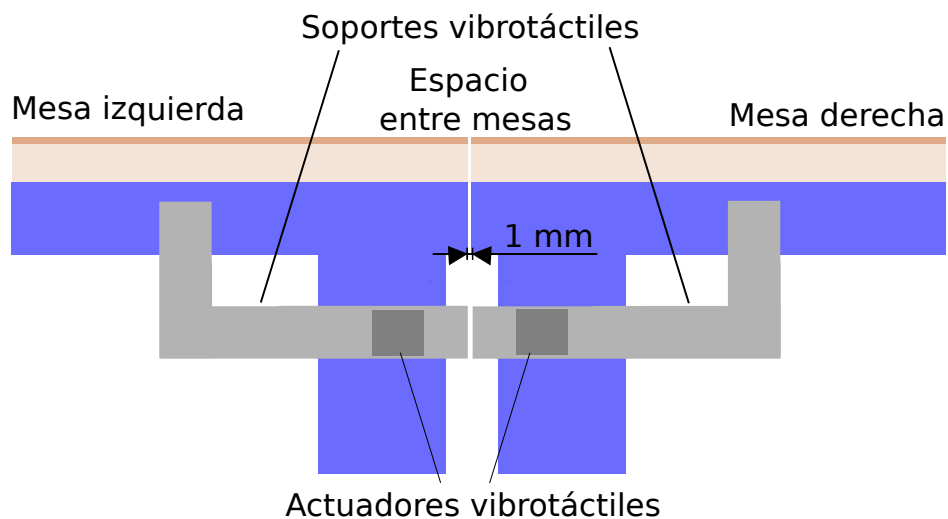


Figura 26: Boceto de la interfaz vibrotáctil fabricada e instalada

En primer lugar, se parte de la base de que se quiere construir un tubo dividido en dos mitades simétricas, por lo que de aquí en adelante, la palabra “soporte vibrotáctil completo” hace referencia al conjunto de esas dos mitades y la palabra “soporte vibrotáctil” solo hace mención a una de las mitades. La longitud del soporte vibrotáctil completo ha de ser inferior a  $40\text{ cm}$ , por lo que cada soporte debe medir menos de  $20\text{ cm}$  de longitud.

En segundo lugar, para la conexión mesa-soporte se plantea incluir en el diseño del mango una base con forma de “C” que encaje con la estructura metálica de la mesa y presente un hueco en

su centro para poder atornillarlo. Además, establecer esta conexión mesa-soporte implica añadir una transición de mayor o menor longitud entre el tubo (que ha de permanecer en posición horizontal) y la base superior. Inicialmente no se decide forma ni longitud de la transición mencionada, simplemente se barajan diferentes opciones:

- Ángulo de  $90^{\circ}$  para tener una mayor longitud de tramo recto en el soporte.
- Curva suave desde la base hasta el extremo de del tubo, de forma que apenas exista un tramo recto en el mango.
- Curva no tan suave desde la base hasta la mitad del soporte, en un intento de conseguir el equilibrio entre continuidad del elemento y sensación de tubo horizontal.

En tercer lugar, partiendo del análisis riguroso de la ergonomía de la mano humana realizado en la Subsección 2.5, considerando la postura de la mano durante el experimento (mano dominante con la palma hacia arriba y dedo corazón en la división de las dos mitades, envuelve el soporte) y las características del agarre del dispositivo, se establece que un diámetro externo de entre  $30\text{ mm}$  y  $34\text{ mm}$  del tubo es apropiado para el soporte vibrotáctil. Este valor permite incluir los actuadores vibrotáctiles en el interior de la estructura, a la vez que resulta ser un soporte cómodo para sostener.

Con el objetivo de fabricar un soporte para los actuadores que cumpla a la perfección todos los requisitos deseados, se realizan un total de diecisiete versiones diferentes, de las cuales se imprimen siete de ellas antes de encontrar el diseño definitivo.

### Versiones preliminares

Las primeras tres versiones que se realizan, se descartan antes de ser finalizadas. Estas primeras versiones se centran en el diseño estético y ergonómico del soporte, incluyen muescas y relieves para la colocación de la mano pero no cumplen ciertos requisitos básicos: el diámetro es mayor a lo definido previamente, no presenta una forma cilíndrica, y resultan ser modelos muy compactos.

Después, se diseñan las versiones 4,5 y 6. Estos modelos poseen las medidas apropiadas para poder ser impresos y probados físicamente, por lo que se decide imprimir las versiones 4 y 6 por ser las más prometedoras, una de ellas presenta una codo de  $90^{\circ}$  mientras que la otra presenta una curva ligera desde el extremo hasta la base de sujeción. Estos modelos presentan dos errores muy graves:

- Presentan un único agujero en la base superior del soporte, por lo que no es posible atornillar la estructura a la mesa y los cables de audio no tienen salida por la parte trasera de la misma.
- A  $35\text{ mm}$  del extremo del soporte, los modelos incluyen un tope para mantener los actuadores separados  $7\text{ cm}$ . No obstante, dicho tope resulta ser una superficie horizontal al tubo por lo que la impresora imprime automáticamente soportes de impresión indeseados en estos modelos, es decir, estas versiones son macizas.

Consecuentemente, los modelos 4 y 6 se descartan automáticamente una vez impresos. Aun así, estas versiones de la Figura 27 permiten verificar que las dimensiones del soporte son prácticamente perfectas (se debe aumentar el tamaño de la base en forma de “C”) y exponen los problemas existentes no contemplados inicialmente.

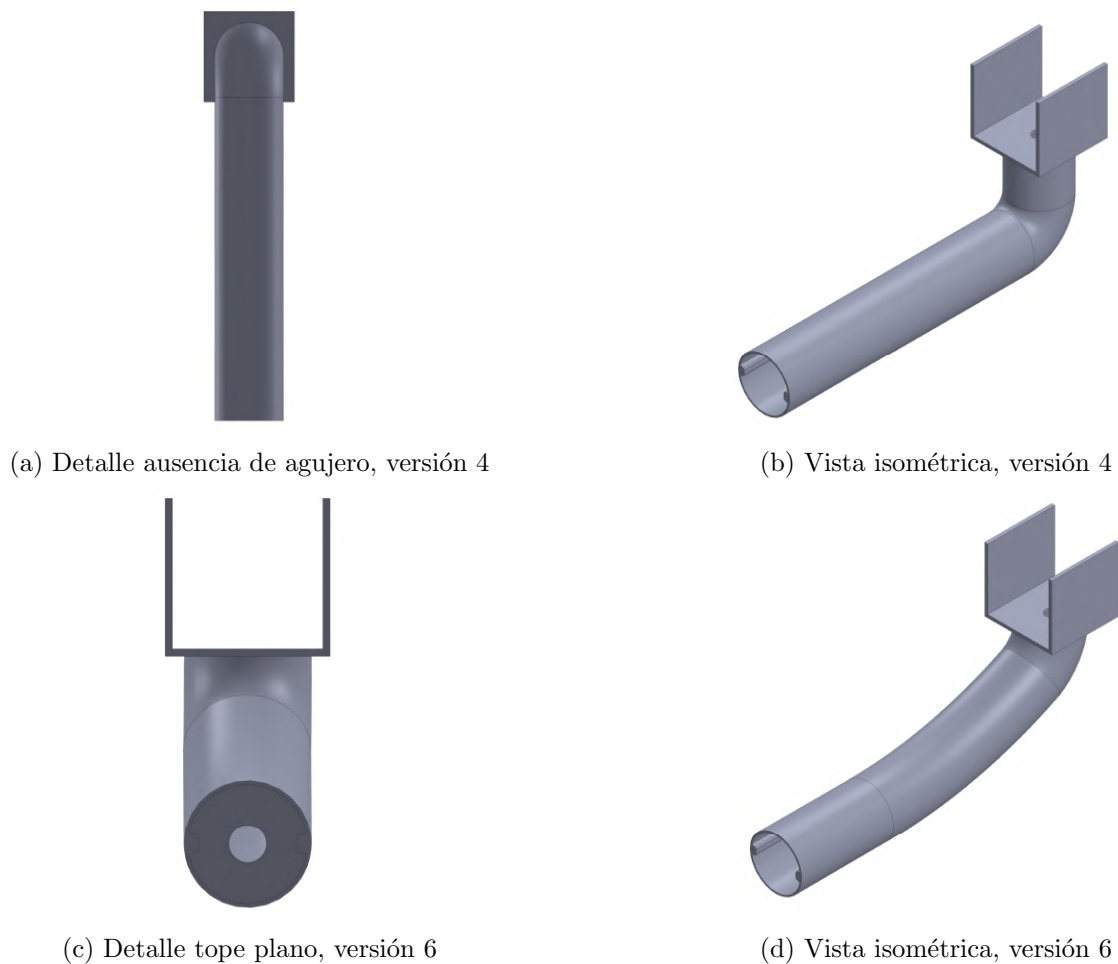
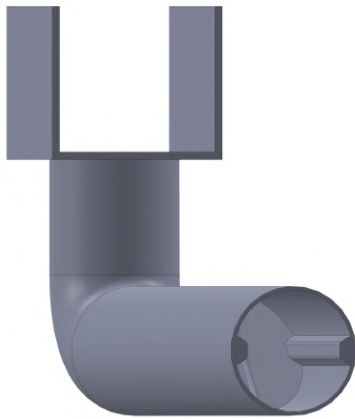
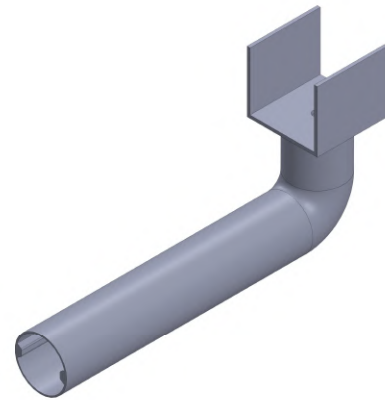


Figura 27: Versiones 4 y 6 del soporte vibrotáctil

Posteriormente, en las sucesivas versiones se intenta corregir los errores detectados anteriormente. Se imprimen las versiones 13, 14 y 15. Estos nuevos modelos incluyen dos agujeros, uno pequeño para la salida del tornillo y otro de mayor tamaño para la entrada del tornillo y la salida de los cables de audio. Además, se corrige el problema de los soportes de impresión en el interior de la estructura, porque el tope mencionado en las versiones anteriores se incluye en el diseño con una inclinación de  $40^{\circ}$  respecto a la horizontal (la máxima inclinación que soporta el modelo de impresora 3D utilizado antes de imprimir soportes de impresión). El resultado se aprecia en la Figura 28.



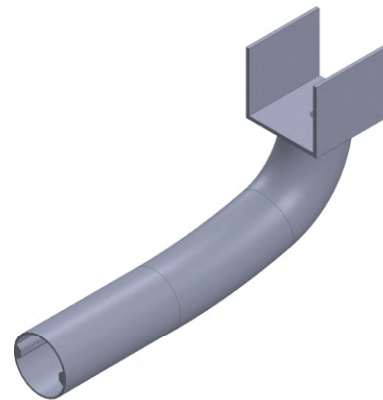
(a) Detalle tope inclinado, versión 13



(b) Vista isométrica, versión 13



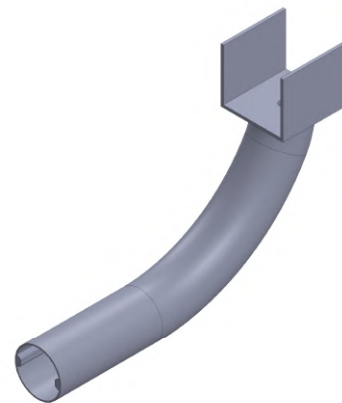
(c) Detalle agujero inferior, versión 14



(d) Vista isométrica, versión 14



(e) Vista frontal, versión 15



(f) Vista isométrica, versión 15

Figura 28: Versiones 13, 14 y 15 del soporte vibrotáctil

Los modelos 13, 14 y 15 son muy similares entre sí, únicamente difieren en la transición entre el extremo cilíndrico del soporte y la base de sujeción. Comparando las versiones, se decide definitivamente que para realizar el experimento lo más adecuado es incluir en el diseño un codo de

90°. Sin embargo, se detecta un nuevo problema que se debe solventar, la rigidez de la estructura.

Por consiguiente, se elabora e imprime una nueva versión. El modelo 16 que se muestra en la Figura 29 elimina el tope incluido en las versiones previas porque se mejora incluyendo un escalón a 40 mm del extremo de la estructura, con la idea de añadir un tope fabricado con otro material que inmovilice al actuador vibrotáctil a la altura deseada del soporte. Asimismo, esta versión modifica el grosor de sus paredes, aumentándolo de 1 a 3 mm e incluye un nervio en la base de sujeción para incrementar la rigidez de la estructura. Desafortunadamente, debido a un despiste, esta versión no posee el grosor deseado en todas las partes de la estructura por lo que se descarta como versión definitiva.

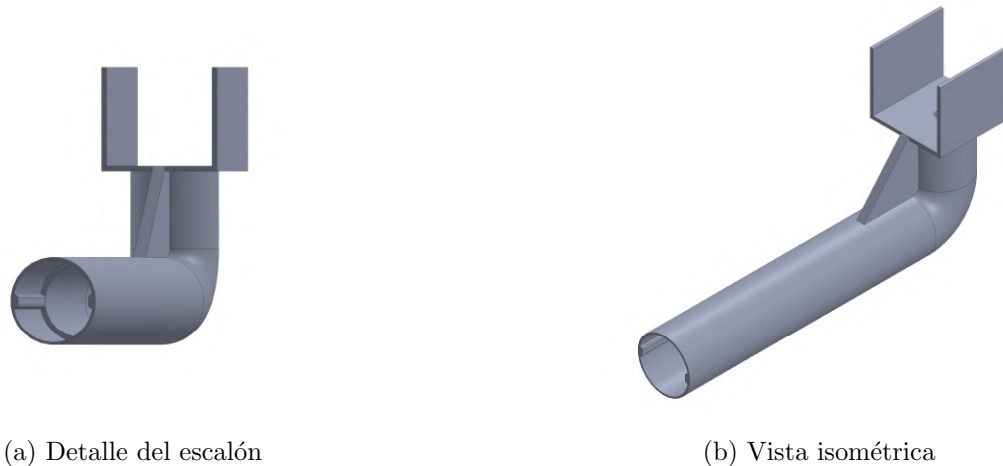


Figura 29: Versión 16 del soporte vibrotáctil

### Versión definitiva

Finalmente, se corrige la versión 16 dando lugar a la definitiva versión 17 (ver Figura 30).

La versión final tiene las siguientes características:

- Tiene forma de “L”, pues presenta un codo de 90° y 20 mm de radio de giro junto a la base de sujeción.
- La longitud total de la estructura es de 206 mm, 181 mm desde el extremo hasta el centro del hueco del tornillo.
- El diámetro exterior es de 34 mm y los diámetros interiores son de 32 mm (primeros 40 mm desde el extremo del componente) y 26 mm (en el resto de la estructura), es decir, que el soporte vibrotáctil tiene un grosor de 1 mm en su zona más estrecha y de 4 mm en el resto de la estructura.
- La base superior de sujeción del soporte es un cuadrado de 50 mm de lado.
- Incluye un nervio de 40° de inclinación respecto a la vertical (horizontal a la hora de imprimir), para proporcionar mayor rigor al elemento y resulte ser inflexible ante esfuerzos moderados.

#### 4 IMPLEMENTACIÓN DEL ENTORNO EXPERIMENTAL

- La estructura posee dos agujeros, uno pequeño para la salida del tornillo y otro de mayor tamaño para la entrada del tornillo y la salida de los cables de audio.
- En las paredes de la base de sujeción con forma de “C”, se añaden almohadillas acolchadas adhesivas para mayor fijación de la estructura a la mesa.

Las dimensiones exactas de este modelo 17 se pueden consultar en el Anexo A.4 y las diferentes vistas del mismo se pueden observar en la Figura 30.

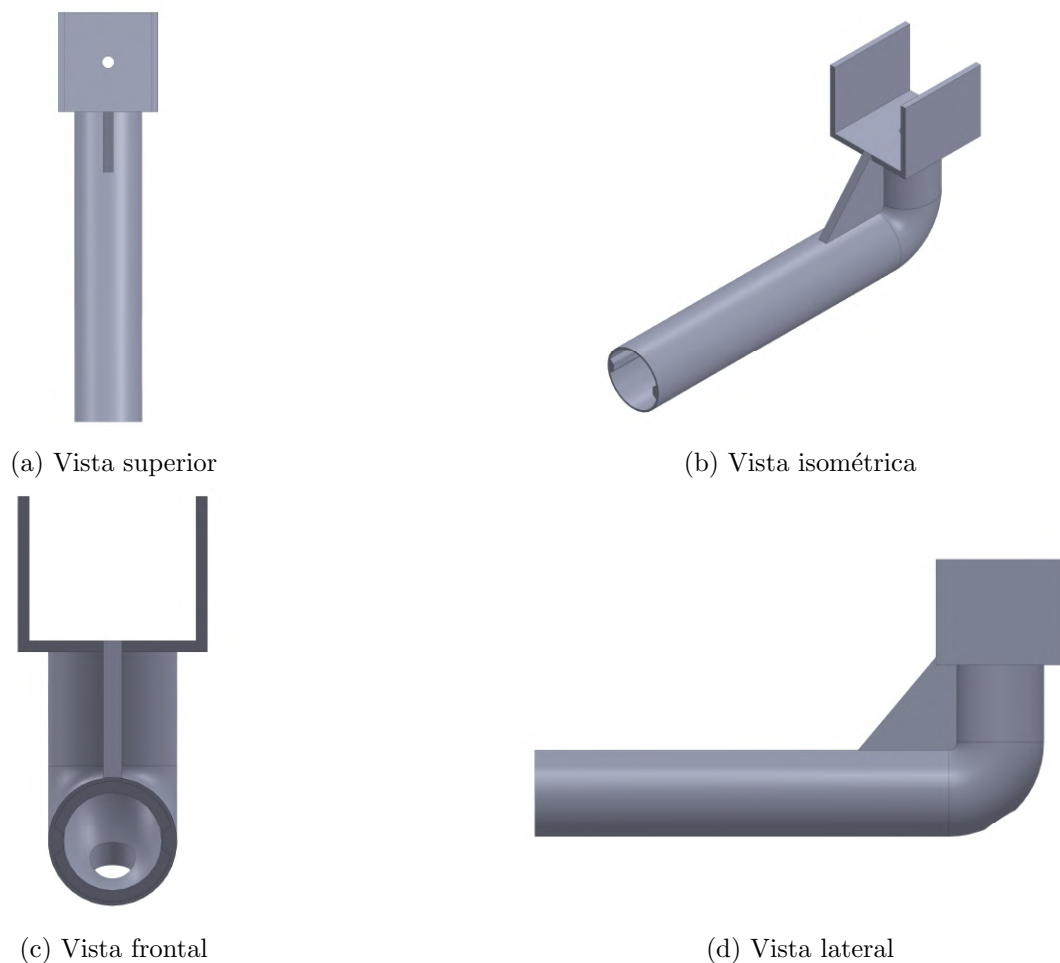


Figura 30: Versión 17 del soporte vibrotáctil

Finalmente, al incluir la versión final del soporte vibrotáctil en el boceto inicial de la Figura 26, se obtiene la Figura 31.

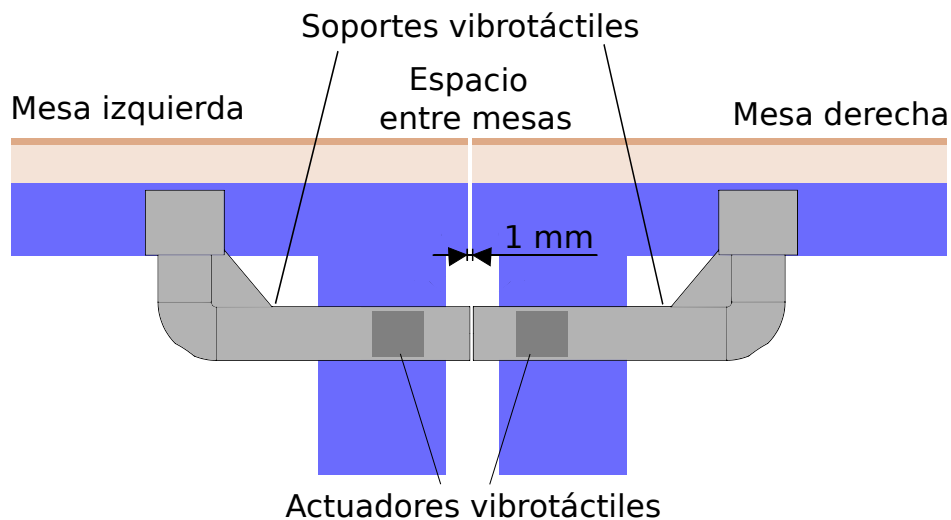


Figura 31: Representación de la interfaz vibrotáctil fabricada e instalada

### 4.3. Interfaz gráfica

En este TFG, se diseña y desarrolla una interfaz gráfica como herramienta multifunción que no solo ofrezca la posibilidad de almacenar las respuestas de los participantes, sino que explique brevemente el experimento, guíe en todo momento al usuario, establezca tiempos de pausa para conservar la atención de los voluntarios y sirva para representar estímulos visuales en concordancia con ciertos estímulos vibrotáctiles.

El hecho de utilizar una interfaz gráfica permite sustituir la intervención absoluta de los expertos en los experimentos por una intervención parcial. Evitar una predisposición al responder es esencial, pues se pretende valorar exactamente qué es lo que percibe cada persona que se somete al experimento, sin importar cuál sea su respuesta. De hecho, cualquier tipo de sugestión de los voluntarios es inconcebible, puede conllevar a resultados inconclusos y/o erróneos, lo que anula en su totalidad la finalidad principal de este Trabajo Fin de Grado que es, en última instancia, estudiar la influencia de la retroalimentación visual sobre los estímulos táctiles de movimiento.

Previamente en la Sección 3 se expone que el TFG consta de dos experimentos, cada uno de ellos compuesto de diversas experiencias. Tal como se acaba de mencionar, los voluntarios no deben estar predispuestos de ninguna manera por lo que cada participante realiza un único experimento: el *Experimento 1* (Subsección 3.2) o el *Experimento 2* (Subsección 3.3).

La interfaz gráfica se implementa en AppDesigner de MATLAB como se indica en la Subsección 3.2.2, ya que este entorno de desarrollo es compatible con scripts ejecutables elaborados en MATLAB. AppDesigner permite la reproducción simultánea de *Scripts*, lo que resulta muy conveniente a la hora de implantar retroalimentación visual porque se pueden ejecutar los scripts que generan las señales de audio de dan lugar a la ilusión vibrotáctil de movimiento en sincronía con los scripts que establecen el estímulo visual de un punto moviéndose de un lado a otro de la interfaz.

En un principio, se aspira a reunir en la misma interfaz gráfica los dos experimentos a desarrollar. Sin embargo, ambos experimentos se componen de diversas experiencias y sesiones de

entrenamiento previas cuyo orden podría ser controlable a través de variables internas fácilmente modificables. A nivel de programación es sencillo controlar que se ejecute únicamente un experimento de los dos contenidos en la interfaz, pero los componentes interactivos IU incluidos en la *Design View*<sup>12</sup> han de tener un orden de prioridad concreto, es decir, si un botón jerárquicamente se encuentra debajo de una imagen aunque la imagen sea invisible y el botón sea visible y esté habilitado para su uso, dicho botón nunca puede ser pulsado. Entonces, debido a la dificultad encontrada para organizar la *Design View* de ambos experimentos en un mismo archivo de AppDesigner se dictamina separar los experimentos. De este modo, se establecen dos archivos en AppDesigner (cada uno con un experimento) que contienen lo siguiente:

- Breve introducción del experimento
- Diversos mensajes guía
- Experiencias relacionadas con *Sensaciones Fantasma de Movimiento*
- Experiencias basadas en la ilusión de movimiento *Cutaneous Rabbit*
- Pregunta/s que el usuario ha de responder
- Botones e imágenes para la recopilación de respuestas

Asimismo se decide no incluir las sesiones de entrenamiento en las interfaces pues el objetivo de estas sesiones es que los participantes logren percibir movimiento en las vibraciones que se reproducen en el soporte vibrotáctil, por lo que es esencial que no se realicen de forma rígida, sino que se adapten a cada participante y sus necesidades específicas. De este modo, las sesiones de entrenamiento dependen del conjunto de experiencias que van a reproducir después (CR o SFM) y del participante en sí, algunos voluntarios solo necesitan un par de segundos para captar movimiento en las vibraciones mientras que otros requieren un par de minutos para adaptarse al movimiento vibratorio.

Entonces, para otorgar flexibilidad a las sesiones de entrenamiento se opta por elaborar un script adicional a las interfaces que sea común para los dos experimentos y sea fácilmente modificable durante la sesión. El script general empleado (ver Anexo E.1) consiste en cuatro bucles while, cada uno de los cuales reproduce un movimiento de izquierda a derecha y luego de derecha a izquierda durante 2 o 3 minutos, de manera que se le permita al participante asimilar el movimiento. Los dos primeros bucles incluyen movimientos de la *Sensación Fantasma de Movimiento*, mientras que los otros dos reproducen movimientos *Cutaneous Rabbit*.

#### 4.3.1. Experimento 1

La interfaz gráfica de este experimento, se diseña en la Subsección 3.2. En esencia, es la herramienta que genera las señales de audio que se transmiten a los actuadores vibrotáctiles, pregunta al participante sobre el punto de finalización del movimiento vibratorio ilusorio y recopila las respuestas en forma de coordenadas.

---

<sup>12</sup>Design View: vista de diseño

La interfaz gráfica se compone por el menor número de elementos posibles, los objetivos principales de la misma son guiar al usuario y recopilar los resultados, por lo que no debe desconcentrar a los voluntarios en la percepción de los estímulos que se les presentan. En diversos estudios y publicaciones [31], se manifiesta la pérdida de atención de los jugadores asociada a la representación gráfica de diferentes elementos simultáneos en la pantalla. Análogamente, en este experimento la presencia de colores llamativos, componentes singulares y/o simultáneos propicia la desconcentración de los participantes. Por consiguiente, se descarta la idea de realizar una interfaz espectacular, vistosa y compleja y se opta por una interfaz modesta, simple y concisa.

Entonces, se diseña la interfaz con los componentes imprescindibles:

- **UIFigure.** Es el escenario en el que se incluyen todos los elementos de la interfaz, se establece automáticamente al crear el archivo en AppDesigner.
- **x3 Cuadro de texto.** Tal como indica su nombre, el cuadro de texto se emplea para mostrar texto. En el experimento se sitúan en la posición central respecto a la horizontal y en la mitad superior de la vertical.
  - **Cuadro de texto 1.** Es el más usado de los tres, se emplea para mostrar todo el texto correspondiente a la introducción del experimento, los pasos intermedios de los que consta y representa todas las indicaciones adicionales. El tamaño de la letra es grande.
  - **Cuadro de texto 2.** Se utiliza de manera esporádica, muestra el texto que indica al usuario que puede repetir el estímulo si así lo desea. El tamaño de la letra es mediano.
  - **Cuadro de texto 3.** Este elemento se emplea para mostrar las diversas cuenta atrás contenidas en el experimento. La mayoría de ellas son de tres segundos y preceden a la ejecución de los diversos estímulos, otra de las cuenta atrás es necesaria para establecer un tiempo de descanso en el ecuador de la prueba. El tamaño de la letra es muy grande.
- **x7 Botones.** Son los componentes que ofrecen al usuario una forma de desencadenar una acción inmediata.
  - **Botón Empezar.** Este botón se hace visible al principio del experimento para que el usuario pueda decidir en qué momento desea empezar el experimento. Una vez pulsado, se ejecuta el programa del experimento y el botón desaparece.
  - **Botón Siguiente.** Este botón permanece invisible la mayor parte del tiempo, aparece únicamente al principio de cada conjunto de experiencias, indicando al participante el tipo de experiencia que va a experimentar (puntos que saltan o movimiento continuo). Al pulsarlo, el programa continúa su ejecución.
  - **Botón Repetir.** Este botón se utiliza para brindar la posibilidad al usuario de repetir estímulos las veces que estime oportuno. Resulta esencial la presencia de este botón, en el caso en el que el participante pierda la concentración a lo largo del experimento, puede repetir el último estímulo y continuar la prueba con normalidad.
  - **Botón Izquierda.** Este botón se habilita para la respuesta del usuario, se ha de pulsar para responder que la percepción del punto de finalización del movimiento se encuentra localizado más a la izquierda de la parte seleccionable de la pantalla.
  - **Botón Derecha.** Este botón se habilita para la respuesta del usuario, se ha de pulsar

para responder que la percepción del punto de finalización del movimiento se encuentra localizado más a la derecha de la parte seleccionable de la pantalla.

- **Botón Recuadro Mano.** No actúa como botón, sino como imagen que indica el tamaño y la posición de la mano del participante (en mitad del soporte vibrotáctil y de 7 *cm* de longitud). Permanece visible e inhabilitado en todo momento, junto con el botón Recuadro Botones representan la forma y tamaño del soporte de los actuadores.
  - **Botón Recuadro Botones.** No actúa como botón, sino como imagen indicando la longitud y grosor del tubo que contiene los actuadores del experimento. Permanece visible e inhabilitado en todo momento, se encuentra en concordancia con el botón *Recuadro Mano*.
- **x2 Imágenes.** Estos componentes permiten incrustar gif animados e imágenes, entre sus características destacan la visibilidad y la posibilidad de actuar como botones.
- **Imagen final del experimento.** Es un gif animado que agradece la participación a los voluntarios.
  - **Imagen del soporte de los actuadores.** Esta representa en pantalla el tubo situado debajo de la mesa, tiene el mismo grosor (34 *mm*) y 52 *mm* de longitud. Esta imagen es visible durante todo el experimento y se habilita como botón en el tiempo de respuesta de los participantes.

Por otra parte, en lo que a código se refiere, se describe detalladamente el funcionamiento de la interfaz junto con el código correspondiente. Se toma en consideración que el experimento se divide en dos partes mitades como se indica en Subsubsección 3.2.4. La interfaz no las sesiones de entrenamiento previas al experimento pero cumple los siguientes requisitos:

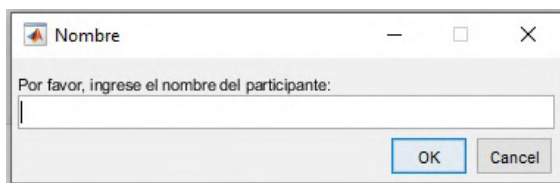
- **Detenible.** El participante ha de poder tomarse un descanso en cualquier momento de la sesión experimental sin que esto suponga el reinicio total de la prueba, es decir, ha de poder reanudar el experimento justo en el punto en el que se haya detenido previamente.
- **Separable.** Se pretende poder elegir qué parte del código se ejecuta, si la mitad referida a *Cutaneous Rabbit* o la mitad restante, relacionada con las *Sensaciones Fantasma de Movimiento*.
- **Amigable.** La interfaz ha de ser intuitiva y fácil de usar para todos los participantes, independientemente de su edad y/o destreza con la tecnología en general.
- **Útil.** La interfaz ha de cumplir sus objetivos principales: breve explicación del experimento, guía para los participantes y herramienta para la recopilación de datos.

Al comenzar el experimento, aparecen cuatro pestañas flotantes consecutivas (ver Figura 32). Las dos primeras pestañas se emplean para guardar en dos variables globales internas, el nombre y primer apellido del participante. Dichas variables son de gran utilidad a la hora de almacenar los datos, pues los resultados de cada participante se guardan en un fichero *.slx* con el nombre *NombreApellido\_Exp1\_EE* (donde “EE” hace referencia al tipo de experiencia de la cual se recopilan datos, “FS” si es *Sensación Fantasma de Movimiento* o “CR” si es *Cutaneous Rabbit*).

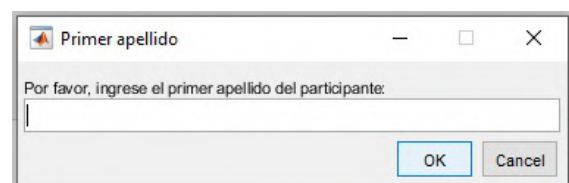
Los dos recuadros restantes se emplean para ejecutar una u otra parte del código según se desee. Aunque no es imprescindible, resulta interesante comprobar si reproducir un tipo de experiencia u otra primero, se refleja en los resultados. De esta manera, se utiliza la variable *experiencia* que se le asigna el valor 1 o 2, dependiendo si se escribe “SFM” o “CR” en el recuadro 3 de la Figura 32. En consecuencia, hay cuatro combinaciones posibles de ejecución del programa según se escriba un contenido u otro en las ventanas flotantes:

- **Recuadro 3 “SFM”, recuadro 4 “si”**: se ejecutan las experiencias relacionadas con la *Sensación Fantasma de Movimiento*, se da la bienvenida al experimento y al final se ofrece un tiempo de descanso porque se supone que se ha completado la mitad del experimento.
- **Recuadro 3 “SFM”, recuadro 4 “no”**: se ejecutan las experiencias relacionadas con la *Sensación Fantasma de Movimiento*, al final se agradece al voluntario su participación pues, en teoría, ya ha realizado previamente las experiencias de *Cutaneous Rabbit* y completado el experimento en su conjunto.
- **Recuadro 3 “CR”, recuadro 4 “si”**: se ejecutan las experiencias de *Cutaneous Rabbit*, se da la bienvenida al experimento y al final se ofrece un tiempo de descanso porque se supone que se ha completado la mitad del experimento.
- **Recuadro 3 “CR”, recuadro 4 “no”**: se ejecutan las experiencias de *Cutaneous Rabbit*, al final se agradece al voluntario su participación porque se supone que se han completado las experiencias de *Sensación Fantasma de Movimiento* también.

Estos cuatro recuadros no han de ser completados por el participante, sino por el experto que controla el funcionamiento de la prueba. Una vez rellenos todos los campos, se transfiere la interfaz gráfica a la pantalla táctil que el usuario tiene a su disposición, de manera que pueda pulsar el botón de empezar el experimento en cualquier momento.



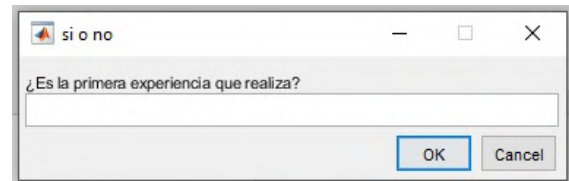
(a) Recuadro “Nombre”



(b) Recuadro “Apellido”



(c) Recuadro de selección de “experiencia”



(d) Recuadro de elección de una “introducción”

Figura 32: Campos rellenables de las ventanas emergentes iniciales

Inicialmente, la interfaz tiene el aspecto de la Figura 33 donde algunos de los elementos están inhabilitados u ocultos, tal como se ha programado en la función de inicio del programa (ver

Código 4). La función *startupFcn()* se ejecuta una única vez al principio del programa, sirve para asignar valores iniciales a variables globales y establecer una vista preliminar de la interfaz. Se trabaja con un total de 11 variables globales que aparecen en el Código 3.

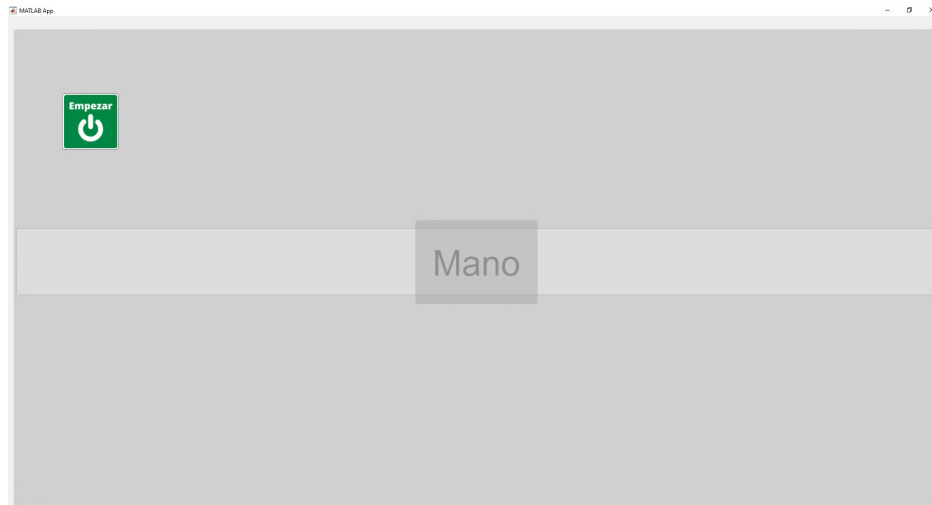


Figura 33: Pantalla de inicio de la primera interfaz

```

1 properties (Access = public)
2
3     codigos_vibracionFS      % Matriz que contiene los codigos que ejecutan las vibraciones de los
4     actuadores             % Matriz que contiene los codigos que ejecutan las vibraciones de los
5     actuadores             % Matriz que guarda los resultados del experimento completo
6     matriz_experimentos     % Valor numerico que el usuario marca al acabar cada parte del experimento
7     experimento
8
9     Nombre                  % Nombre del usuario
10    Apellido                 % Apellido del usuario
11    NombreCompleto          % Nombre del archivo donde se guardaran los resultados del experimento
12
13    introduccion            % Variable que indica la completitud de la experiencia
14    repetir                  % Variable empleada para gestionar la repeticion de las ilusiones
15    experiencia              % Variable que indica la experiencia a realizarm(SFM o CR)
16
17    direccion                % Variable que permite controlar la direccion de la flecha del movimiento
18
19 end

```

Código 3: Declaración de variables globales

```

1 function startupFcn(app)
2
3     % Inicializar variable repetir
4     app.repetir = 0;
5
6     % Inicializar las matrices con los codigos que se ejecutan
7     app.codigos_vibracionFS = ['Vib_FS_025_ID'; 'Vib_FS_050_ID'; 'Vib_FS_100_ID'; 'Vib_FS_150_ID';
8     'Vib_FS_200_ID'; 'Vib_FS_250_ID'; 'Vib_FS_300_ID'; 'Vib_FS_025_DI'; 'Vib_FS_050_DI';
9     'Vib_FS_100_DI'; 'Vib_FS_150_DI'; 'Vib_FS_200_DI'; 'Vib_FS_250_DI'; 'Vib_FS_300_DI'];
10    app.codigos_vibracionCR = ['Vib_CR_380_ID'; 'Vib_CR_560_ID'; 'Vib_CR_740_ID';
11    'Vib_CR_380_DI'; 'Vib_CR_560_DI'; 'Vib_CR_740_DI'];
12
13    % Inicializar la matriz de resultados
14    app.matriz_experimentos = [];
15
16
17    % Inicializar Design View
18    deshabilitar_botones_experimento1(app);
19    set(app.Repetir, 'Visible', 'off');
20    set(app.Siguiente, 'Visible', 'off');

```

```
21 set(app.Image, 'Visible', 'off');
22 set(app.RecadroBotones, 'Visible', 'on');
23 set(app.RecadroMano, 'Visible', 'on');
24 set(app.FlechaDerecha, 'Visible', 'off');
25 set(app.FlechaIzquierda, 'Visible', 'off');
26
27 set(app.Repetir, 'Enable', 'off');
28 set(app.Siguiente, 'Enable', 'off');
29 set(app.RecadroBotones, 'Enable', 'off');
30 set(app.RecadroMano, 'Enable', 'off');
31
32
33
34 % Preguntar al usuario su nombre
35 nombre = inputdlg('Por favor, ingrese el nombre del participante:', 'Nombre', [1 60]);
36
37 % Almacenar la respuesta del usuario en una variable
38 if ~isempty(nombre)
39     app.Nombre = nombre{1};
40 end
41
42
43 % Preguntar al usuario su primer apellido
44 apellido = inputdlg('Por favor, ingrese el primer apellido del participante:',
45 'Primer apellido', [1 60]);
46
47 % Almacenar la respuesta del usuario en una variable
48 if ~isempty(apellido)
49     app.Apellido = apellido{1};
50 end
51
52
53 % Preguntar al usuario el experimento a realizar
54 pregunta1 = inputdlg('Indique la experiencia a realizar:', 'SFM o CR', [1 60]);
55
56 % Almacenar la respuesta del usuario en una variable
57 if ~isempty(pregunta1)
58     respuesta1 = pregunta1{1};
59 end
60
61 if strcmp (respuesta1, 'SFM')
62     app.experiencia = 1;
63 elseif strcmp (respuesta1, 'CR')
64     app.experiencia = 2;
65 end
66
67
68 % Preguntar al usuario si es el primer experimento que realiza
69 pregunta2 = inputdlg('Es la primera experiencia que realiza', 'si o no', [1 60]);
70
71 % Almacenar la respuesta del usuario en una variable
72 if ~isempty(pregunta2)
73     respuesta2 = pregunta2{1};
74 end
75
76 if strcmp (respuesta2, 'si')
77     app.introduccion = 1;
78 elseif strcmp (respuesta2, 'no')
79     app.introduccion = 2;
80 end
81 end
```

Código 4: *StartUpFcn()* o función de inicio de la interfaz

En ambos experimentos de este Trabajo Fin de Grado, se pretenden ejecutar distintas experiencias referidas al efecto *Sensaciones Fantasma de Movimiento* y a *Cutaneous Rabbit*. Teniendo presente que todas las experiencias relativas a SFM se han de reproducir juntas y en orden aleatorio, sin mezclarse con las de CR (que también han de presentar un orden azaroso), se decide emplear dos matrices u arrays. Las dos matrices almacenan scripts, cada script ejecuta un subprograma con ciertos parámetros que originan la señal de entrada a los actuadores. Dicha señal, otorga el efecto vibratorio a los actuadores vibrotáctiles que se percibe como movimiento. Almacenar los scripts en matrices permite la reproducción por bloques y aleatoria de las experiencias, pues haciendo uso de

la función `randperm(n,n)` de MATLAB y un bucle `while`, es posible recorrer todas las posiciones de un array de forma aleatoria. Asimismo, a pesar de la ejecución al azar de los scripts, la variable de control que indica la posición del array que se ha de leer en cada momento, sirve para salvar los resultados en orden. Por ejemplo, si el array contiene las experiencias A, B y C en este orden; aleatoriamente, es posible que se ejecute la experiencia C primero, la A después y por último la B, pero siempre se guardan los datos de la experiencia A en primer lugar, de la B en segundo lugar y de la C en tercer lugar.

Suprimiendo parte del código de la interfaz incluido (en el Anexo E.2), en el Código 5 se puede apreciar la metodología implementada para la reproducción aleatoria de experiencias y el almacenamiento de respuestas en orden. Cabe destacar que la variable `i` se ha inicializado previamente a valor `1` y que `numeros_aleatorios` es un array de:

- **Sensación Fantasma de Movimiento:** 14 números aleatorios del 1 al 14, porque se desean reproducir catorce experiencias diferentes.
- **Cutaneous Rabbit:** 6 números aleatorios del 1 al 6, porque hay seis experiencias distintas de este tipo.

```
1 while i <= length(numeros_aleatorios)
2
3     [...]
4
5     % Ejecutar los codigos correspondientes
6     deshabilitar_botones_experimento1(app);
7     indice = numeros_aleatorios(i);
8     codigo_vibracion = app.codigos_vibracionFS(indice,1:13);
9     eval(codigo_vibracion);
10
11    % Mostrar direccion del movimiento
12    if app.direccion == 0
13        set(app.FlechaDerecha, 'Visible', 'on');
14    else
15        set(app.FlechaIzquierda, 'Visible', 'on');
16    end
17
18    [...]
19
20    % Actualizar matriz de resultados
21    app.matriz_experimentos(indice) = app.experimento;
22
23    [...]
24
25
26    i=i+1;
27
28 end
```

Código 5: Bucle `while` para la reproducción al azar de experiencias

Tan pronto como se pulsa el botón empezar, este desaparece y comienza la ejecución del programa que engloba al experimento. Como los campos rellenos en las ventanas emergentes de la Figura 32 condicionan la ejecución del programa de la interfaz, se explica un hipotético caso en el que un participante realiza el experimento completo.

Retomando el inicio del experimento, tras pulsar el botón “Empezar”, se da la bienvenida al participante y aparece una frase que indica la mitad del experimento que se va a realizar (puntos que saltan o puntos móviles vibratorios continuos) junto con el botón “Siguiente”, que desencadena una breve explicación de esa parte del experimento como se puede observar en la Figura 34a. Tras

un par de segundos de explicación inicial, comienza la reproducción de los distintos movimientos de los que consta la mitad del experimento que se está ejecutando y la habilitación del espacio de respuesta tras cada movimiento diferente.



Figura 34: Capturas de la interfaz gráfica del primer experimento (I)

Cabe destacar que todos los subprogramas que reproducen el movimiento vibratorio, se ejecutan al menos dos veces, la primera vez sirve para presentar el movimiento y la segunda vez, simplemente se repite la misma vibración, con la finalidad de resaltar el estímulo. En este primer experimento, no consiste en que el participante averigüe la dirección del movimiento, sino que indique dónde cree que acaba el movimiento. Por este motivo, durante la primera repetición del movimiento, tal como se aprecia en la Figura 34b, aparece en la mitad inferior de la pantalla una flecha que indica la dirección del movimiento para que en la segunda repetición, el voluntario pueda cerrar los ojos para agudizar el sentido del tacto y percibir mejor el punto de finalización del movimiento. Entonces, tras la segunda repetición aparece en pantalla la pregunta clave de este experimento "Pulse en pantalla donde crea que ha acabado el movimiento" (acompañada de la frase "Puede repetir el estímulo si no está seguro/a de su respuesta"), se habilita el espacio de respuesta del participante cuya apariencia se aprecia en la Figura 35. En ese escenario, el usuario tiene dos opciones, responder o repetir el estímulo recién percibido.

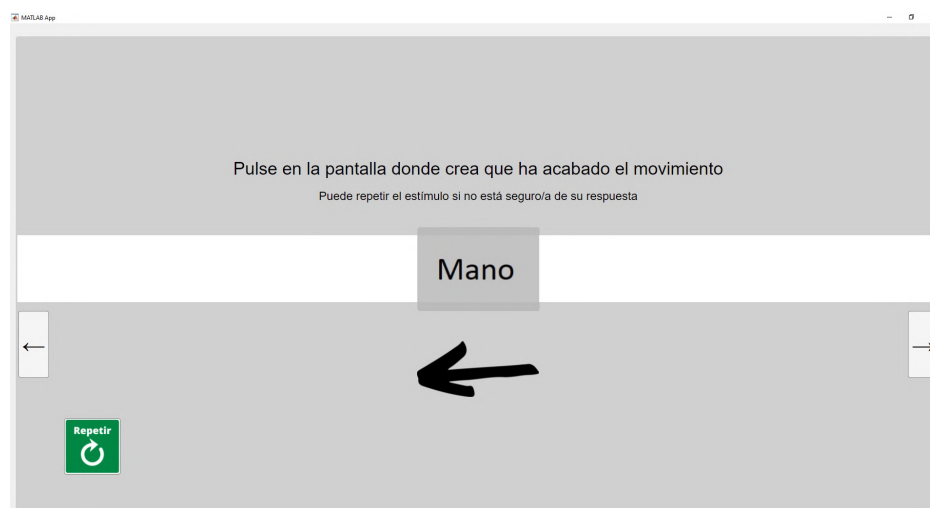


Figura 35: Espacio de respuesta, experimento 1

En el caso en el que el participante desee responder, puede pulsar cualquier punto de la representación gráfica del soporte de los actuadores, guardándose automáticamente la coordenada pulsada. En el Código 6 extraído del Anexo E.2 correspondiente a la *CallBack* de la imagen de respuesta, se restaura la ejecución del programa al pulsarla y se almacena el valor de la coordenada “x” en la variable *coordenada*. El valor de *coordenada*, es la coordenada pulsada del elemento *UIFigure* por lo sabiendo la longitud de la imagen (1888 puntos), la transformación de la coordenada recogida a centímetros es directa. Se ha tenido en cuenta que pulsar en el centro de la pantalla equivale a marcar un cero en distancia, pulsar en la parte derecha son distancias positivas y pulsar en el lado izquierdo, distancias negativas. Asimismo, hay otras dos posibles respuestas:

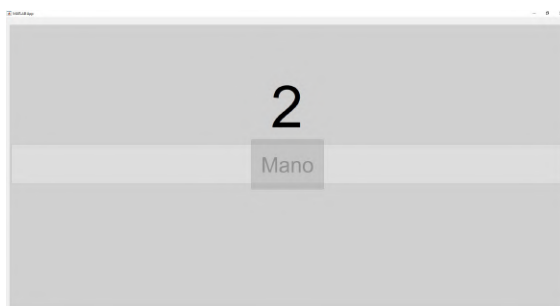
- Flecha a la derecha: para indicar que el fin del movimiento se localiza más a la derecha de la pantalla.
- Flecha a la izquierda: para marcar que el fin del movimiento se ha percibido más a la izquierda de la zona marcable.

No obstante, si el participante duda sobre su respuesta, tiene la posibilidad de pulsar un botón llamado “Repetir” cuya función es reproducir el estímulo recién percibido. Los voluntarios pueden hacer uso de este botón las veces que estimen oportuno.

```
1 % Image clicked function: ImageSoporte
2 function ImageSoporteClicked(app, event)
3     uiresume(app.UIFigure);
4     coordenada=app.UIFigure.CurrentPoint(1);
5     if coordenada>944
6         app.experimento = 52*coordenada/1888 - 26;
7     elseif coordenada < 944
8         app.experimento = - (26-52*coordenada/1888);
9     else
10        app.experimento=0;
11    end
12    end
```

Código 6: Función que controla la pulsación sobre la imagen del soporte vibrotáctil

Por otro lado, entre vibración y vibración, se reproduce una cuenta atrás de tres segundos de duración para preparar a los voluntarios para la percepción del estímulo (ver Figura 36a). La interfaz guía en todo momento al participante del experimento, tal como se aprecia en la Figura 36b.



(a) Cuenta atrás



(b) Ejemplo de mensaje explicativo o guía

Figura 36: Capturas de la interfaz gráfica del primer experimento (II)

Al terminar la primera mitad del experimento, es decir, hacia el ecuador de la prueba en cuestión, se incluye una pausa obligatoria de al menos dos minutos de duración. Este tiempo de espera, se representa empleando el mismo elemento *Cuadro de Texto* que en la cuenta atrás de tres segundos. En el software, esto se implementa con un bucle *for* como se indica en el Código 7.

```
1 % Descanso de 2 minutos
2 for j=1:120
3     set(app.TextoNumeros, 'Text', num2str(121-j));
4     pause(1);
5 end
6 set(app.TextoNumeros, 'Text', '');
```

Código 7: Programación de la cuenta atrás

Seguidamente, se realiza al participante la sesión de entrenamiento correspondiente a la otra mitad del experimento y en la interfaz se le reproduce el conjunto de experiencias que le falta por completar, y finalmente, cuando se han reproducido todas las experiencias del experimento, se le indica al voluntario que ha completado la prueba, se ocultan todos los elementos de la interfaz y se muestra un gif animado que agradece a la persona su participación.

En resumen, la interfaz representa el experimento de la siguiente manera:

- Bienvenida del participante al experimento
- Introducción de la primera mitad del experimento
- Ejecución de las experiencias asociadas a la primera mitad del experimento, con texto explicativo intermedio incluido más diversas cuenta atrás entre experiencias.
- Recopilación de resultados de la primera mitad del experimento.
- Tiempo de descanso en el ecuador de la prueba.
- Ejecución de la segunda mitad del experimento, acompañada también con textos explicativos añadidos y diversas cuentas atrás.
- Recopilación de los datos de la segunda mitad del experimento
- Fin del experimento y agradecimiento al participante por su colaboración.

#### 4.3.2. Experimento 2

El segundo experimento que se diseña en la Subsección 3.3, se puede considerar una ampliación del primer experimento. La mayoría de las ilusiones táctiles reproducidas en el segundo experimento son las mismas que en el primero, pues se desea estudiar si la retroalimentación visual, mejora, empeora o es indiferente a la percepción táctil. Con la finalidad mencionada la interfaz del segundo experimento es prácticamente idéntica a la del primer experimento en cuanto a estructura general. La mayoría de mensajes introductorios de las experiencias se mantienen inalterados y solo se inducen cuatro grandes cambios respecto a la interfaz anterior:

- El espacio de respuesta del primer experimento consiste en una imagen que actúa de botón y dos botones adicionales, donde el participante ha de pulsar para indicar donde percibe



la finalización del movimiento vibratorio. Por el contrario, en el segundo experimento, el participante no ha de responder dónde cree que ha finalizado el movimiento vibratorio ilusorio, sino cuánto se parecen los estímulos táctil y visual que se le presentan de forma simultánea.

- El primer experimento sólo consiste en una pregunta por cada estímulo diferente, el segundo experimento incluye hasta 3 preguntas por cada movimiento distinto.
- Se añade un estímulo visual consistente en un punto rojo que se mueve de izquierda a derecha o de derecha a izquierda.
- No se indica la dirección del movimiento con una flecha, se debe de intuir para comparar los estímulos visual y táctil.

Respecto a los elementos que contiene esta segunda interfaz, la mayoría son los mismos que en la interfaz del primer experimento:

- **UIFigure**. Constituye la base sobre la cual se incrustan todos los demás elementos de la interfaz, se establece automáticamente al crear el archivo en AppDesigner.
- **x3 Cuadro de texto**. Tal como indica su nombre, el cuadro de texto se emplea para mostrar texto.
  - **Cuadro de texto 1**. Es el cuadro de texto principal, muestra todo el relativo a introducción del experimento, los pasos intermedios de los que consta y representa todas las indicaciones adicionales. El tamaño de la letra es grande.
  - **Cuadro de texto 2**. Su uso se limita a mostrar el texto que indica al usuario que puede repetir un estímulo si lo necesita. El tamaño de la letra es mediano.
  - **Cuadro de texto 3**. Esporádicamente, es un elemento que muestra las diversas cuenta atrás de las que consta el experimento. El tamaño de la letra es muy grande.
- **x13 Botones**. Son los componentes que ofrecen al usuario una forma de desencadenar una acción inmediata.
  - **Botón Empezar**. Es un botón visible al principio del experimento y que desencadena la ejecución completa del programa del experimento.
  - **Botón Siguiente**. Botón oculto durante la mayor parte del experimento pero que al pulsarlo, reanuda la ejecución del mismo.
  - **Botón Repetir**. Posibilita que el usuario pueda repetir estímulos las veces que estime oportuno.
  - **Botón TotalmenteDiferentes**. Es un botón de respuesta, es común a los dos tipos de experiencias.
  - **Botón Distintos**. Es un botón de respuesta, es común a los dos tipos de experiencias.
  - **Botón SeParecen**. Es un botón de respuesta, es común a los dos tipos de experiencias.
  - **Botón MuySimilares**. Es un botón de respuesta, es común a los dos tipos de experiencias.
  - **Botón Identicos**. Es un botón de respuesta, es común a los dos tipos de experiencias.

- **Botón Mano.** Es un botón de respuesta, solo se usa en *Cutaneous Rabbit*.
  - **Botón Pantalla.** Es un botón de respuesta, únicamente se emplea en *Cutaneous Rabbit*.
  - **Botón Ambosigual.** Es un botón de respuesta, solo se utiliza para el conjunto de experiencias *Cutaneous Rabbit*.
  - **Botón Si.** Es un botón de respuesta, es exclusivo de las experiencias *Cutaneous Rabbit*.
  - **Botón No.** Es un botón de respuesta, es exclusivo de las experiencias *Cutaneous Rabbit*.
- **Imagen.** Es un gif animado que agradece la participación a los voluntarios al finalizar el experimento.
  - **x2 UIAxes.** Son elementos que recrean gráficas.
    - **Gráfica del punto que se mueve.** El movimiento visual del punto en la pantalla se realiza haciendo uso de una gráfica a la que se le han eliminado ejes, título, leyenda y fondo.
    - **Imagen de fondo.** Se usa un componente gráfica para incrustar una imagen de fondo en la interfaz que represente el soporte vibrotáctil oculto como se aprecia en la Figura 40a.

En resumen, las principales novedades que incorpora el segundo experimento respecto al primero son la/s preguntas que se deben responder, el espacio de respuesta y la inclusión de estímulos visuales. A continuación se detalla cómo se abordan estas singularidades en el código.

En primer lugar, se emplean un total de 20 variables globales (ver Código 8), la mayoría de ellas se inicializan en la función *startUpFcn()* que es más extensa que en el caso anterior (ver código completo en el Anexo E.3). El incremento significativo de variables globales se debe esencialmente a la adición del estímulo visual, pues consiste en un punto que se ha de mover a una cierta velocidad, entre dos puntos seleccionados, en una dirección determinada y de forma específica (continua o a saltos).

```
1 properties (Access = public)
2
3     codigos_movimientoFS    % Matriz que contiene los codigos que ejecutan el movimiento de la bola
4     codigos_movimientoCR    % Matriz que contiene los codigos que ejecutan el movimiento de la bola
5     codigos_vibracionFS     % Matriz que contiene los codigos que ejecutan las vibraciones de los
6     actuadores
7     codigos_vibracionCR     % Matriz que contiene los codigos que ejecutan las vibraciones de los
8     actuadores
9     matriz_experimentos     % Matriz que guarda los resultados del experimento completo
10    experimento              % Valor numerico que el usuario marca al acabar cada parte del
11    experimento2             % Valor numerico de la pregunta adicional al usuario en CR
12    experimento3            % Valor numerico de la pregunta segunda adicional al usuario en CR
13
14    punto                    % Punto que se mueve
15    inicio                   % Variable empleada para controlar el inicio del movimiento del pto
16    fin                      % Variable empleada para controlar el final del movimiento del pto
17    continuidad              % Variable utilizada para controlar la continuidad del movimiento del
18    punto (0, movimiento continuo y >0 movimiento discontinuo)
19    duracion                 % Variable que controla la duracion del movimiento del pto
20    direccion                % Variable que controla la direccion del movimiento del pto
21
22    Nombre                   % Nombre del usuario
23    Apellido                 % Apellido del usuario
24    NombreCompleto           % Nombre del archivo donde se guardaran los resultados del experimento
25
26    introduccion             % Variable que indica la completitud de la experiencia
27    repetir                  % Variable empleada para gestionar la repeticion de las ilusiones
28    experiencia              % Variable que indica la experiencia a realizarm(SFM o CR)
29
30 end
```

Código 8: Declaración de varibales globales, segundo experimento

El estímulo visual se ejecuta de forma paralela al movimiento táctil ilusorio, pues el objetivo del experimento es poder comparar ambos. Para que esto sea posible, se añaden dos matrices u arrays compuestos por scripts que incluyen valores para las variables globales que controlan el movimiento del punto. De esta forma, cuando se ejecuta un script asociado a una vibración, también se ejecuta un script asociado a un movimiento visual (que asigna valores determinados a las variables globales correspondientes) y se llama a la función *movimientoPunto()* que se encarga de hacer visible el movimiento de un punto rojo en la pantalla según los valores de las variables globales que determinan el movimiento del mismo:

- **punto:** es el punto que se mueve.
- **inicio:** es la variable que se emplea para controlar el inicio del movimiento del punto, junto con la variable fin permite obtener el desplazamiento del punto durante el movimiento.
- **fin:** es la variable que se emplea para controlar el final del movimiento del punto, junto con la variable inicio permite obtener el desplazamiento del punto durante el movimiento.
- **continuidad:** es la variable que se utiliza para controlar la continuidad del movimiento del punto, resulta muy útil para recrear el movimiento referido a *Cutaneous Rabbit* que debe ser a saltos, frente el movimiento de *Sensación Fantasma de Movimiento* que debe ser continuo.
- **duracion:** es la variable que controla la duración del movimiento del punto, es esencial porque permite calcular la velocidad a la que se mueve el punto. Recordando la definición de velocidad, es el incremento de posición respecto el incremento de tiempo.
- **direccion:** es la variable que controla la dirección del movimiento del punto, es decir, el movimiento puede ser de derecha a izquierda o de izquierda a derecha.

La función *movimientoPunto()* incluida en el Código 9 se basa en la Ecuación 1, típica del movimiento rectilíneo uniforme. La posición  $x$  (posición que se grafica en cada iteración) se calcula como la suma de una posición inicial  $x_o$  que se actualiza constantemente y la velocidad (constante obtenida de la división del espacio a recorrer entre el tiempo de movimiento) multiplicada por el tiempo real  $t$ , que lo proporciona la función tic-toc de MATLAB. La función tic registra el tiempo actual y la función toc utiliza el valor registrado para calcular el tiempo transcurrido.

$$x = x_o + v \cdot t \quad (1)$$

```
1 function movimientoPunto(app)
2
3     % Calcular la velocidad del punto
4     velocidad = (app.fin - app.inicio) / app.duracion;
5
6     % Configurar el grafico
7     app.punto = plot(app.grafica, app.inicio, 0, 'o', 'MarkerSize',20, 'MarkerEdgeColor','r', '
8     MarkerFaceColor','r');
9     set(app.punto, 'Visible', 'on');
10    xlim(app.grafica, [0, 52]);
11    ylim(app.grafica, [-1, 1]);
12    grid(app.grafica, 'on');
13
14    % Iniciar temporizador
15    tic;
16
17    % Fijar posicion inicial (x0)
18    pos_inicial= app.inicio;
19
20    if app.inicio < app.fin
21
22        % Mover el app.punto (x = x0 + v0*t)
23        while app.inicio < app.fin
24
25            % Actualizar la posicion del app.punto
26            app.inicio = pos_inicial + velocidad*toc;
27
28            % Dibujar el app.punto en la grafica
29            app.punto=plot(app.grafica, app.inicio, 0, 'o', 'MarkerSize',40, 'MarkerEdgeColor','r
30            ', 'MarkerFaceColor','r');
31            set(app.punto, 'Visible', 'on');
32            drawnow;
33
34            % Eliminar el app.punto entre iteraciones en CR
35            if app.continuidad ~= 0
36
37                set(app.punto, 'Visible', 'off');
38
39            end
40
41            % Esperar un breve periodo de tiempo para mantener una velocidad constante
42            pause(app.continuidad);
43
44        end
45
46    else
47
48        % Mover el app.punto (x = x0 + v0*t)
49        while app.inicio > app.fin
50
51            % Actualizar la posicion del app.punto
52            app.inicio = pos_inicial + velocidad*toc;
53
54            % Dibujar el app.punto en la grafica
55            app.punto=plot(app.grafica, app.inicio, 0, 'o', 'MarkerSize',40, 'MarkerEdgeColor','r
56            ', 'MarkerFaceColor','r');
57            set(app.punto, 'Visible', 'on');
58            drawnow;
```

```
59 % Eliminar el app.punto entre iteraciones en CR
60 if app.continuidad ~= 0
61
62     set(app.punto, 'Visible', 'off');
63
64     end
65
66
67 % Esperar un breve periodo de tiempo para mantener una velocidad constante
68 pause(app.continuidad);
69
70     end
71
72
73     end
74
75
76 end
```

Código 9: Función *movimientoPunto()*

Al igual que en el primer experimento, este segundo experimento consta de dos partes bien diferenciadas como se diseña en Subsubsección 3.3.4. Ambas partes se ejecutan en la interfaz por separado según se completen los campos de las ventanas emergentes iniciales (ver Figura 32). Del mismo modo, se emplea el script del Anexo E.1, común a los dos experimentos del TFG para realizar las sesiones de entrenamiento previas a los dos conjuntos de experiencias.

### Sensacion Fantasma de Movimiento

El segundo experimento consta de 18 parejas (estímulo visual, estímulo vibrotáctil) diferentes de SFM, los estímulos vibrotáctiles son de tres y se combinan de todas las formas posibles con los seis estímulos visuales disponibles.

Estímulos vibrotáctiles:

- 0,5 s de duración
- 1 s de duración
- 2,5 s de duración

Estímulos visuales:

- 3,5 cm de longitud, de izquierda a derecha, centrado horizontalmente
- 7 cm de longitud, de izquierda a derecha, centrado horizontalmente
- 7 cm de longitud, de derecha a izquierda, centrado horizontalmente
- 20 cm de longitud, de izquierda a derecha, en la mitad izquierda de la pantalla
- 20 cm de longitud, de izquierda a derecha, en la mitad derecha de la pantalla
- 40 cm de longitud, de izquierda a derecha, centrado horizontalmente

La pregunta que se le hace al participante siempre es la misma tras las dos repeticiones de cada pareja de estímulos: “Evalúe el grado de semejanza entre el punto de la pantalla y el movimiento en el mango”. Esta es una pregunta denominada pregunta de escala pues este tipo de preguntas se utilizan para evaluar el grado de intensidad o sentimiento de una característica o variable que se está midiendo. En el caso de este experimento, se pretende medir el grado de coherencia existente entre el movimiento del punto rojo de la interfaz gráfica (ver Figura 37) y el movimiento vibratorio que tiene lugar en el interior del soporte vibrotáctil que el participante sujeta, en base a dos criterios:

- **Localización:** posición (a la izquierda, derecha o en la mano) y longitud (2 o 3 *cm*, media pantalla, toda la pantalla o más) del movimiento.
- **Dirección:** de derecha a izquierda o viceversa.

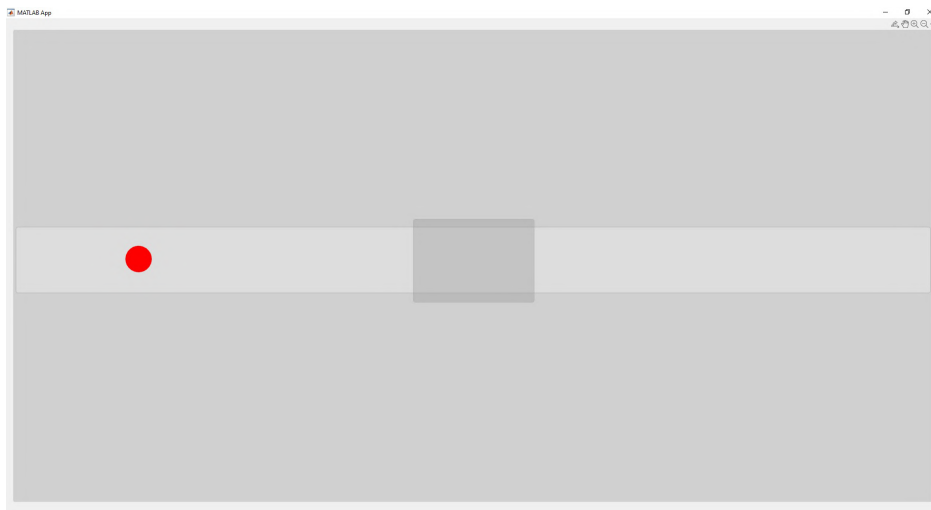


Figura 37: Punto rojo en movimiento, segundo experimento

Tras la pregunta aparece en pantalla la frase “Puede repetir el estímulo si no está seguro/a de su respuesta” y se habilita el espacio de respuesta del participante cuya apariencia es la de la Figura 38. En ese momento, el usuario tiene dos opciones, responder o repetir el estímulo recién percibido pulsando el botón Repetir localizado en la esquina inferior izquierda de la interfaz.



Figura 38: Espacio de respuesta de la pregunta principal, segundo experimento

En el caso en el que el participante desee responder, puede pulsar cualquiera de los cinco botones disponibles de la Figura 38 para responder:

- **Totalmente diferentes:** los movimientos visual y táctil son prácticamente contradictorios.
- **Distintos:** los movimientos apreciados no se parecen, ya sea por localización o dirección.
- **Se parecen:** los movimientos son similares, pero hay alguna diferencia entre ellos.
- **Muy similares:** ambos movimientos percibidos son iguales pero algún pequeño matiz no termina de coincidir.
- **Idénticos:** los movimientos visual y táctil son totalmente iguales.

Al pulsar cualquiera de los botones de respuesta, se reanuda la ejecución del programa y se guarda una puntuación correspondiente al botón pulsado haciendo uso de una variable global, tal como se aprecia en el Código 10.

```

1      % Button pushed function: TotalmentediferentesButton
2      function TotalmentediferentesButtonPushed(app, event)
3          uiresume(app.UIFigure);
4          app.experimento = 1;
5      end
6
7      % Button pushed function: DistintosButton
8      function DistintosButtonPushed(app, event)
9          uiresume(app.UIFigure);
10         app.experimento = 2;
11     end
12
13     % Button pushed function: SeparecenButton
14     function SeparecenButtonPushed(app, event)
15         uiresume(app.UIFigure);
16         app.experimento = 3;
17     end
18
19     % Button pushed function: MuysimilaresButton
20     function MuysimilaresButtonPushed(app, event)
21         uiresume(app.UIFigure);

```

```
22     app.experimento = 4;
23     end
24
25     % Button pushed function: IdenticosButton
26     function IdenticosButtonPushed(app, event)
27         uiresume(app.UIFigure);
28         app.experimento = 5;
29     end
```

Código 10: Gestión de los botones de la interfaz

## Cutaneous Rabbit

La segunda mitad del *Experimento 2* consta de 15 parejas (estímulo visual, estímulo vibrotáctil) diferentes de CR, tal como se comenta en la Subsubsección 3.3.4. Se utiliza un único estímulo vibrotáctil de 470 *ms* de duración que se reproduce y se combina con los 15 estímulos visuales disponibles.

Estímulos visuales:

- 7 *cm* de longitud, de izquierda a derecha, centrado horizontalmente
- 7 *cm* de longitud, de derecha a izquierda, centrado horizontalmente
- 20 *cm* de longitud, de izquierda a derecha, en la mitad izquierda de la pantalla
- 20 *cm* de longitud, de izquierda a derecha, en la mitad derecha de la pantalla
- 40 *cm* de longitud, de izquierda a derecha, centrado horizontalmente

En la lista anterior solo aparecen cinco tipos distintos de movimiento, esto se debe al parámetro de continuidad que al modificarlo se pueden hacer los mismos cinco movimientos pero con un punto visual que salte 6, 10 o 15 veces cada vez. Esto hace un total de 15 movimientos distintos de un punto a saltos.

De nuevo, se le realiza la misma pregunta al participante tras las dos repeticiones de cada pareja de estímulos: “Evalúe el grado de semejanza entre el punto de la pantalla y el movimiento en el mango”. Las opciones disponibles para responder son las mismas que para la *Sensación Fantasma de Movimiento* aunque adicionalmente, si la respuesta del participante es diferente a “Idénticos”, se le realizan dos preguntas más al participante sobre el grado de coherencia de los dos estímulos percibidos de forma simultánea, como se observa en la Figura 39:

- **Pregunta adicional 1:** “¿Dónde ha percibido más saltos, en la mano o en la pantalla?”
  - Mano
  - Ambos igual (respuesta guardada por defecto en caso de que el participante marque previamente la respuesta “Idénticos”)
  - Pantalla
- **Pregunta adicional 2:** “¿Coinciden la dirección y la localización del movimiento con el punto de la pantalla?”

- Sí (respuesta guardada por defecto en caso de que el participante marque previamente la respuesta “Idénticos”)
- No



(a) Pregunta 1



(b) Pregunta 2

Figura 39: Preguntas adicionales del segundo experimento

*Cutaneous Rabbit* es diferente a la *Sensación Fantasma de Movimiento*, por lo que el grado de coherencia entre cada pareja de estímulos se valúa esta vez en base a tres criterios:

- **Localización:** posición (a la izquierda, derecha o en la mano) y longitud (2-3 cm, media pantalla, toda la pantalla o más) del movimiento.
- **Dirección:** de derecha a izquierda o viceversa.
- **Número de saltos:** *Cutaneous Rabbit* es un movimiento a saltos, por lo que es posible percibir más saltos en la interfaz vibrotáctil, en la interfaz gráfica o percibir el mismo número de saltos en ambas.

Respecto a la introducción, mensajes guía intermedios, ecuador del experimento y demás, comentados previamente en la Subsección 3.2 también forman parte de la interfaz correspondiente al segundo experimento, tal como se aprecia en la Figura 40 .

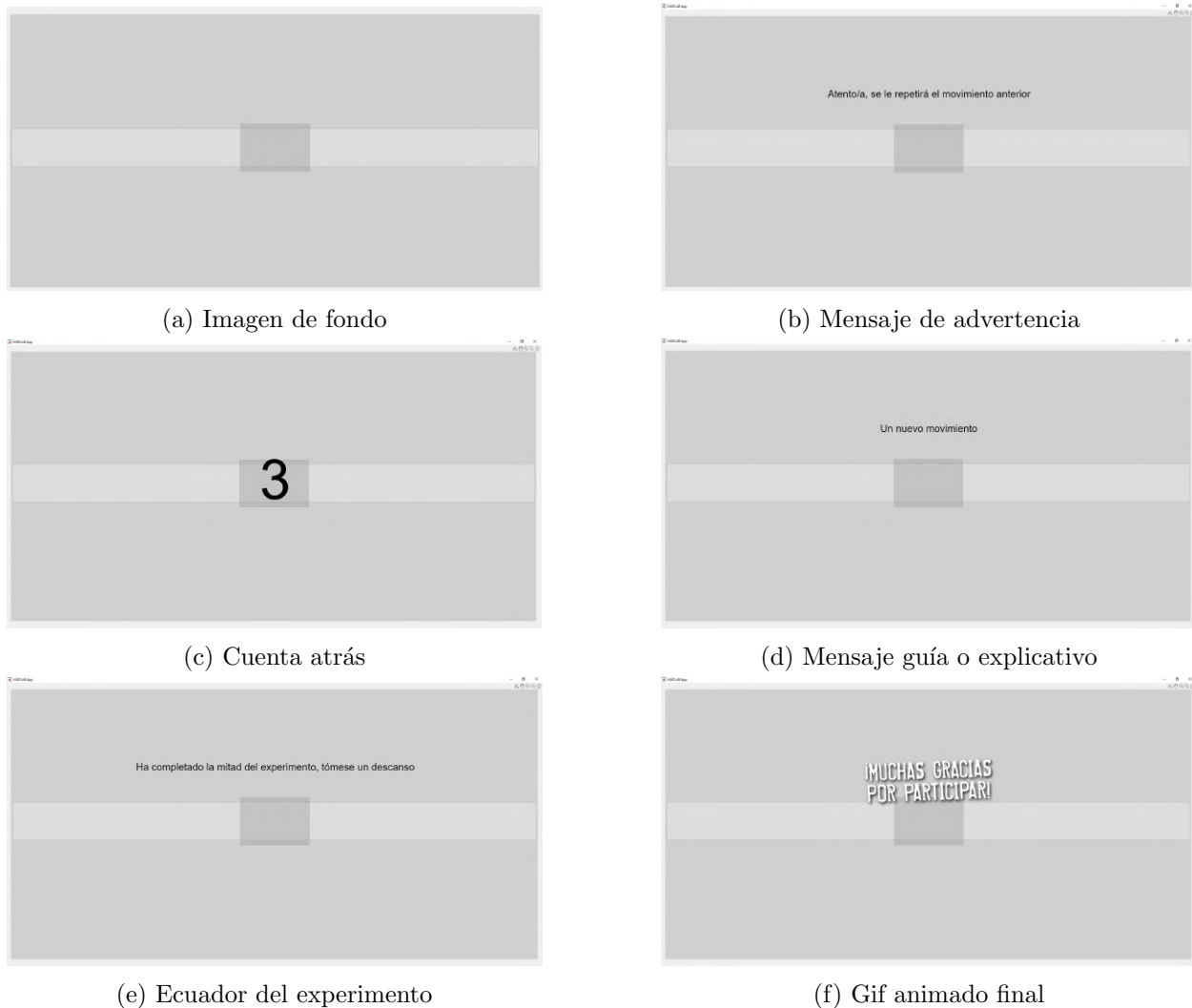


Figura 40: Capturas de la interfaz gráfica del segundo experimento

Por último, la Figura 40f marca el fin del experimento.

### 4.4. Montaje experimental

En el montaje experimental, se procede de manera idéntica para ambos experimentos que componen este Trabajo de Fin de Grado. La disposición experimental se divide en seis aspectos básicos para llevar a cabo los experimentos de manera eficiente y precisa:

- Instalación de los actuadores vibrotáctiles y sus soportes.
- Ubicación del amplificador de audio.
- Colocación de la pantalla táctil y su soporte móvil.

- Conexionado completo del experimento.
- Ubicación de otros componentes imprescindibles: silla del participante, auriculares, formularios a rellenar por los participantes, etc.
- Señalización de la disponibilidad de la sala de experimentos.

En primer lugar, en el *laboratorio 2.3.11* (ver Figura 41a), de las ocho mesas disponibles se seleccionan las dos mesas más cercanas al aire acondicionado. La elección de estas mesas en concreto se realiza considerando la importancia de mantener la temperatura controlada durante los experimentos, con el fin de evitar distracciones o incomodidades en los participantes que puedan afectar a los resultados.



(a) Sala vacía

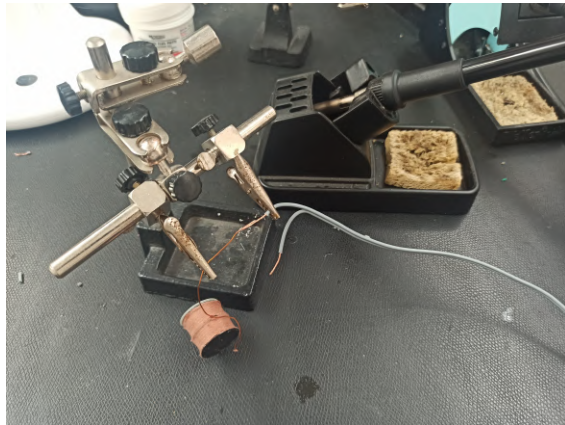


(b) Sala completa

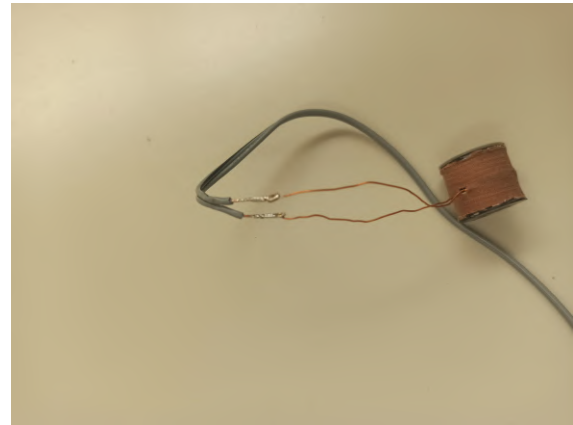
Figura 41: Sala de experimentos

Seguidamente, se preparan los actuadores vibrotáctiles fabricados en la Subsubsección 4.2.1 y sus soportes impresos para ser instalados en su ubicación elegida aunque, previamente, es necesario extender los dos extremos de hilo de cobre de cada actuador. Cada actuador, posee dos terminaciones de unos 5 cm resultantes del bobinado que son las que se han de conectar con el amplificador de audio. Evidentemente, una conexión directa de los dispositivos es inviable porque los actuadores han de estar separados 7 cm y a su vez conectados al amplificador, por lo que se decide extender todos los extremos de hilo de cobre. Se mide la distancia desde la división de las mesas del experimento hasta el extremo lateral de una de ellas donde está ubicado el amplificador de audio, se cortan dos pedazos de cable de audio<sup>13</sup> de unos 3 m de longitud. Posteriormente, se suelda el cable de sonido con el hilo de cobre sobresaliente de los actuadores, utilizando también estaño para asegurar una conexión sólida. El resultado de la soldadura se puede ver en la Figura 42b.

<sup>13</sup>Cable de audio: cable de hilo de cobre trenzado y con envoltura aislante de plástico



(a) Preparación para soldadura



(b) Soldadura

Figura 42: Proceso de soldadura

Cada actuador se fija a su soporte correspondiente haciendo uso de las dos topes fabricados (ver Figura 43a) con los moldes impresos diseñados. Por un lado, la silicona proveniente del molde del Anexo A.5, es atravesada por el cable de audio, encaja a la perfección con la muesca presente en el extremo del tubo e impide que el actuador se deslice hacia el fondo. Por otro lado, la silicona fabricada en el molde del Anexo A.6 se sitúa después del actuador para que este no se salga del soporte. Entonces, los dos conjuntos tope-actuador-tope se introducen en cada soporte vibrotáctil y se ajustan cuidadosamente, tal como se aprecia en la Figura 43. De la parte posterior de cada soporte, sobresalen 3 m de cable de audio porcedentes de los actuadores.



(a) Siliconas de fijación



(b) Soporte sin tope



(c) Soporte con tope

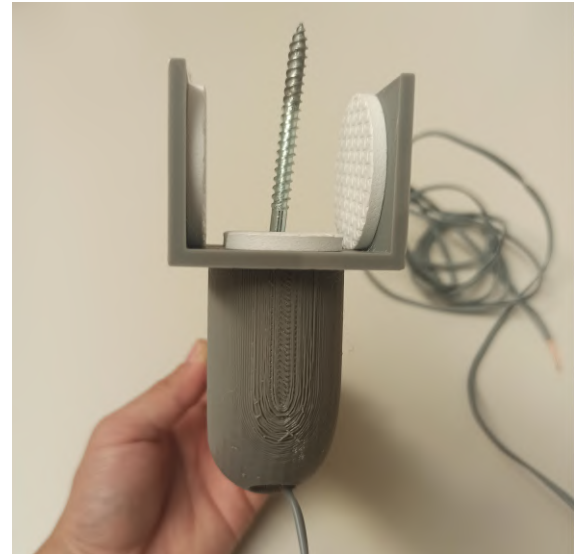
Figura 43: Montaje y conexionado de los soportes vibrotáctiles

Para asegurar una sujeción firme, antes de atornillar el soporte vibrotáctil, se añaden adhesivos acolchados en el área del soporte que encaja con la mesa, evitando cualquier movimiento indeseado durante los experimentos. El resultado se aprecia en la Figura 44. Una vez instalado

todo lo anterior, se usa esparadrapo deportivo para fijar los cables de audio, de forma que se mantengan sujetos a la mesa y se eviten enredos que puedan afectar la experiencia del participante.



(a) Vista frontal



(b) Vista posterior



(c) Vista lateral



(d) Vista superior

Figura 44: Diferentes vistas de una mitad del soporte vibrotáctil

En el lateral izquierdo de una de las mesas, se coloca una silla y sobre ella se ubica el amplificador de audio necesario para el experimento. Los extremos de los cables de audio provenientes de los actuadores se conectan al amplificador como se muestra en la Figura 45b.

Además, se instala un soporte de sujeción para la pantalla táctil que se emplea durante el experimento. La colocación precisa del soporte se debe a la necesidad de situar la pantalla encima de la mesa y alineada con los soportes vibrotáctiles, aunque no apoyada en el centro de las dos mesas para evitar la interferencia de las vibraciones emitidas por ambos dispositivos vibratorios. El uso de un nivel permite asegurar que la pantalla se mantenga en una posición vertical, sin ningún tipo de inclinación.



(a) Soporte vibrotáctil



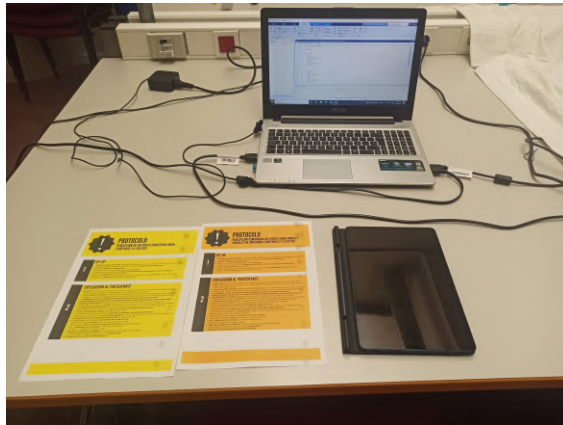
(b) Conexión del amplificador de audio

Figura 45: Montaje y conexión de los soportes vibrotáctiles

El soporte vibrotáctil instalado bajo la mesa, se cubre completamente con una tela para ocultarlo y evitar que los participantes pudieran intuir su longitud. Asimismo, se colocan auriculares junto a la pantalla táctil, los cuales reproducen ruido marrón durante los experimentos para aislar a los participantes del ruido proveniente de los aires acondicionados y del servidor ubicado en la sala de experimentos.

Una vez acomodados los dispositivos constituyentes de los experimentos, se añaden los detalles que finalizan el montaje experimental. En la mesa situada a la derecha de la pantalla táctil, se colocan los documentos necesarios para cada experimento, incluyendo la explicación o resumen de los mismos, los consentimientos informados correspondientes, el cuestionario general y un bolígrafo. Además, en la pizarra de la sala, se esboza un resumen de los dos experimentos para facilitar la explicación a los distintos participantes (ver Figura 46d).

#### 4 IMPLEMENTACIÓN DEL ENTORNO EXPERIMENTAL



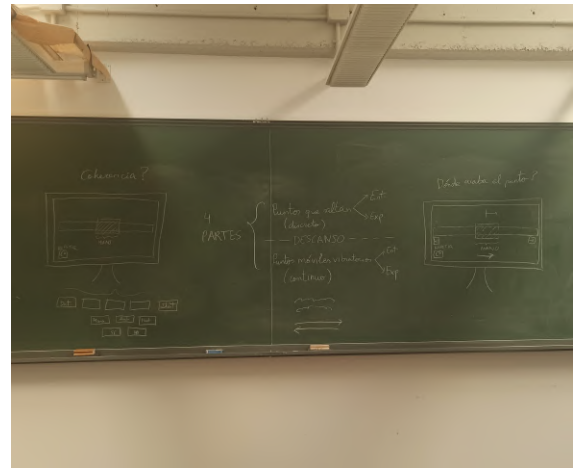
(a) Conexionado completo



(b) Montaje experimental



(c) Documentos impresos



(d) Pizarra con explicaciones

Figura 46: SetUp experimental

Por último, en la puerta se colocan las dos infografías correspondientes a los dos experimentos (ver Anexo D.1) y se habilita un espacio para colgar un cartel informativo cuya finalidad es indicar la disponibilidad de la sala de experimentos. En la Figura 47 se puede observar la presentación de la puerta del experimento con los distintos paneles informativos (ver Anexo D.6). Cabe destacar que junto a la puerta, se dispone una silla de espera para que los participantes que se encuentren la sala ocupada puedan aguardar cómodamente su turno.



(a) Puede pasar



(b) No puede pasar



(c) Vuelvo en unos minutos



(d) Silla de espera

Figura 47: Exterior de la sala de experimentos

## 5. Resultados de la experimentación

Esta sección presenta los resultados de los experimentos realizados con los participantes cuyos valores numéricos se localizan en el Anexo F.1. En primer lugar, se examinan las gráficas que surgen del análisis de los datos de los participantes, destacando tendencias y patrones. Después, se comparan las gráficas resultantes de los dos experimentos buscando una relación entre los datos con y sin retroalimentación visual. Por último, se consideran oportunidades de optimización del diseño experimental y procedimientos, incluyendo posibles limitaciones y estrategias para abordarlas.

### 5.1. Valoración inicial

#### 5.1.1. Experimento 1

En este primer experimento, se lleva a cabo un estudio para explorar la detección de un punto ilusorio en movimiento en una interfaz vibrotáctil que se sujeta con la mano dominante. Los participantes interactúan con una interfaz gráfica (pantalla táctil) que contiene una representación gráfica de la zona de agarre de la mano y el eje en el que el punto se mueve. Tocando la pantalla táctil en el punto donde se estima que termina el movimiento vibratorio del punto, los participantes aportan unas coordenadas. A partir de las coordenadas registradas, se realizan análisis estadísticos para comprender mejor los resultados que se obtienen.

En primer lugar, se evalúa si los datos recopilados presentan una distribución normal o no, para poder escoger los métodos estadísticos adecuados. Con esta finalidad, se aplica la función *qqplot()*<sup>14</sup> de MATLAB y el test de *Shapiro-Wilk* a cada columna de datos correspondiente a diferentes duraciones de *Sensaciones Fantasma de Movimiento* (0,25 s, 0,5 s, 1 s, 1,5 s, 2 s, 2,5 s, 3 s) y de ilusiones *Cutaneous Rabbit* ((380 ms, 560 ms, 1 s, 740 ms). Tanto el test Shapiro-Wilks<sup>15</sup> como la función *qqplot()* tienen la misma finalidad, la prueba Shapiro-Wilks proporciona un valor numérico del tipo de distribución que presenta la muestra (“0” distribución normal, “1” distribución no normal), mientras que la función *qqplot()* ofrece un resultado gráfico (si los datos se agrupan entorno a la línea recta que respresenta una distribución normal, la distribución es normal). En la Figura 58 se observa que la mayoría de las columnas de datos correspondientes a *Sensaciones Fantasma de Movimiento* presentan una distribución no normal, al igual que ocurre con las columnas de datos de la ilusión *Cutaneous Rabbit* (ver Figura 59). Dado este hallazgo, en lugar de utilizar la función *boxplot()* de MATLAB, que está diseñada para datos con distribución normal, se emplea la función *boxchart()*, específica para datos con distribución no normal.

Se generan dos gráficas de tipo *chartbox()* para visualizar los resultados. En la primera gráfica (ver Figura 48), se superponen las experiencias de movimientos de izquierda a derecha y de derecha a izquierda para cada duración diferente. Se ha tomado el valor absoluto de los datos porque toda pulsación en la mitad izquierda de la interfaz gráfica, registra un valor negativo en coordenadas tal como se explica en la Subsección 4.3. Las cajas de bigotes, que representan la distribución de los datos, son equivalentes para movimientos izquierda-derecha y derecha-izquierda,

---

<sup>14</sup> *qqplot()*: es una gráfica cuantil-cuantil de los cuantiles de los datos de muestra de x frente a los valores cuantílicos teóricos de una distribución normal

<sup>15</sup> Shapiro-Wilks: es un test o una prueba que se usa para contrastar la normalidad de un conjunto de datos, para ello plantea como hipótesis nula que una muestra proviene de una población con distribución normal

tanto para las experiencias SFM como las ilusiones CR. De este análisis se deduce que la dirección del movimiento no influye significativamente en la percepción del punto final del movimiento en la interfaz vibrotáctil.

Además, para la correcta comprensión de los resultados, se de tomar en consideración que cualquier valor de las gráficas que supere los 3,5 cm implica que los participantes perciben la finalización del movimiento del punto ilusorio fuera de la mano.

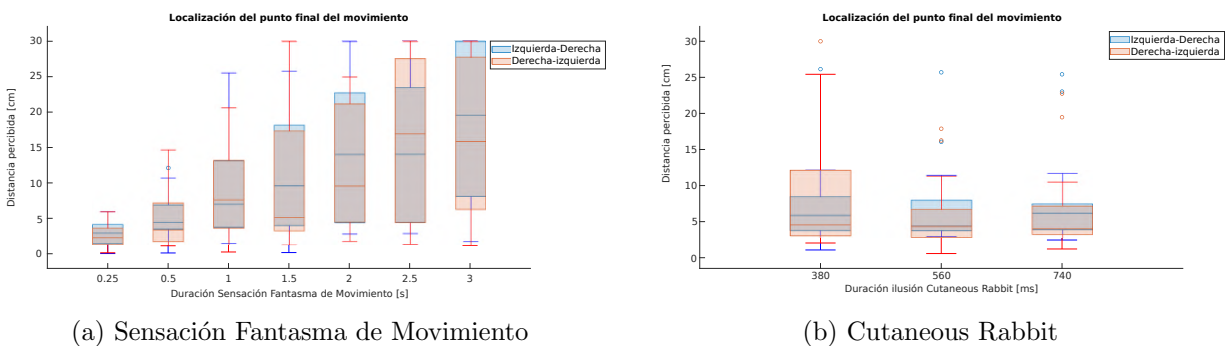


Figura 48: Influencia de la dirección en la localización del punto final del movimiento para las experiencias SFM (Figura 48a) y las experiencias CR (Figura 48b)

En la segunda gráfica (ver Figura 49), se agrupan los movimientos de izquierda a derecha y de derecha a izquierda. En la Figura 49a correspondiente a SFM, se observa una tendencia interesante: a medida que aumenta la duración de la *Sensación Fantasma de Movimiento*, se percibe que el punto final del movimiento se encuentra a mayor distancia del centro de la interfaz vibrotáctil. Este descubrimiento refuerza la relación existente entre la duración de la vibración y la percepción de la distancia recorrida, evidenciándola de una forma más clara que en el artículo [1], ya que se cubren las limitaciones de este. Asimismo, se encuentra que al incrementar la duración de la SFM también aumenta la dispersión de los datos, por lo que se demuestra que la tendencia de los participantes es percibir la finalización del movimiento vibratorio cada vez más lejos de su mano pero un porcentaje significativo de personas siguen percibiendo el final del movimiento en la mano o muy próxima a ella. Por otro lado, en la Figura 49b relativa a la ilusión CR, no se encuentra una relación entre la duración de la ilusión y la distancia recorrida por el punto saltador, ni tampoco hay relación entre la dispersión de los datos y la duración del movimiento vibratorio. De este modo, las ilusiones *Cutaneous Rabbit* parecen no depender de la duración del estímulo según los resultados obtenidos.

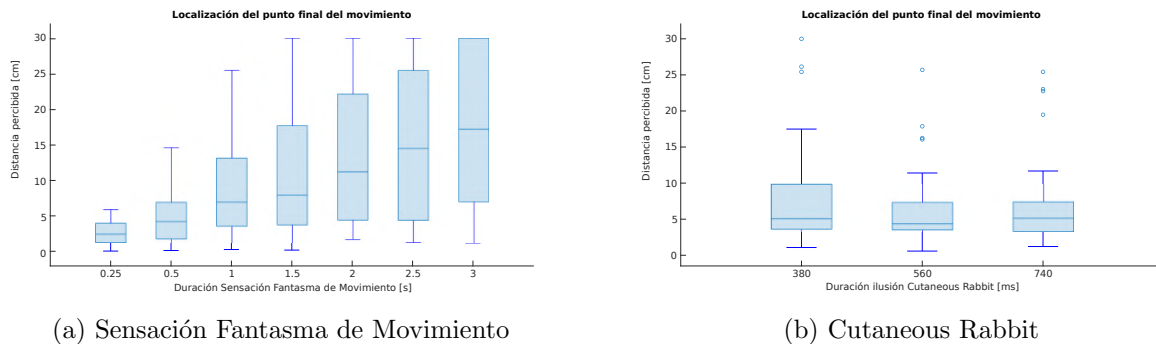


Figura 49: Distribución del valor absoluto de la localización del punto final del movimiento para las experiencias SFM (Figura 49a) y las experiencias CR (Figura 49b)

Los actuadores de la interfaz vibrotáctil están separados  $7\text{ cm}$ , lo que implica que se encuentran a una distancia de  $3,5\text{ cm}$  respecto al centro del soporte vibrotáctil. Por ello, que los participantes reporten que el punto de finalización del movimiento ilusorio tiene lugar a unos  $3,5\text{ cm}$  respecto al centro de su mano, es literalmente lo que ocurre en todas las experiencias. No obstante, analizando en detalle la Figura 49a, se obtiene que prácticamente el 75 % de los participantes perciben que el punto final del movimiento vibratorio se encuentra dentro de su mano para el caso de experiencias de  $0,25\text{ s}$  de duración. Conforme aumenta la duración de la *Sensación Fantasma de Movimiento*, se incrementa el porcentaje de participantes que perciben el punto final de la vibración fuera de su mano, hasta llegar a que más del 75 % de los participantes perciben el final del movimiento lejos de su mano tras experimentar las experiencias de  $2\text{ s}$ ,  $2,5\text{ s}$  y/o  $3\text{ s}$ .

### 5.1.2. Experimento 2

En este experimento, se realiza un estudio en el que los participantes interactúan con una interfaz mediante la pulsación de botones. En la pantalla, se presenta un punto rojo que se desplazaba de izquierda a derecha o de derecha a izquierda, en sincronía con un movimiento ilusorio vibrotáctil en la interfaz que los participantes sujetan. Como se explica en la Subsubsección 4.3.2, cada par de movimientos genera entre una y tres preguntas específicas, cuyas respuestas numéricas se registran para realizar análisis estadísticos posteriores.

Al igual que en el *Experimento 1*, se aplica la función `qqplot()` de MATLAB y el test de Shapiro-Wilks a cada columna de datos de las distintas experiencias de *Sensaciones Fantasma de Movimiento* e ilusiones *Cutaneous Rabbit*. De nuevo, se encuentra que la mayoría de las columnas de datos no siguen una distribución normal (ver Figura 60 y Figura 61). Sin embargo, debido a que en este caso los datos son discretos y están acotados, se opta por utilizar gráficos de barras en lugar de la función `boxchart()` que se utiliza previamente. Con esta finalidad, se emplean las funciones `bar()` e `histgram()` de MATLAB.

En total, se generan trece gráficas para presentar los resultados de las dos partes del experimento. Nueve de estas gráficas se crean utilizando la función `histgram()`. Las otras cuatro gráficas estadísticas se crean utilizando la función `bar()`, estas representan las distintas experiencias en el eje  $X$  y se apilan las respuestas según su frecuencia en el eje  $Y$ .

### Experiencias SFM

La Figura 50 proporciona una visión general de la distribución de respuestas para las experiencias de *Sensación Fantasma de Movimiento*. Para realizar esta gráfica, se han incluido todos las respuestas de todos los participantes para las dieciocho experiencias de las que consta esta primera mitad del segundo experimento. En total, los 21 voluntarios proporcionan 378 respuestas de las cuales:

- El 56 % son respuestas que indican que el movimiento visual de la interfaz gráfica y el movimiento ilusorio de la interfaz gráfica son “Idénticos”.
- El 30 % de las respuestas muestran un grado de similitud elevado entre los movimientos visual y táctil del experimento.
- El 8 % son respuestas “Se parecen”, es decir, para los participantes que marcan esta respuesta, los movimientos visual y táctil en sincronía son similares.
- El 6 % de las respuestas indican que el movimiento ilusorio de la interfaz vibrotáctil y el movimiento visual de la interfaz gráfica, no se parecen o, incluso, son totalmente opuestos.

De este breve análisis se aprecia que la vista no solo puede influir sobre el sentido del tacto, sino que es predominante a este último. De las 18 experiencias SFM de este experimento, solo una de ellas ( 7 cm, centrada, de izquierda a derecha) se corresponde legítimamente con la calificación “Idénticos”. Es decir, menos del 6 % de las respuestas son realmente “Idénticas”, por lo que al conseguir un porcentaje del 48 % se demuestra que se puede manipular el cerebro humano con el sentido de la vista.

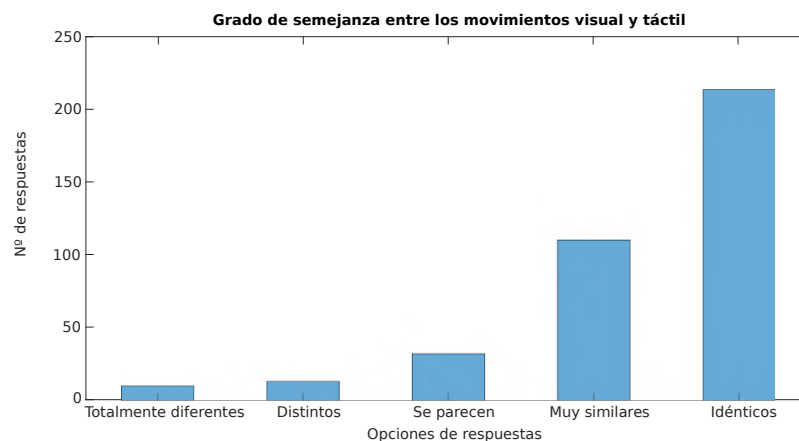


Figura 50: SFM - Recuento de las 378 respuestas de los participantes sobre el grado de semejanza entre los movimientos visual y táctil

Para ahondar en los datos relativos relativos a las SFM del segundo experimento, se decide agrupar las diferentes experiencias según su duración (0,5 s, 1 s, 2,5 s) y se ordenan según la longitud y dirección de los movimientos ilusorios. Con esta finalidad, se realizan tres gráficas estadísticas utilizando la función *bar()* de MATLAB, la cual permite apilar respuestas según su frecuencia para

## 5 RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

las diferentes experiencias. Entonces, en la Figura 51, se observa la tendencia de que a medida que aumenta la duración de los movimientos visuales y vibrotáctiles en sincronía, los participantes perciben una mayor similitud entre ellos.

Según la Figura 51a, para las *Sensaciones Fantasma de Movimiento* de 0,5 s de duración, el 84% de los participantes perciben que el movimiento vibratorio finaliza fuera de su mano. Para las experiencias de 1 s de duración (ver Figura 51b), el 87% de los participantes perciben el final del movimiento lejos de su mano, mientras que para las experiencias de 2,5 s de duración (ver Figura 51c), ese mismo porcentaje es de 86%. Además, se ha obtenido que entre el 71% y el 86% de los participantes percibe el movimiento vibratorio fuera del objeto vibrotáctil, pues reportan que el grado de coherencia entre la vibración que perciben en su mano y el movimiento de 40 cm que ven en la interfaz gráfica es “Muy similares” o “Idénticos”.

No obstante, a pesar del elevado porcentaje de personas que percibe movimiento fuera de su mano en la interfaz vibrotáctil, la experiencia de 3,5 cm longitud y dirección izquierda-derecha parece ser la que más se asemeja al movimiento visual que se muestra en la interfaz gráfica, pues la experiencia que más calificaciones “Idénticos” recibe.

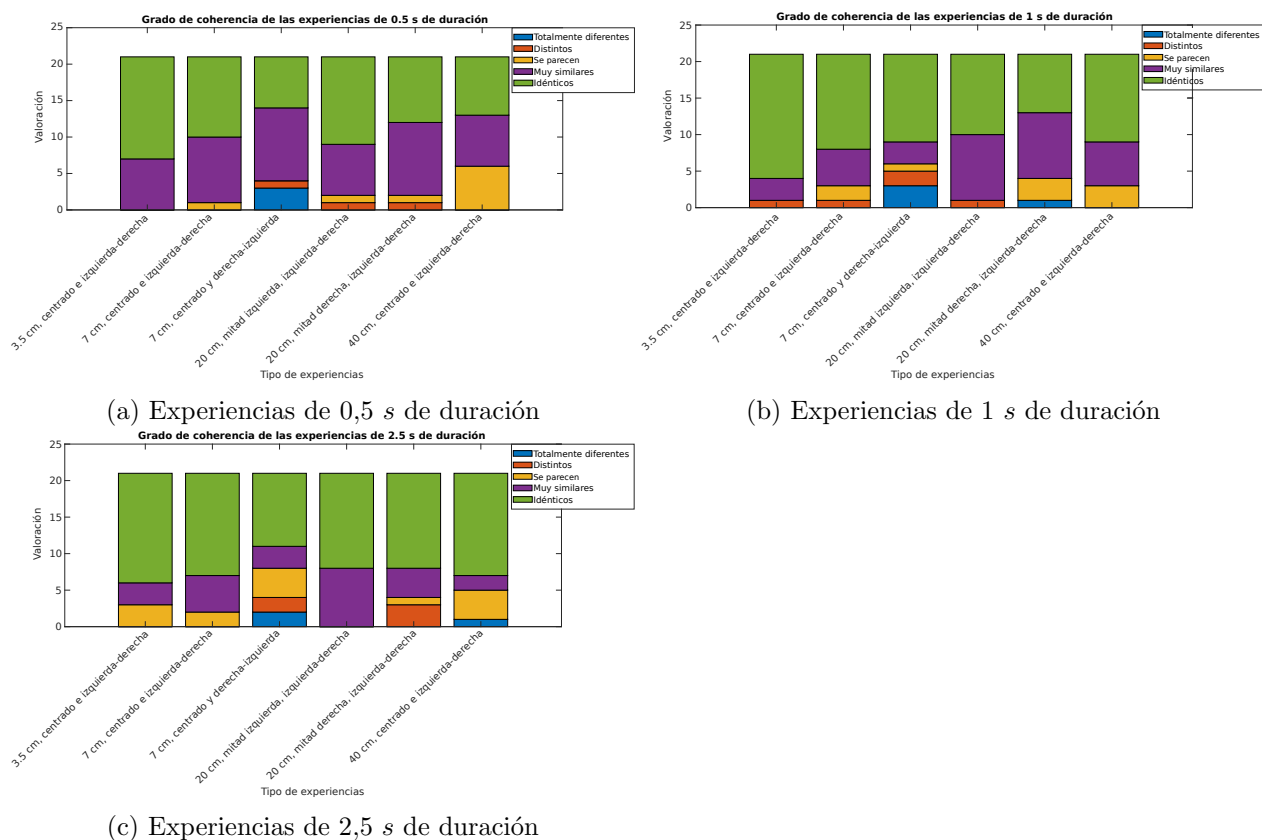


Figura 51: Valoración del grado de coherencia de las experiencias SFM

### Experiencias CR

De la misma manera que se analizan los datos relativos a *Sensaciones Fantasma de Movi-*

miento, se estudian los datos de las ilusiones *Cutaneous Rabbit*. La Figura 55 proporciona también una visión global de la distribución de respuestas para las experiencias CR. Para realizar esta gráfica, esta vez se incluyen las 315 respuestas proporcionadas por los 21 participantes que realizan las quince experiencias que conforman la segunda mitad del experimento. Se obtienen los siguientes porcentajes:

- El 54 % son respuestas que califican el grado de semejanza entre el movimiento visual de la interfaz gráfica y el movimiento ilusorio de la interfaz gráfica como “Idénticos”.
- El 29 % de las respuestas indican que los movimientos visual y táctil en sincronía son “Muy similares”.
- El 12 % son respuestas calificadas como “Se parecen”.
- El 5 % de las respuestas indican que el movimiento ilusorio que se percibe en la interfaz vibrotáctil y el movimiento visual que se observa, no son coherentes.

Entonces, se evidencia que la vista influye sobre el sentido del tacto y que es predominante a este. De las 15 experiencias CR de este segundo experimento, solo una de ellas ( *10 puntos, 7 cm, centrado, izquierda-derecha*) es realmente calificable como “Idénticos”. En otras palabras, menos del 7% de las respuestas son realmente “Idénticas”, por lo que al conseguir un porcentaje del 54% se afianzan los resultados que se obtienen de las *Sensaciones Fantasma de Movimeinto*, demostrándose la posibilidad de la alterar la percepción táctil con el sentido de la vista.

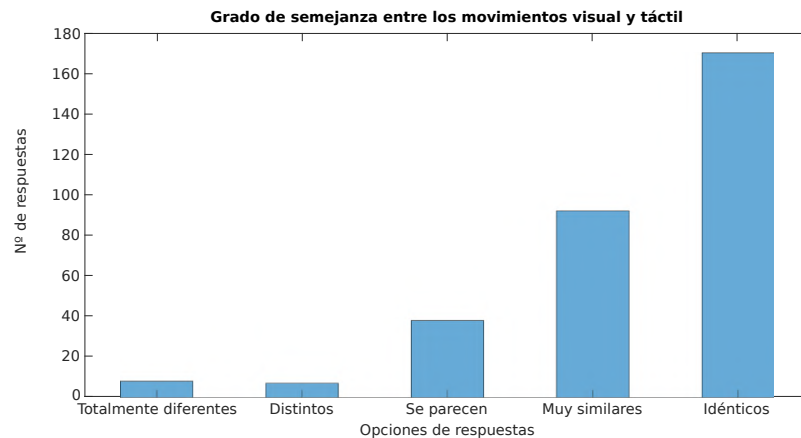


Figura 52: CR - Recuento de las 315 respuestas de los participantes sobre el grado de semejanza entre los movimientos visual y táctil

La Figura 53 se centra en las respuestas a las preguntas adicionales relacionadas con las ilusiones *Cutaneous Rabbit*. Estas preguntas, como se explica previamente en la Subsubsección 4.3.2, abordan si el número de saltos en la pantalla y en la mano coinciden y si la dirección y la localización del movimiento son consistentes. Las respuestas sugieren que en la mayoría de los casos hay coincidencia tanto en el número de saltos como en la dirección y localización del movimiento.

En la Figura 53a, se aprecia que en el 79 % de las respuestas se indica que se perciben el mismo número de saltos en la interfaz vibrotáctil y visualmente en la interfaz gráfica. Este

porcentaje es bastante elevado, ya que únicamente en el 33% de las experiencias *CR*, aquellas con 10 saltos, coinciden realmente el número de saltos vistos con los percibidos en la mano. Asimismo, en la Figura 53b se obtiene que el 93% de las respuestas de los participantes reportan que la dirección y localización del movimiento vibratorio ilusorio coincide con el movimiento del punto rojo de la interfaz gráfica, mientras que el porcentaje real de movimientos coincidentes es tan solo del 7%.

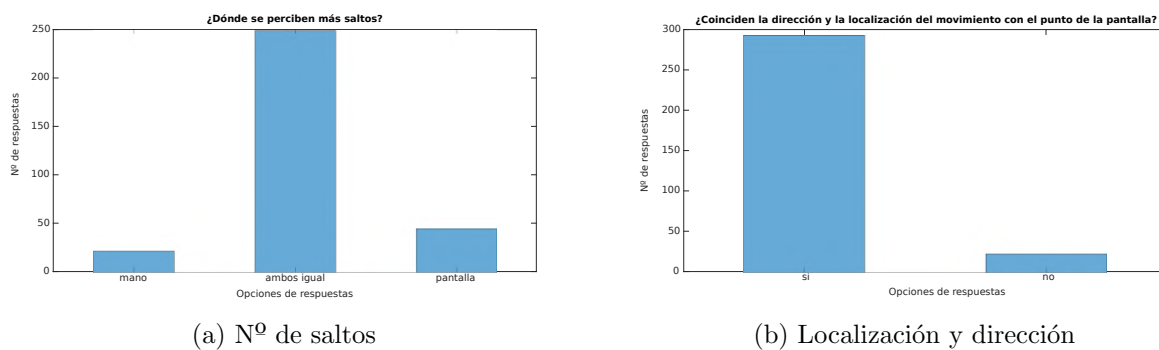


Figura 53: Recuento de las respuestas a las preguntas adicionales

Asimismo, las siguientes cinco gráficas recogidas en la Figura 54, exploran la relación entre las tres preguntas del experimento: grado de semejanza entre los movimientos táctiles y visuales, dónde se perciben más saltos (en la interfaz gráfica o en la interfaz vibrotáctil) y si coinciden la dirección y la localización de los movimientos. Aparentemente, los resultados revelan que cuando los movimientos en sincronía no son similares, la falta de semejanza se debe principalmente a la dirección y la localización. Por otro lado, cuando los movimientos son idénticos o muy similares, la dirección, la localización y el número de saltos prácticamente coinciden siempre.

## 5 RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

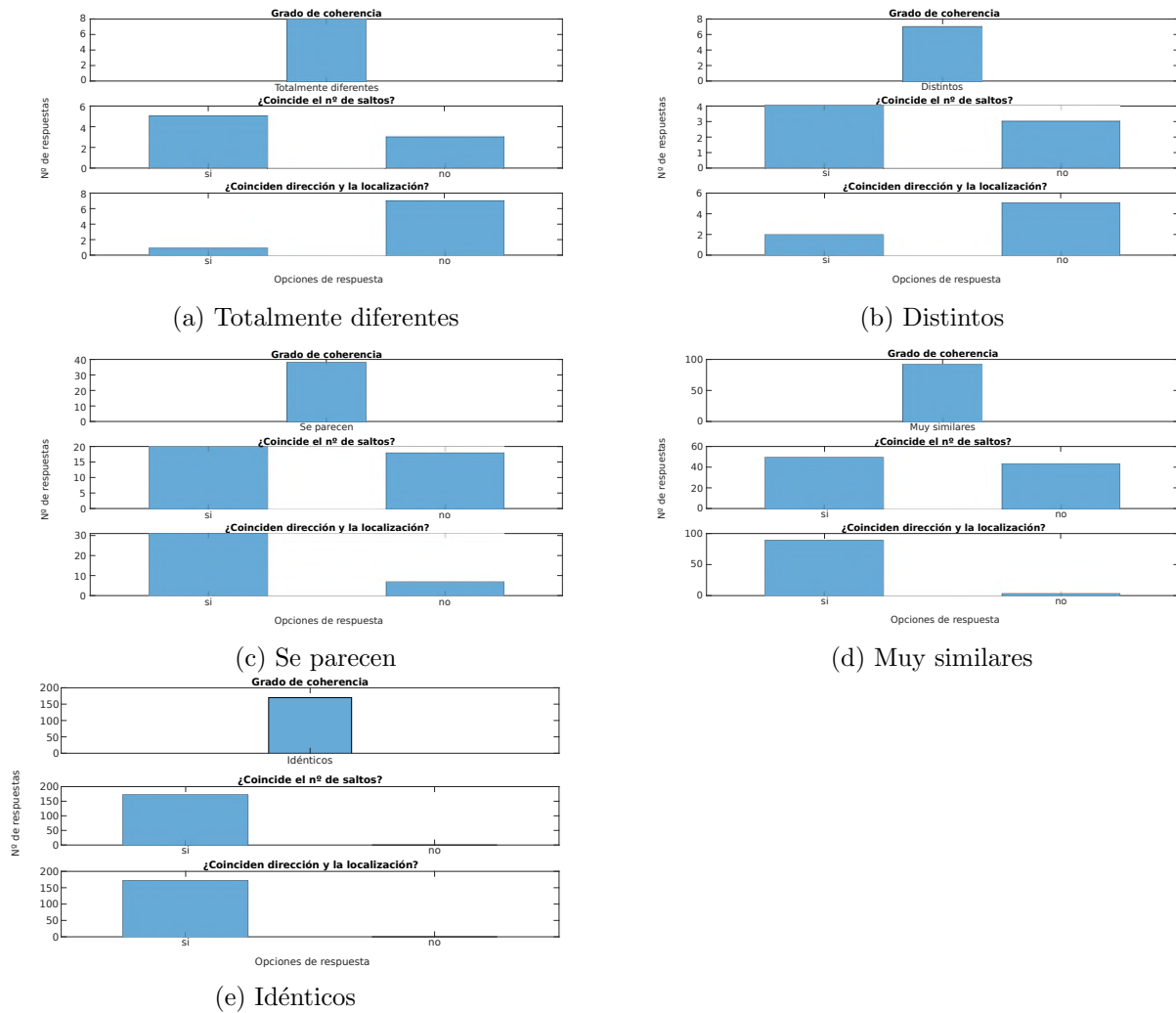


Figura 54: Respuestas de las preguntas adicionales según el grado de coherencia de las experiencias CR del segundo experimento

Seguidamente, se profundiza en los datos recopilados de las experiencias CR del segundo experimento. Al igual que con las experiencias SFM, se emplea la función *bar()* para poder apilar las respuestas en el *eje Y* según su frecuencia, para las diferentes experiencias ordenadas en el *eje X*. En la Figura 55, se aprecia que el movimiento vibrotáctil ilusorio más coherente con el movimiento visual de la interfaz gráfica, es la experiencias *10 puntos, 7 cm, centrado, izquierda-derecha*, que resulta ser también la única experiencia CR a la que le corresponde legítimamente la calificación en grado de semejanza “Idénticos”. A diferencia de las experiencias SFM, en las experiencias CR que se incluyen en este experimento, no se puede obtener ninguna relación distancia-tiempo porque la duración de todas las experiencias es de *470 ms*. Además, no se aprecia ninguna otra relación entre los parámetros que se alteran entre las experiencias CR, aunque se destaca que algunos participantes (un porcentaje inferior al 10%) no han visto alterada su percepción táctil al percibir un estímulo visual totalmente contradictorio. Las experiencias en las cuales se contradice la dirección del movimiento vibratorio ilusorio y el visual son aquellas que en la Figura 55 son de derecha a izquierda.

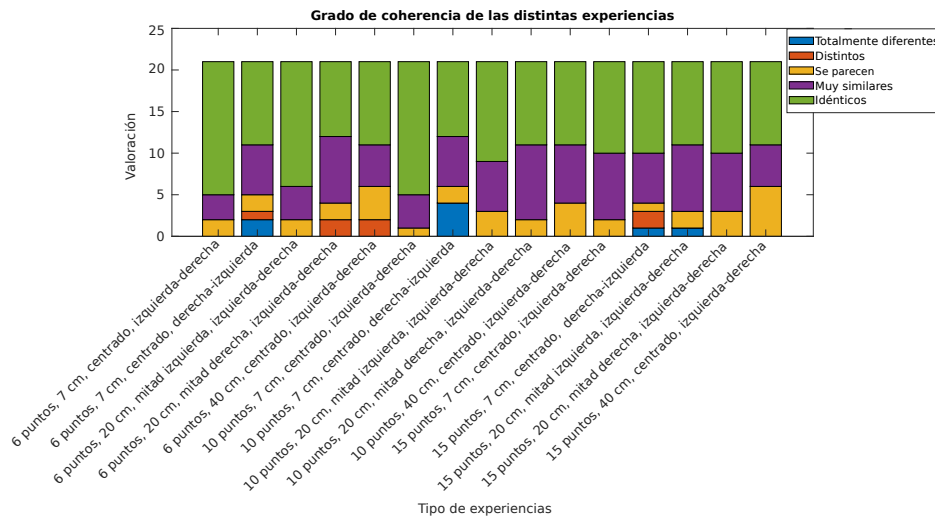


Figura 55: Valoración del grado de coherencia de las experiencias CR

## 5.2. Posibles mejoras

A continuación se presentan mejoras implementables a los experimentos con la finalidad de enriquecer los resultados, dichas mejoras se centran en la optimización del escenario experimental y en la captura de datos.

Respecto al diseño experimental es viable mejorarlo. El soporte vibrotáctil que se emplea está dividido en dos y colocado debajo de dos mesas, por lo que cualquier movimiento de las mismas afecta a la posición del soporte. Para solucionar este problema, se plantea que se puede diseñar una estructura similar a una mesa, que sea posible su inmovilización al suelo, de manera que ningún movimiento en la estructura perturbe la posición de los soportes vibrotáctiles. Asimismo, usar una tela de mayor longitud para ocultar el hardware del experimento puede ser beneficioso a la hora de evitar posibles sugerencias de los participantes.

Por último, emplear una muestra mayor de personas puede confirmar los resultados y facilitar el análisis estadístico de los datos, que en este estudio, provienen de una muestra variada de 42 participantes de edades comprendidas entre los 18 y los 68 años.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

## 6. Conclusiones y líneas de investigación futuras

Esta sección aborda de forma directa los resultados de la fase de experimentación, cuyo análisis se exhaustivo se realiza en Sección 5, incluye valores numéricos y las conclusiones finales de este Trabajo Fin de Grado. Además, la sección incluye un breve subapartado en el que se destacan algunas de las muchísimas líneas de investigación posibles derivadas de este estudio.

### 6.1. Conclusiones

En primer lugar, los resultados del *Experimento 1* indican que la dirección del movimiento vibratorio no es un factor determinante en la percepción del punto final del mismo. Además, para las experiencias SFM, se observa una tendencia en la que la duración de la *Sensación Fantasma de Movimiento* influye en la percepción de la distancia final recorrida, a mayor duración del movimiento vibratorio ilusorio, mayor es la distancia recorrida percibida. Asimismo, se descubre otra relación interesante entre la duración de la SFM y la dispersión de los datos, ya que al incrementar la duración de las experiencias se incrementa la dispersión. Esto último sugiere que un porcentaje significativo de personas perciben la finalización del estímulo lejos de la mano, mientras que algunas personas no son sensibles a la ilusión y sólo perciben el movimiento donde realmente ocurre (en los bordes de la mano). En la Subsubsección 5.1.1, se obtiene que conforme aumenta la duración de la *Sensación Fantasma de Movimiento*, se incrementa el porcentaje de participantes que perciben el punto de finalización del movimiento ilusorio fuera de su mano, desde el 25 % de los participantes para el caso de experiencias de 0,25 s de duración hasta más del 75 % de los participantes con las experiencias de más de 2 s de duración (ver Figura 49a). Estos hallazgos proporcionan información valiosa para comprender cómo los aspectos temporales afectan a la percepción táctil de SFM en este contexto experimental, al mismo tiempo que se verifican los resultados obtenidos en el estudio en el que se basa este experimento [1].

Respecto a las ilusiones *Cutaneous Rabbit*, la duración del estímulo vibrotáctil no influye ni en la dispersión de los datos, ni en la distancia recorrida por el punto vibratorio ilusorio móvil. Así pues, los aspectos temporales no afectan a la percepción táctil de ilusiones CR.

En segundo lugar, los resultados del *Experimento 2* resaltan que la retroalimentación visual es la predominante en la percepción de estímulos y es la mayor responsable en modular la percepción que interpreta el sistema nervioso. De hecho, en la Figura 51c, se aprecia que para el mismo estímulo vibrotáctil (*SFM de 2,5 s de duración y 7 cm de distancia real entre actuadores*) prácticamente se obtiene el mismo número de valoraciones “Idénticos” para dos estímulos completamente opuestos (los estímulos de 3,5 cm y 40 cm de longitud, respectivamente). Igualmente, en la Figura 55 relativa a las ilusiones *Cutaneous Rabbit*, se observa que un único estímulo vibrotáctil de 470 ms de duración proporciona principalmente valoraciones “Idénticos”, independientemente del estímulo visual con el que se combine en sincronía. Esto se traduce en que el sistema nervioso humano, en la integración visual de los modos visual y táctil, el visual es el predominante.

De este modo, en este TFG se demuestra que al incluir retroalimentación visual, es posible aumentar el porcentaje de personas que perciben un estímulo vibratorio fuera de los límites de la mano. Sin retroalimentación visual, se obtiene que para las SFM de 0,5s, 1 s y 2,5 s (ver Figura 49a), las medianas de los datos son 4,31 cm, 7,023 cm y 14,57 cm de longitud medidos desde el centro

de la mano. No obstante, al añadir la retroalimentación visual a esas mismas experiencias (ver Figura 51), un porcentaje superior al 75 % de los participantes reportan que la localización del punto final del movimiento se encuentra situada a 20 cm respecto al centro de la mano.

En resumen, no solo se verifican parte de las hipótesis propuestas en la Sección 3 sino que se realizan hallazgos adicionales en el campo de la retroalimentación háptica:

- **Hipótesis 1.** *La distancia percibida recorrida por un punto ilusorio táctil puede modificarse variando la duración del estímulo vibrotáctil, incluso provocando que el punto ilusorio se perciba fuera de la mano (espacio real entre actuadores).*
  - SE VERIFICA para las *Sensaciones Fantasma de Movimiento*, como se observa en la Figura 49a.
  - NO SE VERIFICA para las ilusiones *Cutaneous Rabbit*, como se refleja en la Figura 49b.

VERIFICADA para las *Sensaciones Fantasma de Movimiento*.

- **Hipótesis 2.** *La distancia percibida recorrida por un punto ilusorio táctil puede modificarse variando la distancia recorrida por un punto visual que se mueve en sincronía, incluso provocando que el punto ilusorio táctil se perciba fuera de la mano (siendo el espacio real entre actuadores de 7 cm).*
  - SE VERIFICA para las *Sensaciones Fantasma de Movimiento*, como se aprecia en la Figura 51a, la Figura 51b y la Figura 51c.
  - SE VERIFICA para las ilusiones *Cutaneous Rabbit*, como se muestra en la Figura 55.
- **Hallazgo 1.** La dirección de la ilusión táctil de movimiento es indiferente en la percepción del punto de finalización del movimiento ilusorio (ver Figura 48a y Figura 48b). En [1] se verifica que la duración de las ilusiones no afectan en la discriminación de la dirección. Contrastando datos, se evidencia que el factor dirección no es relevante en el desarrollo de interfaces hápticas.
- **Hallazgo 2.** Al aumentar la duración de los estímulos vibrotáctiles, aumenta la dispersión de los datos. Esto implica que ciertas personas siempre perciben el movimiento ilusorio en la mano, independientemente de la duración de los estímulos (ver Figura 49a y Figura 49b).
- **Hallazgo 3.** Las ilusiones *Cutaneous Rabbit* no son óptimas para recrear una ilusión de movimiento lejos del dispositivo que las reproduce (ver Figura 49b).
- **Hallazgo 4.** El sentido de la vista predomina sobre sentido del tacto, como se deduce en la Subsubsección 5.1.2. Esto último tiene implicaciones interesantes, pues una interfaz vibrotáctil simple que use una señal SFM sencilla y fija, puede ser capaz de generar prácticamente cualquier sensación de movimiento que se desee, siempre y cuando se muestre en sincronía con un estímulo visual adecuado. Es decir, en el diseño de interfaces hápticas, priorizar los estímulos visuales frente a los táctiles, propicia resultados más inmersivos y realistas.

Sin embargo, el *Hallazgo 4* conlleva una desventaja. Las interfaces hápticas de asistencia para personas con discapacidad visual no se pueden beneficiar de este hallazgo, pero se pueden explorar nuevas opciones como la retroalimentación auditiva en sincronía con la táctil.



## 6.2. Líneas de investigación futuras

El estudio desarrollado en este TFG proporciona una base sólida para futuras investigaciones en el campo de las ilusiones táctiles y su relación con la retroalimentación visual. Algunas posibles direcciones para investigaciones futuras pueden incluir:

- **Estudio de variables adicionales.** Explorar la influencia de otros factores como la frecuencia de las señales o una mayor variación espacial de los estímulos.
- **Diseño de nuevos experimentos.** Desarrollar experimentos que utilicen otras ilusiones táctiles o más variaciones en la retroalimentación visual, para poder profundizar en la comprensión de cómo se relacionan los sentidos del tacto y la vista en diferentes contextos. Asimismo, se pueden explorar nuevas opciones de retroalimentación, como puede ser la retroalimentación auditiva sobre la percepción táctil.
- **Estudio de poblaciones específicas.** Investigar las ilusiones táctiles y la retroalimentación visual en personas mayores, en pacientes con trastornos neurológicos o personas con discapacidades sensoriales, con el fin de comprender mejor las aplicaciones clínicas y terapéuticas.
- **Desarrollo de aplicaciones prácticas.** Explorar la aplicación de las conclusiones obtenidas en este estudio en la creación de interfaces hápticas avanzadas para la rehabilitación, la formación médica, el entretenimiento y otros campos relacionados.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

## Anexos

### A. Planos de producción

Este primer anexo contiene los planos de producción de todos los componentes que se diseñan e imprimen posteriormente. Estas piezas se utilizan tanto como estructuras, así como moldes de fabricación para otros componentes.

El actuador y su respectivo soporte se consideran componentes constituyentes del experimento, mientras que los recipientes de fabricación de los amortiguadores de silicona y los dos recipientes para la fabricación de los elementos de fijación de los actuadores se emplean para fabricar otros elementos, es decir, actúan como moldes.

#### A.1. Actuador (versión uno)

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

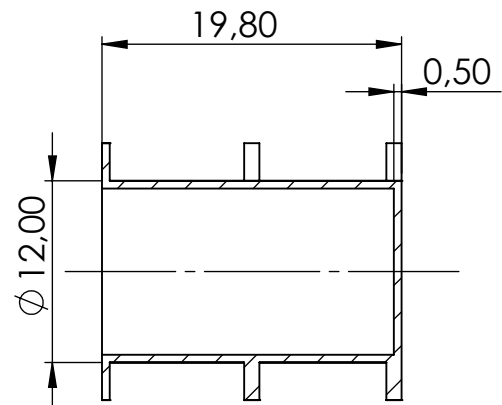
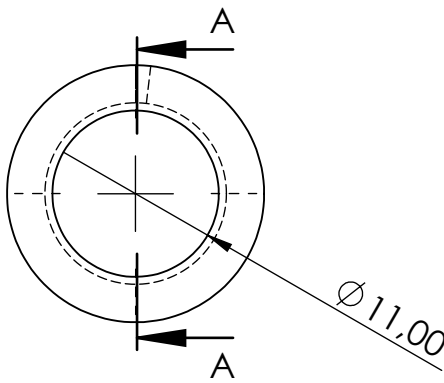
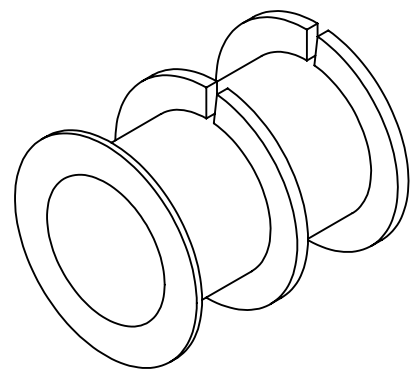
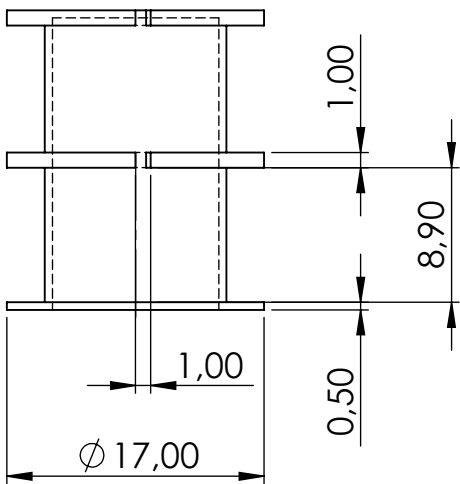
C

B

B

A

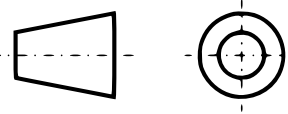
A



SECCIÓN A-A

**Nombre de la pieza:**

Esqueleto actuador vibrotáctil (versión uno)



**Diseñado por:**

Irene Guijarro Molina

**Escala:**

2:1

**Fecha:**

03/08/2023

**Material:**

Termoplástico PLA

**Hoja:**

1

**Formato de hoja:**

A4

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

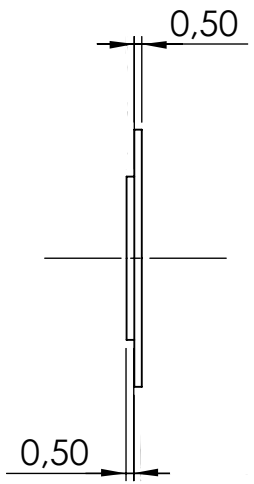
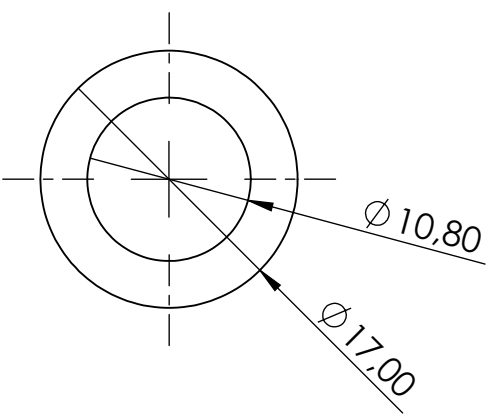
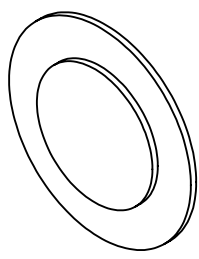
C

B

B

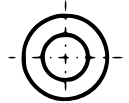
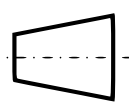
A

A



**Nombre de la pieza:**

Esqueleto actuador vibrotáctil (versión uno)



**Diseñado por:**

Irene Guijarro Molina

**Escala:**

2:1

**Fecha:**

03/08/2023

**Material:**

Termoplástico PLA

**Hoja:**

2

**Formato de hoja:**

A4

4 3 2 1

**A.2. Actuador (versión definitiva)**

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

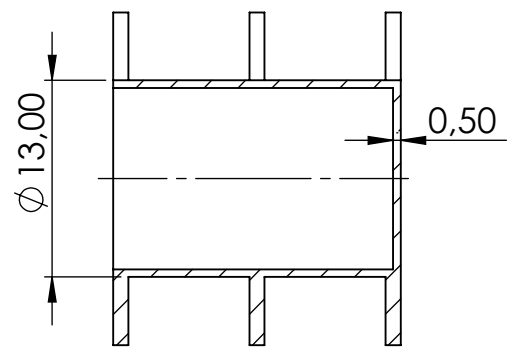
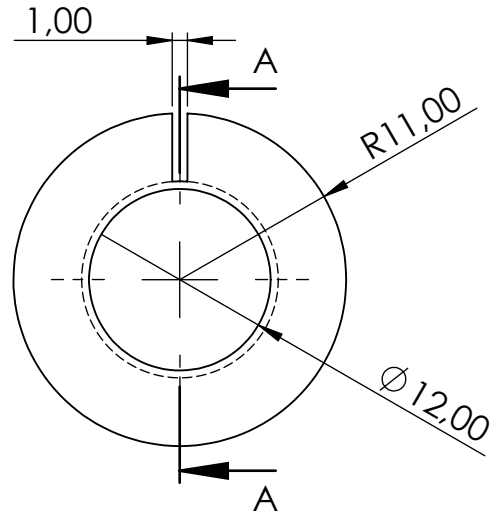
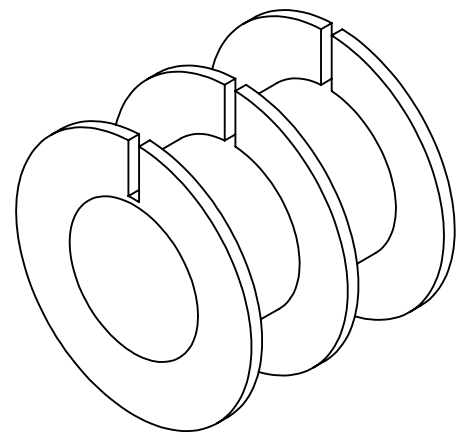
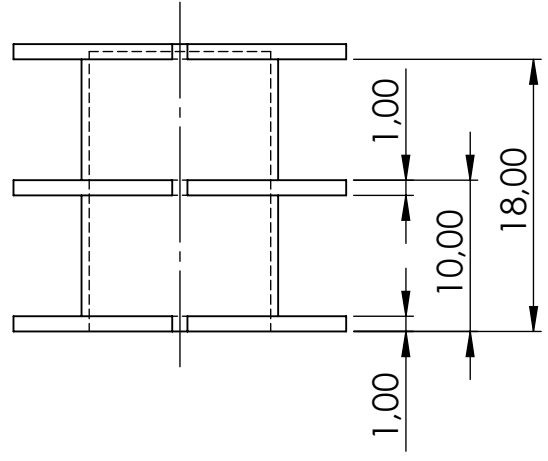
C

B

B

A

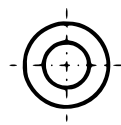
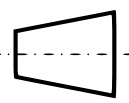
A



SECCIÓN A-A

**Nombre de la pieza:**

Esqueleto actuador vibrotáctil (versión definitiva)



**Diseñado por:**

Irene Guijarro Molina

**Escala:**

2:1

**Fecha:**

03/08/2023

**Material:**

Termoplástico PLA

**Hoja:**

1

**Formato de hoja:**

A4

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

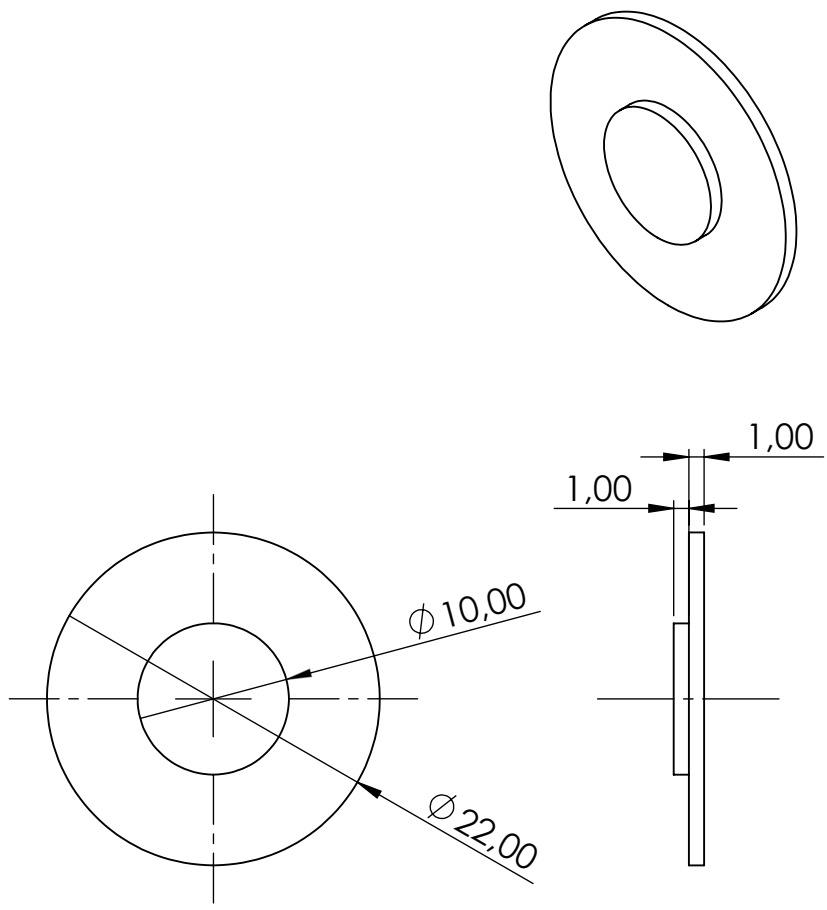
C

B

B

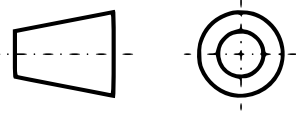
A

A



**Nombre de la pieza:**

Esqueleto ctuador vibrotáctil (versión definitiva)



**Diseñado por:**

Irene Guijarro Molina

**Escala:**

2:1

**Fecha:**

03/08/2023

**Material:**

Termoplástico PLA

**Hoja:**

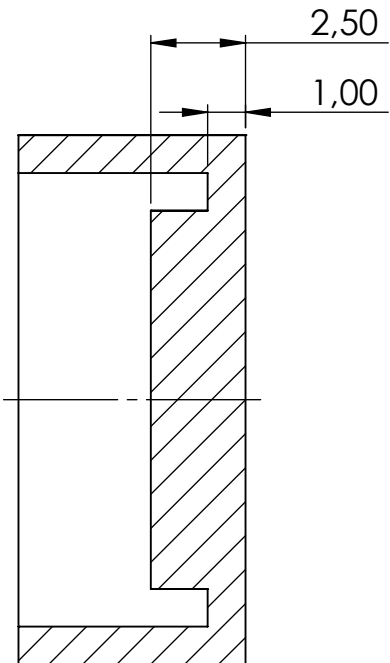
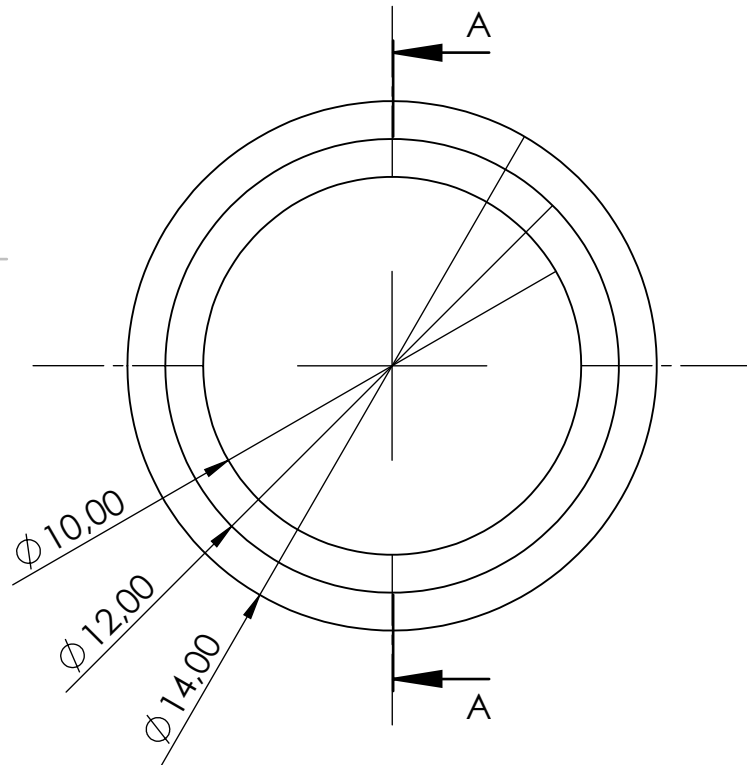
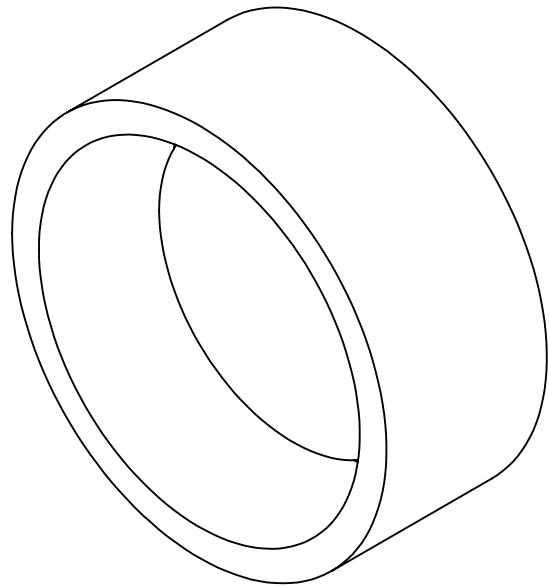
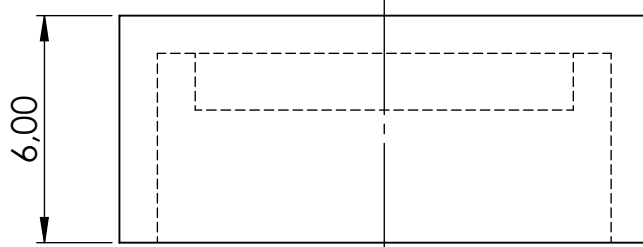
2

**Formato de hoja:**

A4

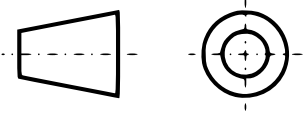
4 3 2 1

### A.3. Recipiente para la fabricación de amortiguadores de silicona



SECCIÓN A-A

**Nombre de la pieza:**  
 Molde de fabricación para amortiguadores de silicona (versión definitiva)



**Diseñado por:**  
 Irene Guijarro Molina

**Escala:**  
 2:1

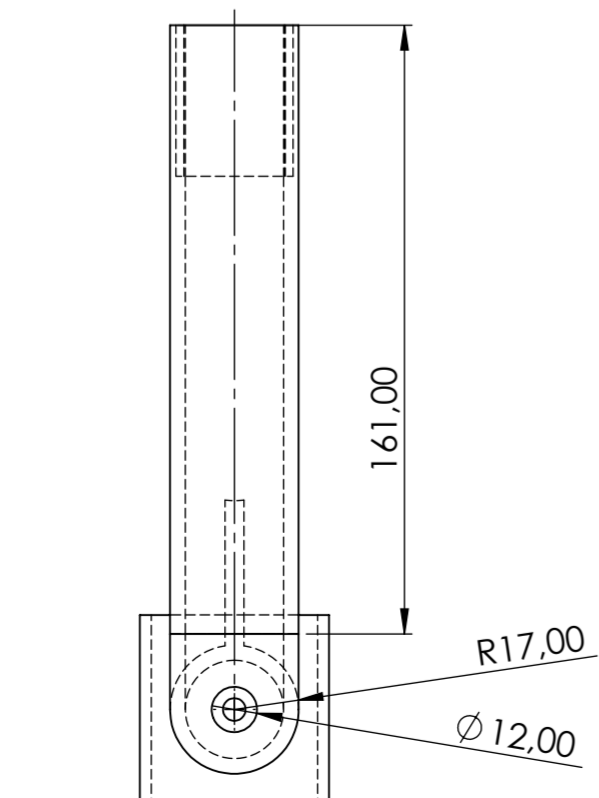
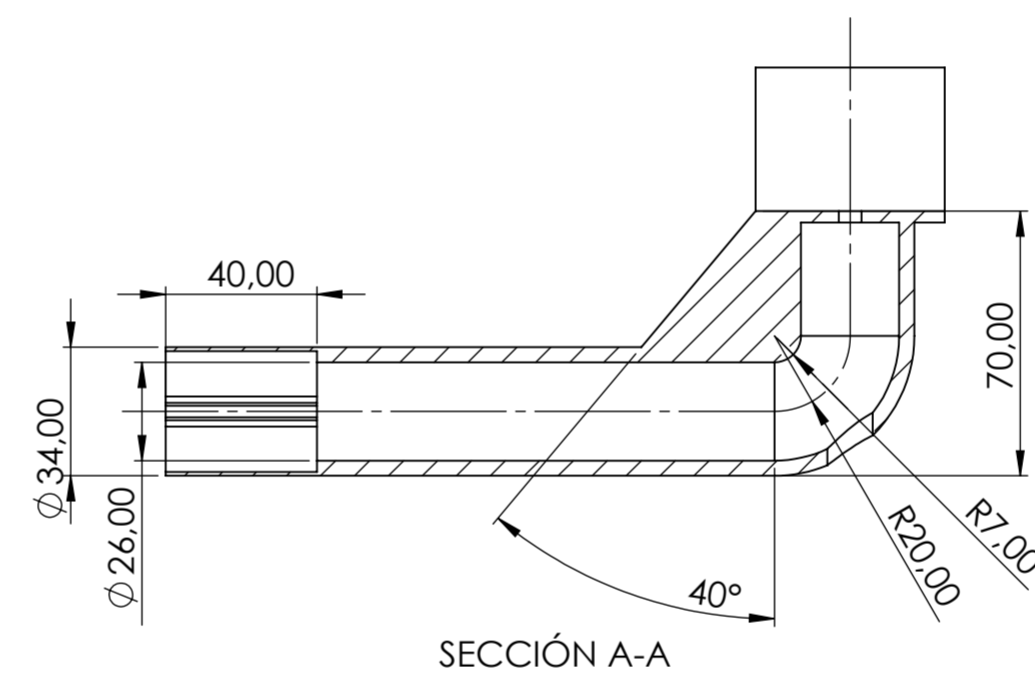
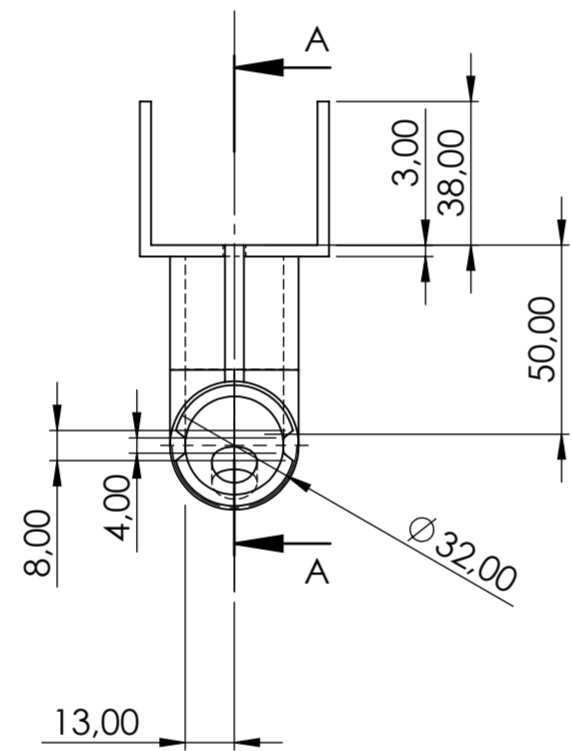
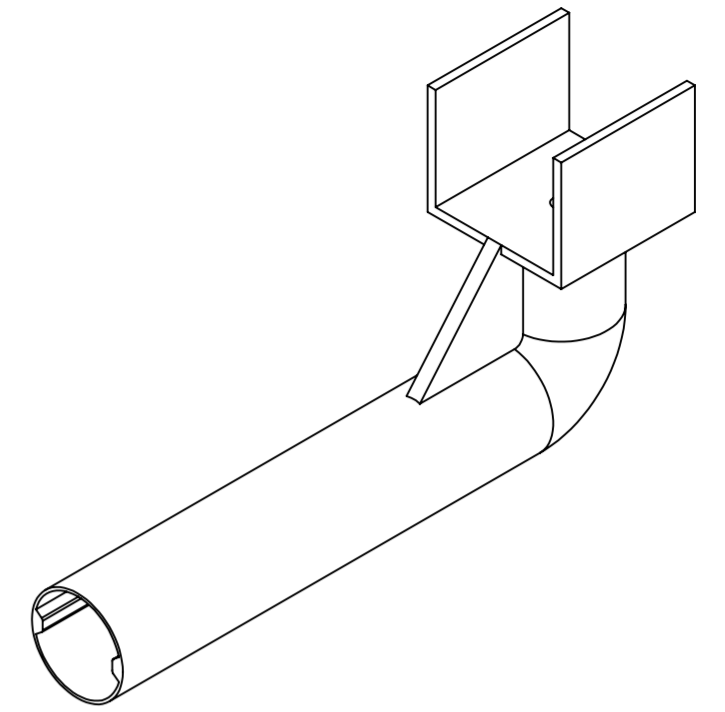
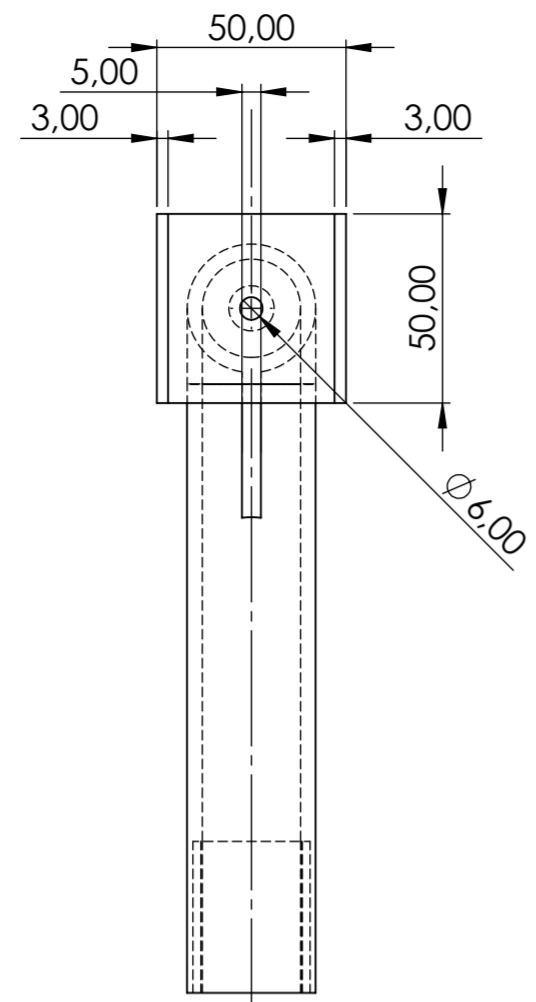
**Fecha:**  
 03/08/2023

**Material:**  
 Termoplástico PLA

**Hoja:**  
 1

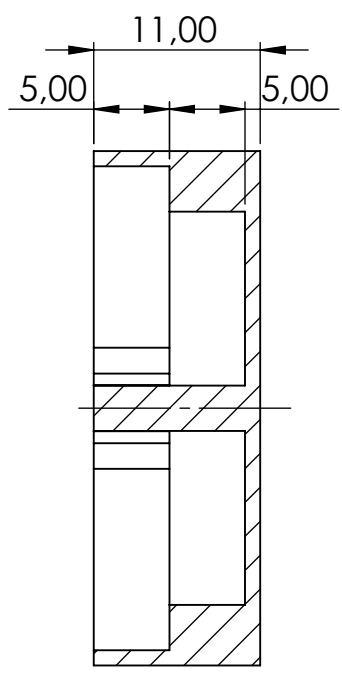
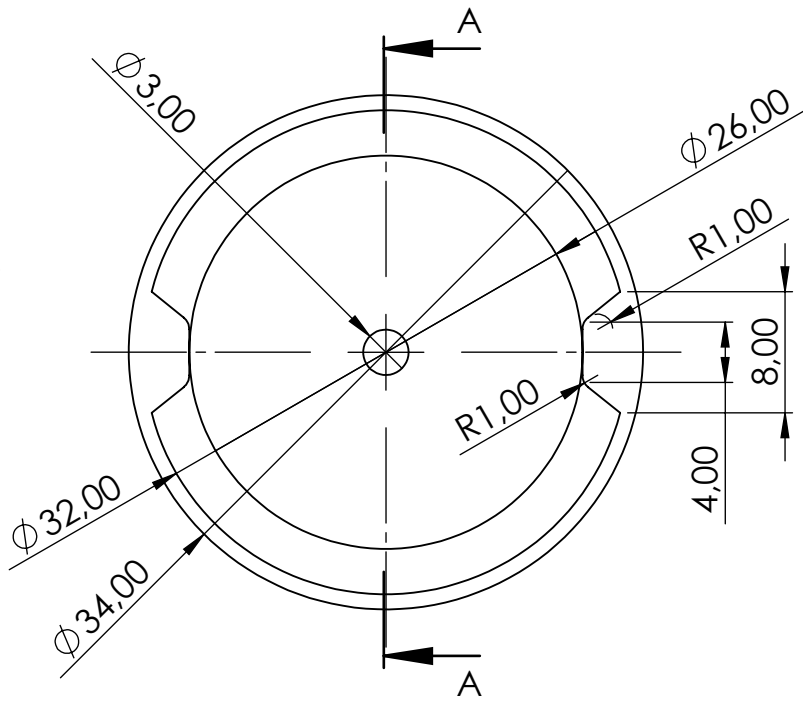
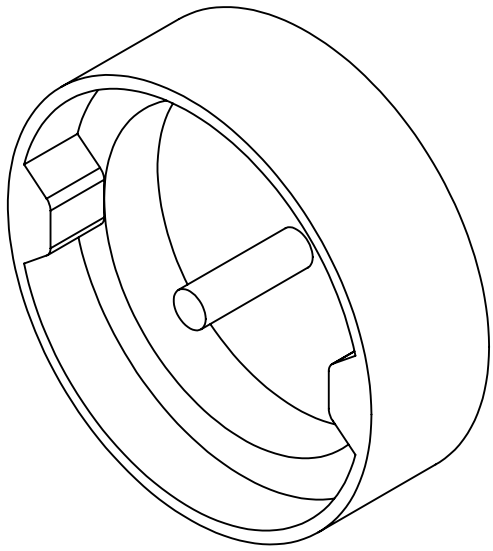
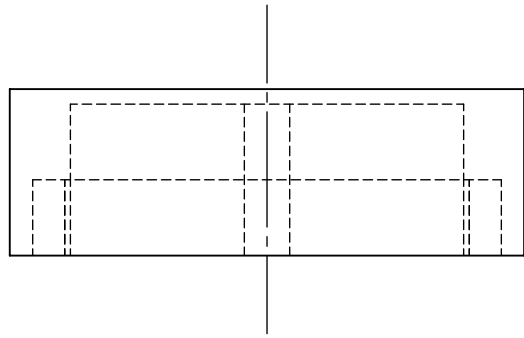
**Formato de hoja:**  
 A4

#### A.4. Soporte para actuador vibrotáctil



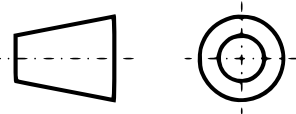
<b>Nombre de la pieza:</b> Soporte de actuador vibrotáctil				
<b>Diseñado por:</b> Irene Guijarro Molina		<b>Escala:</b> 1:2		
<b>Fecha:</b> 03/08/2023	<b>Material:</b> Termoplástico PLA	<b>Hoja:</b> 1	<b>Formato de hoja:</b> A2	

**A.5. Primer recipiente para la fabricación de la fijación del actuador**



SECCIÓN A-A

**Nombre de la pieza:**  
 Molde de fabricación de silicona de fijación (I)



**Diseñado por:**  
 Irene Guijarro Molina

**Escala:**  
 2:1

**Fecha:**  
 03/08/2023

**Material:**  
 Termoplástico PLA

**Hoja:**  
 1

**Formato de hoja:**  
 A4

**A.6. Segundo recipiente para la fabricación de la fijación del actuador**

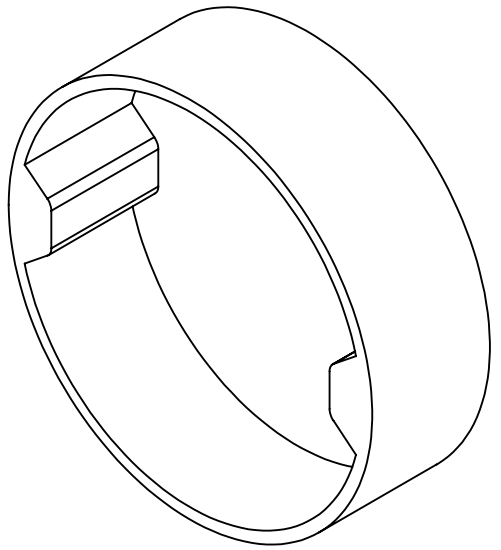
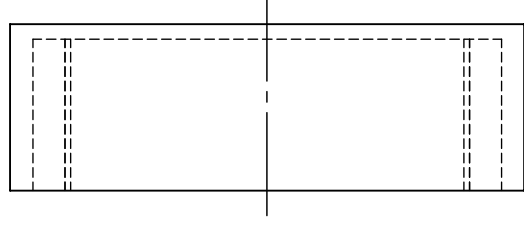
4 3 2 1

F

F

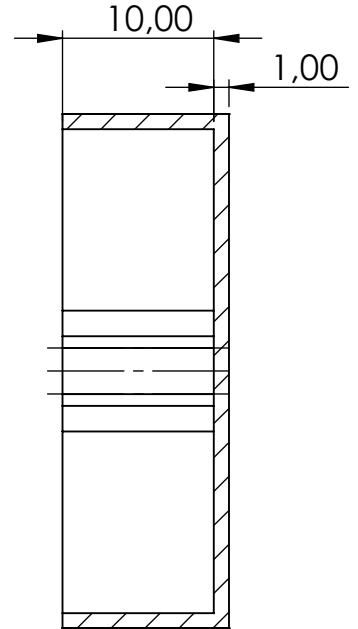
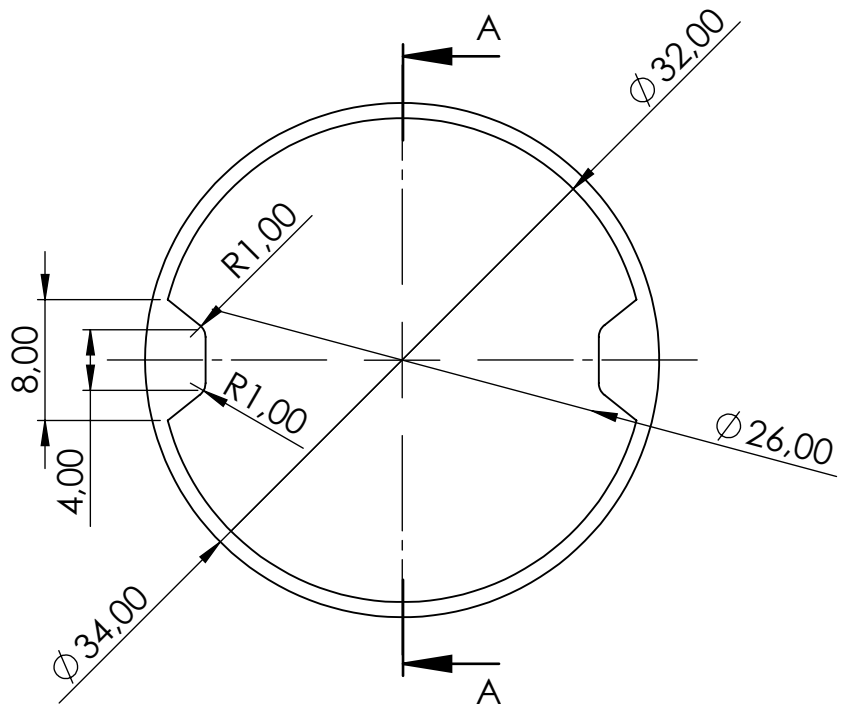
E

E



D

D



SECCIÓN A-A

C

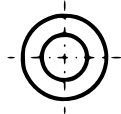
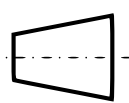
C

B

B

**Nombre de la pieza:**

Molde de fabricación de silicona de fijación (II)



**Diseñado por:**

Irene Guijarro Molina

**Escala:**

2:1

A

A

**Fecha:**

03/08/2023

**Material:**

Termoplástico PLA

**Hoja:**

1

**Formato de hoja:**

A4

4 3 2 1

## B. Medidas del entorno experimental

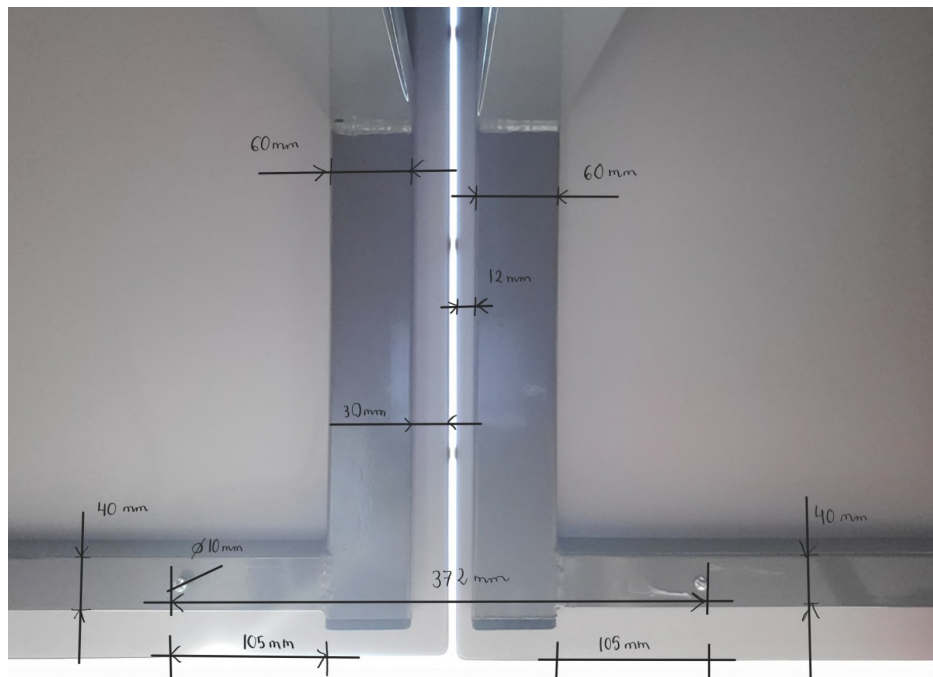


Figura 56: Medidas de las mesas que conforman el experimento (I)



Figura 57: Medidas de las mesas que conforman el experimento (II)

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

## C. Informe favorable del Comité de Ética de la UMA

Este anexo alberga al documento fundamental que proporciona la luz verde por parte del *Comité Ético* de la Universidad de Málaga (UMA) para desarrollar los experimentos



Nº: 77

Nº de Registro CEUMA: 157-2022-H

## INFORME DEL COMITÉ ÉTICO DE EXPERIMENTACIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

### CEUMA

Reunido el Comité Ético de Experimentación en Málaga, el 31 de enero de 2023 ha evaluado la solicitud del proyecto denominado “**Estudio de la influencia de estímulos visuales en la percepción de ilusiones táctiles de movimiento**” cuyo investigador principal es **D. Andrés Trujillo León**.

Una vez examinada la documentación presentada y verificados aquellos aspectos relacionados con la ética y la legislación en materia de investigación que se indican:

-Se cumplen los requisitos necesarios de idoneidad del protocolo en relación con los objetivos del estudio.

- La idoneidad del procedimiento experimental, especialmente la posibilidad de alcanzar conclusiones válidas de acuerdo con los objetivos establecidos.

- La capacidad del investigador principal y sus colaboradores, los medios y las instalaciones previstas y laboratorios de la Universidad de Málaga reúnen las condiciones necesarias para llevar a cabo el proyecto indicado.

- El alcance de las compensaciones y motivaciones previstas no interfiere con el respeto a los postulados éticos.

Acuerda por consenso emitir Informe Ético **FAVORABLE** para dicho proyecto.

Una vez instruido el procedimiento, y en base a lo dispuesto en el artículo 82 de la Ley 39/2015, de 1 de octubre, del Procedimiento Administrativo Común de las Administraciones Públicas, se le da audiencia para que en un plazo de 10 días, contados a partir de la recepción/publicación del presente informe, pueda formular alegaciones y presentar los documentos y justificaciones que estime pertinentes. Este informe tiene una validez de 4 años.

Para que así conste D. TEODOMIRO LÓPEZ NAVARRETE, Vicerrector de Investigación y Transferencia y Presidente del Comité Ético de Investigación de la Universidad de Málaga lo firma en Málaga a 9 de marzo de 2023.

Fdo: Teodomiro López Navarrete.

LOPEZ NAVARRETE  
JUAN TEODOMIRO  
- 08790887B

Firmado digitalmente por  
LOPEZ NAVARRETE JUAN  
TEODOMIRO - 08790887B  
Fecha: 2023.03.09  
12:49:05 +01'00'



## D. Documentación adicional

En este anexo, se presenta una recopilación de documentos fundamentales para el desarrollo y ejecución exitosa de los dos experimentos que tienen lugar en el marco del presente Trabajo Fin de Grado.

En primer lugar, se incluyen los panfletos publicitarios o infografías utilizadas para dar a conocer los dos experimentos a los potenciales participantes. Estos folletos cumplen un papel relevante al ofrecer una visión general y atractiva del estudio, invitando a los interesados a formar parte de él.

Asimismo, se incorpora una breve descripción o resumen de los dos experimentos, diseñado especialmente para proporcionar a los participantes información esencial sobre los objetivos y procedimientos del estudio. Esta documentación se proporciona y explica a cada voluntario, permitiéndoles tomar una decisión informada sobre su participación.

El consentimiento informado, otro componente esencial de este anexo, es el documento mediante el cual los participantes expresan su acuerdo voluntario para participar en el experimento. Este documento detalla los aspectos clave del estudio, los derechos del participante y la confidencialidad de la información, garantizando la transparencia y la ética en el proceso. Hay dos documentos de consentimiento informado diferentes, uno para cada experimento de los que consta este TFG.

Para obtener información relevante sobre los participantes y sus respuestas durante el experimento, se ha incluido un cuestionario general que cada uno de ellos debe completar. Este cuestionario proporciona datos valiosos para el análisis y comprensión de los resultados que se obtienen.

Además, se han incorporado dos protocolos de actuación exhaustivos para guiar al experto a cargo del experimento en cada paso y asegurar que ningún detalle importante sea ignorado durante la realización del mismo. Estos protocolos (uno para cada experimento) son una herramienta imprescindible para mantener la consistencia en la aplicación del experimento a lo largo de todas las sesiones.

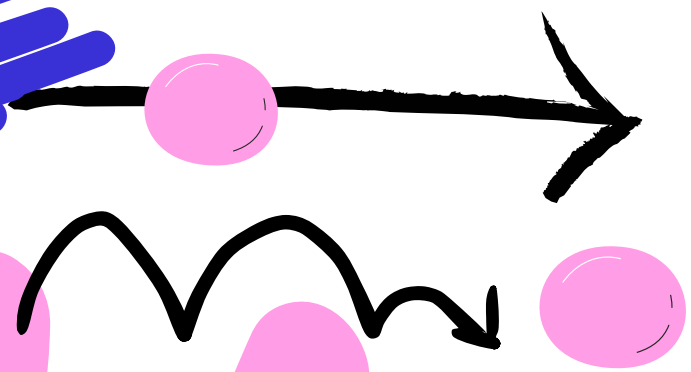
Finalmente, diversos paneles informativos sobre la disponibilidad de la sala de experimentos, se incluyen en este anexo.

En conjunto, la documentación adicional presente en este Anexo ha sido un recurso esencial para la gestión y ejecución del experimento, contribuyendo significativamente a la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos.

### D.1. Infografías de los experimentos

La primera infografía corresponde al primer experimento realizado, mientras que la segunda infografía se refiere al segundo experimento.

Movimiento  
continuo y a saltos



# PERCEPCIÓN DE PUNTO VIBRATORIO MÓVIL

¿Quieres participar en un experimento totalmente novedoso?  
¡Ven y forma parte de este emocionante experimento!

Colabora en la investigación



Irene Guijarro  
693 05 58 34



ireneguijarro@uma.es



Laboratorio 2.3.11, Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones

Para más información:

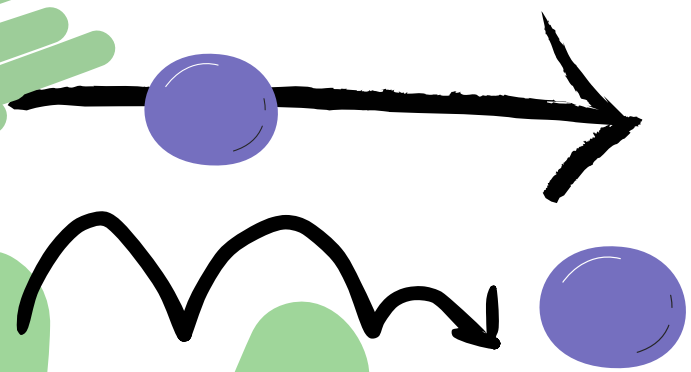


Regístrate aquí:

[https://docs.google.com/spreadsheets/d/1Q99w\\_Na1c5vXb4qfVPkeZx3ICeYosvvTAWFjbC1XVBO/edit?usp=sharing](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1Q99w_Na1c5vXb4qfVPkeZx3ICeYosvvTAWFjbC1XVBO/edit?usp=sharing)

PROCEDIMIENTO:
Sujetar interfaz vibrotáctil y reportar sensaciones
DURACIÓN:
25 minutos aprox.




Movimiento continuo y a saltos




# PERCEPCIÓN COMBINADA DE PUNTOS MÓVILES VIBRATORIOS Y VISUALES EN SINCRONÍA

¿Quieres participar en un experimento totalmente novedoso?  
¡Ven y forma parte de este emocionante experimento!

Colabora en la investigación

 Irene Guijarro  
 693 05 58 34  
 ireneguijarro@uma.es

 Laboratorio 2.3.11, Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones

Para más información:



## PROCEDIMIENTO:

Sujetar interfaz vibrotáctil, observar interfaz gráfica y reportar sensaciones

## DURACIÓN:

30-35 minutos aprox.



Regístrate aquí:

[https://docs.google.com/spreadsheets/d/1Q99w\\_Na1c5vXb4qfVPkeZx3ICeYosvvTAWFjbC1XVBO/edit?usp=sharing](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1Q99w_Na1c5vXb4qfVPkeZx3ICeYosvvTAWFjbC1XVBO/edit?usp=sharing)

## **D.2. Descripción del experimento**

La descripción o resumen de los dos experimentos que constituyen este Trabajo Fin de Grado, entregada a los participante, se encuentra a continuación:

## DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO: PERCEPCIÓN DE PUNTO VIBRATORIO MÓVIL (CONTINUO Y SALTADOR)

### 1) Objetivo del trabajo de investigación:

Caracterización de la percepción de puntos vibratorios móviles continuos y saltadores mediante pruebas psicofísicas para la mejora de experiencias con retroalimentación háptica.

### 2) Descripción del experimento:

El/la participante, sentado/a y con el brazo en posición relajada, agarrará con la mano dominante un interfaz vibrotáctil con forma de barra. El interfaz se encuentra adherido al reverso de la mesa de trabajo. El responsable del experimento le ayudará a asir correctamente el interfaz.

A continuación, comenzará una **sesión de familiarización** consistente en la presentación de diferentes estímulos vibrotáctiles de punto móvil. El/la participante percibirá, a través de la mano que agarra el interfaz, un punto vibratorio que se desplaza, o bien de izquierda a derecha, o bien de derecha a izquierda. La sesión de práctica terminará cuando el experimentador y el participante lo acuerden, una vez el segundo perciba claramente el desplazamiento del punto vibratorio.

La **sesión experimental** consistirá en la presentación de una serie de estímulos de punto vibratorio móvil, en los cuales el/la participante indicará en qué coordenada espacial se ha detenido el punto móvil, dentro del eje formado por la barra interfaz. La respuesta se registra mediante la pulsación en una pantalla táctil, en la que se muestra una representación gráfica a escala real de la zona de agarre del interfaz.

Durante las experiencias de percepción, el/la participante llevará unos auriculares con cancelación de ruido externo, que reproducirán ruido rosa o marrón. Además, el participante cerrará los ojos para mejorar la concentración.

### 3) Duración del experimento

El experimento tiene una duración aproximada de 30 minutos máximo, lo cual incluye descansos de 2 minutos.

**DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO: PERCEPCIÓN COMBINADA DE  
PUNTOS MÓVILES VIBRATORIOS Y VISUALES EN SINCRONÍA  
(CONTINUOS Y A SALTOS)**

1) Objetivo del trabajo de investigación:

Caracterizar la percepción combinada de puntos móviles vibratorios y visuales (continuos y a saltos) al ser presentados en sincronía, mediante pruebas psicofísicas, para la mejora de experiencias con retroalimentación háptica.

2) Descripción del experimento:

El/la participante, sentado/a y con el brazo en posición relajada, sujetará con la mano dominante una interfaz vibrotáctil con forma de barra cilíndrica. La interfaz se encuentra adherido al reverso de la mesa de trabajo. El responsable del experimento le ayudará a asir correctamente el interfaz.

A continuación, comenzará una **sesión de familiarización** consistente en la presentación de diferentes estímulos vibrotáctiles de punto móvil. El/la participante percibirá, a través de la mano que sujeta la interfaz, un punto vibratorio que se desplaza, o bien de izquierda a derecha, o bien de derecha a izquierda. La sesión de práctica terminará cuando el experimentador y el participante lo acuerden, una vez el segundo perciba claramente el desplazamiento del punto vibratorio.

La **sesión experimental** consistirá en la presentación de una serie de pares de estímulos vibratorios y visuales. Cada par estará formado por un estímulo háptico en forma de punto vibratorio móvil que se desplaza por la interfaz vibrotáctil que se sujeta con la mano, y un punto que se desplaza de forma visual por una pantalla frente al/a la participante donde se ilustra la interfaz y la mano. Ambos estímulos se generan en sincronía. El/la participante deberá valorar la coherencia que presenta la percepción de ambos estímulos, es decir, evaluará en qué grado el punto móvil visual representa la trayectoria del punto móvil vibratorio que percibe a través de la interfaz sujeta con la mano.

Durante las experiencias, el/la participante llevará unos auriculares con cancelación de ruido externo, que reproducirán ruido rosa o marrón. Además, el participante cerrará los ojos para mejorar la concentración.

3) Duración del experimento

El experimento tiene una duración aproximada de 30 minutos máximo, lo cual incluye descansos de 2 minutos.

### **D.3. Consentimiento informado**

Los consentimientos informados que los participantes del primer y segundo experimento deben complementar respectivamente, se encuentran en este subanexo.

## CONSENTIMIENTO INFORMADO

**TÍTULO DEL PROYECTO:** PERCEPCIÓN DE PUNTO VIBRATORIO MÓVIL (CONTINUO Y SALTADOR).

**Grupo de Investigación:** Electrónica para Instrumentación y Sistemas

**Facultad:** E.T.S.I. Informática

**Personas de contacto:** Irene Guijarro Molina ([ireneguijarro@uma.es](mailto:ireneguijarro@uma.es)) / Andrés Trujillo León ([atrujilloleon@uma.es](mailto:atrujilloleon@uma.es)) / Paul Remache Vinuesa ([paulremache@uma.es](mailto:paulremache@uma.es))

### MEDIANTE ESTE CONSENTIMIENTO,

Declaro que se me ha informado por escrito y oralmente, y se me han respondido a las dudas que haya podido plantear. Declaro así, conocer el propósito del experimento, y participar voluntariamente del proyecto de investigación "PERCEPCIÓN DE PUNTO VIBRATORIO MÓVIL (CONTINUO Y SALTADOR)". Confirmando, además, que se me ha informado del procedimiento y metodología, y que el uso de la información que se obtenga del experimento será únicamente con fines investigativos. Además, se me ha indicado que mis datos personales permanecerán confidenciales, que puedo retirarme del estudio sin exponer mis motivos, y que este consentimiento puede ser revocado en cualquier momento.

**POR TODO LO CUAL, ACCEDO A PARTICIPAR EN EL PROYECTO ANTES CITADO.**

**Firma de participante:**

**Persona que ha informado:**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Nombre: .....

Nombre: .....

DNI: .....

DNI: .....

**Fecha:**

**CUESTIONARIO GENERAL**

## CONSENTIMIENTO INFORMADO

**TÍTULO DEL PROYECTO:** PERCEPCIÓN COMBINADA DE PUNTOS MÓVILES VIBRATORIOS Y VISUALES EN SINCRONÍA (CONTINUOS Y A SALTOS)

**Grupo de Investigación:** Electrónica para Instrumentación y Sistemas

**Facultad:** E.T.S.I. Informática

**Personas de contacto:** Irene Guijarro Molina ([ireneguijarro@uma.es](mailto:ireneguijarro@uma.es)) / Andrés Trujillo León ([atrujilloleon@uma.es](mailto:atrujilloleon@uma.es)) / Paul Remache Vinueza ([paulremache@uma.es](mailto:paulremache@uma.es))

### MEDIANTE ESTE CONSENTIMIENTO,

Declaro que se me ha informado por escrito y oralmente, y se me han respondido a las dudas que haya podido plantear. Declaro así, conocer el propósito del experimento, y participar voluntariamente del proyecto de investigación "PERCEPCIÓN COMBINADA DE PUNTOS MÓVILES VIBRATORIOS Y VISUALES EN SINCRONÍA (CONTINUOS Y SALTADORES)". Confirmando, además, que se me ha informado del procedimiento y metodología, y que el uso de la información que se obtenga del experimento será únicamente con fines investigativos. Además, se me ha indicado que mis datos personales permanecerán confidenciales, que puedo retirarme del estudio sin exponer mis motivos, y que este consentimiento puede ser revocado en cualquier momento.

**POR TODO LO CUAL, ACCEDO A PARTICIPAR EN EL PROYECTO ANTES CITADO.**

**Firma de participante:**

**Persona que ha informado:**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Nombre: .....

Nombre: .....

DNI: .....

DNI: .....

**Fecha:**

#### **D.4. Cuestionario general**

Este subanexo está formado únicamente por un breve cuestionario general entregado a los participantes, principalmente para la elaboración de estadísticas.

## CUESTIONARIO GENERAL

1) ¿Cuál es su edad? \_\_\_

2) ¿Cuál es su sexo?

Masculino \_\_\_ Femenino \_\_\_

3) De acuerdo con su mano dominante usted es:

Zurdo \_\_\_ Diestro \_\_\_ Ambidiestro \_\_\_ No lo sé \_\_\_

5) ¿Tiene algún problema auditivo?

Sí \_\_\_ No \_\_\_

5.1) Si su respuesta a la pregunta 5 fue "Sí" ¿podría describir rápidamente su problema auditivo?

---

---

6) ¿Tiene algún problema visual?

Sí \_\_\_ No \_\_\_

6.1) Si su respuesta a la pregunta 6 fue "Sí" ¿podría describir rápidamente su problema visual?

---

---

7) ¿Ha tenido algún problema físico o neurológico que afecte su sentido del tacto?

Sí \_\_\_ No \_\_\_

7.1) Si su respuesta a la pregunta 7 fue "Sí" ¿podría describir rápidamente su problema neurológico?

---

---

## **D.5. Protocolo del experimento**

Este subanexo incluye el protocolo seguido en la realización de cada uno de los dos experimentos que conforman este Trabajo Fin de Grado.



# PROTOCOLO

## PERCEPCIÓN DE UN PUNTO VIBRATORIO MÓVIL (CONTINUO Y A SALTOS)

# 1

### SET-UP

- **Habilitar espacio de trabajo** (portátil, MATLAB, modo avión, conexión pantalla táctil, conexión actuadores).
- Comprobar/ajustar separación de las dos mitades del **soporte de los actuadores**.
- **Centrar y nivelar la pantalla táctil**.
- Verificar el correcto funcionamiento de los **actuadores**.
- Comprobar que se ejecutan los **códigos de las sesiones de entrenamiento y de las interfaces**.
- Regular la **temperatura** del laboratorio.
- Preparar/comprobar el funcionamiento de los auriculares con el **ruido marrón** y ajustar el volumen
- Verificar que el **hardware** del experimento esté oculto

# 2

### EXPLICACIÓN AL PARTICIPANTE

- **OBJETIVO:** caracterizar la percepción de puntos vibratorios móviles continuos y a saltos mediante pruebas psicofísicas para la mejora de experiencias con retroalimentación háptica.
- Adoptar **posición cómoda** en la silla, sujetar la interfaz táctil con la mano derecha, palma hacia arriba, dedo corazón en la muesca y codo apoyado en la silla. **IMPORTANTE**, no mover la mano durante el experimento.
- El **rectángulo oscuro de la interfaz táctil equivale a la posición y tamaño de la mano**.
- **Interfaz vibrotáctil es cilíndrica y de longitud indeterminada (rectángulo gris claro en la pantalla)**.
- **Interfaz gráfica es táctil**, presenta estímulos visuales y preguntas que se responden pulsando.
- El experimento se divide en **4 partes**: 2 sesiones de entrenamiento y 2 conjuntos de experiencias diferentes
- Las **sesiones de entrenamiento** finalizan cuando el participante perciba el movimiento vibratorio
- Sesión experimental consiste en una **serie de estímulos de punto vibratorio móvil**.
- Todos los **estímulos se repiten dos veces** consecutivas.
- El movimiento del punto puede ser de **derecha a izquierda o de izquierda a derecha**.
- El participante ha de indicar la **coordenada espacial** donde se detiene cada punto móvil que se le presenta.
- La **respuesta se registra mediante la pulsación** en la pantalla táctil.
- El participante ha de emplear **auriculares con ruido marrón**
- Recomendar **cerrar los ojos** en las sesiones de entrenamiento
- Recomendar **cerrar los ojos en la segunda repetición** de cada experiencia.
- Hay un **descanso de 2 minutos** en mitad del experimento
- No dudar en preguntar si surgen dudas
- **Todas las respuestas son válidas**, no hay respuestas correctas ni incorrectas
- Los estímulos de la sesión experimental se **pueden repetir**
- **La duración de la sesión es de 25 minutos**.



# PROTOCOLO

## PERCEPCIÓN COMBINADA DE PUNTOS VIBRATORIOS Y VISUALES EN SINCRONIA (CONTINUOS Y A SALTOS)

1

### SET-UP

- **Habilitar espacio de trabajo** (portátil, MATLAB, modo avión, conexión pantalla táctil, conexión actuadores).
- Comprobar/ajustar separación de las dos mitades del **soporte de los actuadores**.
- **Centrar y nivelar la pantalla táctil**.
- Verificar el correcto funcionamiento de los **actuadores**.
- Comprobar que se ejecutan los **códigos de las sesiones de entrenamiento y de las interfaces**.
- Regular la **temperatura** del laboratorio.
- Preparar/comprobar el funcionamiento de los auriculares con el **ruido marrón** y ajustar el volumen
- Verificar que el **hardware** del experimento esté oculto

2

### EXPLICACIÓN AL PARTICIPANTE

- **OBJETIVO:** caracterizar la percepción combinada de puntos móviles vibratorios y visuales (continuos y a saltos) representados de forma síncrona, mediante pruebas psicofísicas, para la mejora de experiencias con retroalimentación háptica.
- Adoptar **posición cómoda** en la silla, sujetar la interfaz táctil con la mano derecha, palma hacia arriba, dedo corazón en la muesca y codo apoyado en la silla. **IMPORTANTE**, no mover la mano durante el experimento.
- El **rectángulo oscuro de la interfaz gráfica simboliza la posición y tamaño de la mano**.
- **Interfaz vibrotáctil es cilíndrica y de longitud indeterminada (rectángulo gris claro en la interfaz)**.
- **Interfaz gráfica es táctil**, presenta estímulos visuales y preguntas que se responden pulsando.
- El experimento se divide en **4 partes**: 2 sesiones de entrenamiento y 2 conjuntos de experiencias diferentes
- Las **sesiones de entrenamiento** finalizan cuando el participante perciba el movimiento vibratorio
- Sesión experimental consiste en una serie de pares de estímulos vibratorios y visuales
- Todos los **estímulos de la sesión experimental se repiten dos veces**.
- Cada par de estímulos está formado por un **estímulo háptico** en forma de punto que se desplaza en la interfaz vibrotáctil y **un punto que se desplaza por la pantalla de forma síncrona**.
- El participante ha de **valorar la coherencia** (localización, dirección, duración y/o nº de puntos) que presenta la percepción de ambos estímulos.
- El participante ha de emplear **auriculares con ruido marrón**.
- Recomendar **cerrar los ojos** en las sesiones de entrenamiento.
- Hay un **descanso de 2 minutos** en mitad del experimento.
- No dudar en preguntar si surgen dudas.
- **Todas las respuestas son válidas**, no hay respuestas correctas ni incorrectas.
- Los estímulos de la sesión experimental se **pueden repetir**.
- **La duración del experimento es de 30-35 minutos**.

## D.6. Paneles informativos

En este subanexo se incluyen los tres paneles informativos empleados en el SetUp de los experimentos como indicadores de la disponibilidad de la sala:

- Puede pasar: indica que la sala de experimentos está libre y preparada para albergar un participante nuevo.
- No pasar: señala que hay un experimento en curso, por lo que no debe pasar a la sala.
- Vuelvo en unos minutos: es un panel informativo coloquial que indica la ausencia momentánea del experto que dirige el experimento.

**PUEDE PASAR**



**SALA EXPERIMENTOS**

**LIBRE**

**NO PASAR**



**EXPERIMENTO EN CURSO**

**Espera unos minutos, gracias**

**NO ESTOY**



**VUELVO EN UNOS MINUTOS**

**Lláname: 693 05 58 34**

## E. Código completos que conforman las sesiones experimentales

Este anexo es una parte fundamental del proyecto Fin de Grado pues incluye íntegramente el código de las dos interfaces gráficas desarrolladas para los experimentos llevados a cabo, así como el código de las sesiones de entrenamiento. Es importante resaltar que al incluir los códigos completos, ha sido necesario suprimir los signos de interrogación y todas las tildes de los archivos originales.

### E.1. Sesiones de entrenamiento

```

1 % SESION ENTRENAMIENTO
2
3 % 1) SFM
4
5 for i=1:30
6     'ID'
7     Vib_FS_050_ID
8     pause(1);
9     'DI'
10    Vib_FS_050_DI
11    pause(1);
12 end
13
14 for i=1:30
15     'ID'
16     Vib_FS_100_ID
17     pause(1.5);
18     'DI'
19     Vib_FS_100_DI
20     pause(1.5);
21 end
22
23
24 % 2) CR
25
26 for i=1:30
27     'ID'
28     Vib_CR_380_ID
29     pause(1);
30     'DI'
31     Vib_CR_380_DI
32     pause(1);
33 end
34
35 for i=1:30
36     'ID'
37     Vib_CR_560_ID
38     pause(1);
39     'DI'
40     Vib_CR_560_DI
41     pause(1);
42 end

```

Código 11: Sesión de entrenamiento común a los dos experimentos

### E.2. Interfaz gráfica del primer experimento

```

1 classdef TFG_expi_DEF < matlab.apps.AppBase
2
3     % Properties that correspond to app components
4     properties (Access = public)
5         UIFigure         matlab.ui.Figure
6         FlechaIzquierda  matlab.ui.control.Image
7         FlechaDerecha    matlab.ui.control.Image
8         DerechaButton    matlab.ui.control.Button
9         IzquierdaButton  matlab.ui.control.Button

```

```

10     ImageSoporte      matlab.ui.control.Image
11     Repetir          matlab.ui.control.Button
12     Texto            matlab.ui.control.Label
13     TextoRepetir     matlab.ui.control.Label
14     EjecutarButton  matlab.ui.control.Button
15     Siguiete         matlab.ui.control.Button
16     Image            matlab.ui.control.Image
17     TextoNumeros    matlab.ui.control.Label
18     RecuadroMano     matlab.ui.control.Button
19     RecuadroBotones  matlab.ui.control.Button
20     RecuadroFondo   matlab.ui.control.Button
21     end
22
23
24     properties (Access = public)
25
26         codigos_vibracionFS      % Matriz que contiene los c odigos que ejecutan las vibraciones de los
actuadores
27         codigos_vibracionCR      % Matriz que contiene los c odigos que ejecutan las vibraciones de los
actuadores
28         matriz_experimentos      % Matriz que guarda los resultados del experimento completo
29         experimento              % Valor num erico que el usuario marca al acabar cada parte del
experimento
30
31         Nombre                   % Nombre del usuario
32         Apellido                 % Apellido del usuario
33         NombreCompleto          % Nombre del archivo donde se guardar an los resultados del experimento
34
35         introduccion             % Variable que indica la completitud de la experiencia
36         repetir                 % Variable empleada para gestionar la repeticion de las ilusiones
37         experiencia              % Variable que indica la experiencia a realizarm(SFM o CR)
38
39         direccion                % Variable que permite controlar la direcci on de la flecha del
movimiento
40
41     end
42
43
44     methods (Access = private)
45
46         function deshabilitar_botones_experimento1(app)
47
48             % Hacer invisibles los botones de respuesta
49             set(app.ImageSoporte, 'Visible', 'off');
50             set(app.IzquierdaButton, 'Visible', 'off');
51             set(app.DerechaButton, 'Visible', 'off');
52
53         end
54
55
56         function ocultar_botones(app)
57
58             % Hacer invisibles todos los botones
59             set(app.RecuadroMano, 'Visible', 'off');
60             set(app.RecuadroBotones, 'Visible', 'off');
61             set(app.ImageSoporte, 'Visible', 'off');
62             set(app.IzquierdaButton, 'Visible', 'off');
63             set(app.DerechaButton, 'Visible', 'off');
64
65         end
66
67
68         function habilitar_botones_experimento1(app)
69
70             % Hacer visibles los botones de respuesta
71             set(app.ImageSoporte, 'Visible', 'on');
72             set(app.IzquierdaButton, 'Visible', 'on');
73             set(app.DerechaButton, 'Visible', 'on');
74
75         end
76
77     end
78
79     end
80
81     % Callbacks that handle component events
82     methods (Access = private)
83
84         % Code that executes after component creation
85         function startupFcn(app)

```

```
86
87     % Inicializar variable repetir
88     app.repetir = 0;
89
90     % Inicializar las matrices con los c odigos que se ejecutan
91     app.codigos_vibracionFS = ['Vib_FS_025_ID'; 'Vib_FS_050_ID'; 'Vib_FS_100_ID'; 'Vib_FS_150_ID'
; 'Vib_FS_200_ID'; 'Vib_FS_250_ID'; 'Vib_FS_300_ID';
92     'Vib_FS_025_DI'; 'Vib_FS_050_DI'; 'Vib_FS_100_DI'; 'Vib_FS_150_DI'; 'Vib_FS_200_DI'; '
Vib_FS_250_DI'; 'Vib_FS_300_DI'];
93     app.codigos_vibracionCR = ['Vib_CR_380_ID'; 'Vib_CR_560_ID'; 'Vib_CR_740_ID';
94     'Vib_CR_380_DI'; 'Vib_CR_560_DI'; 'Vib_CR_740_DI'];
95
96     % Inicializar la matriz de resultados
97     app.matriz_experimentos = [];
98
99
100    % Inicializar Design View
101    deshabilitar_botones_experimento1(app);
102    set(app.Repetir, 'Visible', 'off');
103    set(app.Siguiente, 'Visible', 'off');
104    set(app.Image, 'Visible', 'off');
105    set(app.RecuadroBotones, 'Visible', 'on');
106    set(app.RecuadroMano, 'Visible', 'on');
107    set(app.FlechaDerecha, 'Visible', 'off');
108    set(app.FlechaIzquierda, 'Visible', 'off');
109
110    set(app.Repetir, 'Enable', 'off');
111    set(app.Siguiente, 'Enable', 'off');
112    set(app.RecuadroBotones, 'Enable', 'off');
113    set(app.RecuadroMano, 'Enable', 'off');
114
115
116
117    % Preguntar al usuario su nombre
118    nombre = inputdlg('Por favor, ingrese el nombre del participante:', 'Nombre', [1 60]);
119
120    % Almacenar la respuesta del usuario en una variable
121    if ~isempty(nombre)
122        app.Nombre = nombre{1};
123    end
124
125
126    % Preguntar al usuario su primer apellido
127    apellido = inputdlg('Por favor, ingrese el primer apellido del participante:', 'Primer
apellido', [1 60]);
128
129    % Almacenar la respuesta del usuario en una variable
130    if ~isempty(apellido)
131        app.Apellido = apellido{1};
132    end
133
134
135    % Preguntar al usuario el experimento a realizar
136    pregunta1 = inputdlg('Indique la experiencia a realizar:', 'SFM o CR', [1 60]);
137
138    % Almacenar la respuesta del usuario en una variable
139    if ~isempty(pregunta1)
140        respuesta1 = pregunta1{1};
141    end
142
143    if strcmp (respuesta1, 'SFM')
144        app.experiencia = 1;
145    elseif strcmp (respuesta1, 'CR')
146        app.experiencia = 2;
147    end
148
149
150    % Preguntar al usuario si es el primer experimento que realiza
151    pregunta2 = inputdlg(' Es la primera experiencia que realiza ', 'si o no', [1 60]);
152
153    % Almacenar la respuesta del usuario en una variable
154    if ~isempty(pregunta2)
155        respuesta2 = pregunta2{1};
156    end
157
158    if strcmp (respuesta2, 'si')
159        app.introduccion = 1;
160    elseif strcmp (respuesta2, 'no')
161        app.introduccion = 2;
162    end
```

```
163     end
164
165     % Button pushed function: EjecutarButton
166     function EjecutarButtonPushed(app, event)
167         % Deshabilitar el bot on Ejecutar
168         set(app.EjecutarButton, 'Visible', 'off');
169         set(app.EjecutarButton, 'Enable', 'off');
170
171         if app.introduccion == 1
172             % Cambiar el texto del componente de texto (introducci on)
173             set(app.Texto, 'Text', 'Bienvenido/a al experimento de puntos m oviles');
174
175             % Esperar 4 segundos
176             pause(4);
177
178             % Cambiar el texto del componente de texto (LIMPIAR)
179             set(app.Texto, 'Text', '');
180
181         end
182
183
184
185         if app.experiencia == 1
186
187             % Nombre del fichero que se crear a tras realizar la experiencia de FS
188             app.NombreCompleto = [app.Nombre app.Apellido '_Exp1_FS.xlsx'];
189
190             % Cambiar el texto del componente de texto (entrenamiento experiencia FS)
191             set(app.Texto, 'Text', 'Cuando est e preparado/a pulse el bot on Siguiente para comenzar
la experiencia de MOVIMIENTOS CONTINUOS');
192
193             % Fin de la introducci on para FS (actualizacion de variable)
194             introduccion_FS = 0;
195
196             % Generar n n umeros del 1 al n de forma aleatoria y sin repetir
197             numeros_aleatorios = randperm(14,14);
198
199             % Pulsar bot on para continuar
200             set(app.Siguiente, 'Visible', 'on');
201             set(app.Siguiente, 'Enable', 'on');
202
203             % Detener el programa hasta recibir respuesta
204             uiwait(app.UIFigure);
205             set(app.Texto, 'Text', '');
206
207             % Deshabilitar el bot on de continuar
208             set(app.Siguiente, 'Visible', 'off');
209             set(app.Siguiente, 'Enable', 'off');
210
211         elseif app.experiencia == 2
212
213             % Nombre del fichero que se crear a tras realizar la experiencia de CR
214             app.NombreCompleto = [app.Nombre app.Apellido '_Exp1_CR.xlsx'];
215
216             % Cambiar el texto del componente de texto (entrenamiento experiencia CR)
217             set(app.Texto, 'Text', 'Cuando est e preparado/a pulse el bot on Siguiente para comenzar
la experiencia PUNTOS QUE SALTAN');
218
219             % Fin de la introducci on para CR (actualizacion de variables)
220             introduccion_CR = 0;
221
222             % Generar n n umeros del 1 al n de forma aleatoria y sin repetir
223             numeros_aleatorios = randperm(6,6);
224
225             % Pulsar bot on para continuar
226             set(app.Siguiente, 'Visible', 'on');
227             set(app.Siguiente, 'Enable', 'on');
228
229             % Detener el programa hasta recibir respuesta
230             uiwait(app.UIFigure);
231             set(app.Texto, 'Text', '');
232
233             % Deshabilitar el bot on de continuar
234             set(app.Siguiente, 'Visible', 'off');
235             set(app.Siguiente, 'Enable', 'off');
236
237         end
238
239         % Inicializar variable que controla el avance en el bucle while
240         i=1;
```

```
241
242     % Inicializar variable que permite repetir todas las vibraciones una vez
243     twice = 0;
244
245     % Bucle que ejecuta el conjunto de experiencias
246     while i <= length( numeros_aleatorios )
247
248         if app.experiencia == 1
249
250             if introduccion_FS == 0
251
252                 % Actualizaci on de la variable que permite realizar la introducci on a las FS
253                 una vez
254                 introduccion_FS=1;
255
256                 % Cambiar el texto del componente de texto (inicio experiencia FS)
257                 set(app.Texto, 'Text', 'Ha comenzado la experiencia dedicada a MOVIMIENTOS
258                 CONTINUOS');
259
260                 % Esperar 5 segundos
261                 pause(5)
262
263                 % Cambiar el texto del componente de texto (inicio experiencia FS)
264                 el mango que sujeta');
265                 set(app.Texto, 'Text', 'Se le presentar an movimientos continuos de un punto en
266
267                 % Esperar 5 segundos
268                 pause(5)
269
270                 % Cambiar el texto del componente de texto (inicio experiencia FS)
271                 izquierda a derecha');
272                 set(app.Texto, 'Text', 'Los movimientos pueden ser de derecha a izquierda o de
273
274                 % Esperar 5 segundos
275                 pause(5)
276
277                 % Cambiar el texto del componente de texto (inicio experiencia FS)
278                 crea que acaba el movimiento');
279                 set(app.Texto, 'Text', 'Tras cada est imulo, pulse en la pantalla el punto donde
280
281                 % Esperar 5 segundos
282                 pause(5)
283
284                 % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia CR)
285                 concentraci on');
286                 set(app.Texto, 'Text', 'Cuando se le indique, cierre los ojos para mejorar su
287
288                 % Esperar 5 segundos
289                 pause(5)
290
291                 % Cambiar el texto del componente de texto (LIMPIAR)
292                 set(app.Texto, 'Text', '');
293
294                 % Cambiar el texto del componente de texto (cuanta atr as 3,2,1)
295                 set(app.TextoNumeros, 'Text', '3');
296                 pause(1)
297                 set(app.TextoNumeros, 'Text', '2');
298                 pause(1)
299                 set(app.TextoNumeros, 'Text', '1');
300                 pause(1)
301                 set(app.TextoNumeros, 'Text', '');
302
303             elseif twice == 0
304
305                 % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia FS)
306                 set(app.Texto, 'Text', 'Un nuevo movimiento');
307
308                 % Esperar 1 segundo
309                 pause(1)
310
311                 % Cambiar el texto del componente de texto (LIMPIAR)
312                 set(app.Texto, 'Text', '');
313
314                 % Cambiar el texto del componente de texto (cuenta atr as 3,2,1)
315                 set(app.TextoNumeros, 'Text', '3');
316                 pause(1)
317                 set(app.TextoNumeros, 'Text', '2');
318                 pause(1)
319                 set(app.TextoNumeros, 'Text', '1');
320                 pause(1)
```

```

315         set(app.TextoNumeros, 'Text', '');
316
317     end
318
319
320     % Ejecutar los c odigos correspondientes
321     deshabilitar_botones_experimento1(app);
322     indice = numeros_aleatorios(i);
323     codigo_vibracion = app.codigos_vibracionFS(indice,1:13);
324     eval(codigo_vibracion);
325
326     % Mostrar direccion del movimiento
327     if app.direccion == 0
328         set(app.FlechaDerecha, 'Visible', 'on');
329     else
330         set(app.FlechaIzquierda, 'Visible', 'on');
331     end
332
333     % Esperar 1 segundo
334     pause(1);
335
336     if twice == 0
337
338         % Actualizar variables para repetir todas las vibraciones una vez
339         twice = 1;
340         i=i-1;
341
342         % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia FS)
343         set(app.Texto, 'Text', 'Atento/a, se le repetir a el movimiento anterior');
344
345         % Esperar 2 segundos
346         pause(2);
347
348         % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia FS)
349         set(app.Texto, 'Text', 'Por favor, cierre los ojos');
350
351         % Esperar 2 segundos
352         pause(2);
353
354         % CCambiar el texto del componente de texto (LIMPIAR)
355         set(app.Texto, 'Text', ' ');
356
357     else
358
359         % Actualizar variable para repetir todas las vibraciones una vez
360         twice = 0;
361
362         % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia FS)
363         set(app.Texto, 'Text', 'Pulse en la pantalla donde crea que ha acabado el
364 movimiento');
365
366         % Esperar 1 segundo
367         pause(1);
368
369         % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia FS)
370         set(app.TextoRepetir, 'Text', 'Puede repetir el est imulo si no est a seguro/a de
371 su respuesta');
372
373         % Habilitar el espacio de respuesta
374         habilitar_botones_experimento1(app);
375         set(app.Repetir, 'Visible', 'on');
376         set(app.Repetir, 'Enable', 'on');
377
378         % Detener el programa hasta recibir respuesta
379         uiwait(app.UIFigure);
380
381         % Cambiar el texto del componente de texto despu es de la ejecuci on del c odigo
382         de movimiento
383         set(app.Texto, 'Text', ' ');
384         set(app.TextoRepetir, 'Text', ' ');
385
386         % Gestion del boton repetir
387         if app.repetir == 1
388
389             % Actualizar variables para repetir la ilusion tactil
390             app.repetir = 0;
391             i=i-1;
392             twice = 1;
393
394             % Deshabilitar el espacio de respuesta

```

```
392     deshabilitar_botones_experimento1(app);
393     set(app.Repetir, 'Visible', 'off');
394     set(app.Repetir, 'Enable', 'off');
395
396     % Cambiar el texto del componente de texto (cuenta atras 3,2,1)
397     set(app.TextoNumeros, 'Text', '3');
398     pause(1)
399     set(app.TextoNumeros, 'Text', '2');
400     pause(1)
401     set(app.TextoNumeros, 'Text', '1');
402     pause(1)
403     set(app.TextoNumeros, 'Text', '');
404
405     else
406
407     % Actualizar matriz de resultados
408     app.matriz_experimentos(indice) = app.experimento;
409
410     % Ocultar direcci on del movimiento
411     if app.direccion == 0
412         set(app.FlechaDerecha, 'Visible', 'off');
413     else
414         set(app.FlechaIzquierda, 'Visible', 'off');
415     end
416
417     end
418
419     % Deshabilitar el espacio de respuesta
420     deshabilitar_botones_experimento1(app);
421     set(app.Repetir, 'Visible', 'off');
422     set(app.Repetir, 'Enable', 'off');
423
424     end
425
426     elseif app.experiencia == 2
427
428     if introduccion_CR == 0
429
430         % Actualizaci on de la variable que permite realizar la introducci on a CR una
431         vez
432         introduccion_CR=1;
433
434         % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia CR)
435         set(app.Texto, 'Text', 'Ha comenzado la experiencia dedicada a PUNTOS QUE SALTAN');
436
437     );
438
439     % Esperar 4 segundos
440     pause(4);
441
442     % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia CR)
443     set(app.Texto, 'Text', 'Se le presentar an movimientos discontinuos de un punto
444     en el mango que sujeta');
445
446     % Esperar 5 segundos
447     pause(5);
448
449     % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia CR)
450     set(app.Texto, 'Text', 'Los movimientos pueden ser de derecha a izquierda o de
451     izquierda a derecha');
452
453     % Esperar 5 segundos
454     pause(5);
455
456     % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia CR)
457     set(app.Texto, 'Text', 'Tras cada est imulo, pulse en la pantalla el punto donde
458     crea que acaba el movimiento');
459
460     % Esperar 5 segundos
461     pause(5);
462
463     % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia CR)
464     set(app.Texto, 'Text', 'Cuando se le indique, cierre los ojos para mejorar su
465     concentraci on');
466
467     % Esperar 4 segundos
468     pause(4);
469
470     % Cambiar el texto del componente de texto (LIMPIAR)
```

```
466         set(app.Texto, 'Text', '');
467
468         % Cambiar el texto del componente de texto (cuenta atras 3,2,1)
469         set(app.TextoNumeros, 'Text', '3');
470         pause(1)
471         set(app.TextoNumeros, 'Text', '2');
472         pause(1)
473         set(app.TextoNumeros, 'Text', '1');
474         pause(1)
475         set(app.TextoNumeros, 'Text', '');
476
477     elseif twice == 0
478
479         % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia CR)
480         set(app.Texto, 'Text', 'Un nuevo movimiento');
481
482         % Esperar 1 segundos
483         pause(1)
484
485         % Cambiar el texto del componente de texto (LIMPIAR)
486         set(app.Texto, 'Text', '');
487
488         % Cambiar el texto del componente de texto (cuenta atras 3,2,1)
489         set(app.TextoNumeros, 'Text', '3');
490         pause(1)
491         set(app.TextoNumeros, 'Text', '2');
492         pause(1)
493         set(app.TextoNumeros, 'Text', '1');
494         pause(1)
495         set(app.TextoNumeros, 'Text', '');
496
497     end
498
499
500     % Ejecutar los codigos correspondientes
501     deshabilitar_botones_experimento1(app);
502     indice = numeros_aleatorios(i);
503     codigo_vibracion = app.codigos_vibracionCR(indice,1:13);
504     eval(codigo_vibracion);
505
506     % Mostrar direccion del movimiento
507     if app.direccion == 0
508         set(app.FlechaDerecha, 'Visible', 'on');
509     else
510         set(app.FlechaIzquierda, 'Visible', 'on');
511     end
512
513     % Esperar 1 segundo
514     pause(1);
515
516     if twice == 0
517
518         % Actualizar variables para repetir todas las vibraciones una vez
519         twice = 1;
520         i=i-1;
521
522         % Cambiar el texto del componente de texto (pregunta)
523         set(app.Texto, 'Text', 'Atento/a, se le repetir a el movimiento anterior');
524
525         % Esperar 2 segundos
526         pause(2);
527
528         % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia FS)
529         set(app.Texto, 'Text', 'Por favor, cierre los ojos');
530
531         % Esperar 2 segundos
532         pause(2);
533
534         % Cambiar el texto del componente de texto (LIMPIAR)
535         set(app.Texto, 'Text', '');
536
537         % Cambiar el texto del componente de texto (cuenta atras 3,2,1)
538         set(app.TextoNumeros, 'Text', '3');
539         pause(1)
540         set(app.TextoNumeros, 'Text', '2');
541         pause(1)
542         set(app.TextoNumeros, 'Text', '1');
543         pause(1)
544         set(app.TextoNumeros, 'Text', '');
545
```

```
546         else
547             % Actualizar variable para repetir todas las vibraciones una vez
548             twice = 0;
549             % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia CR)
550             set(app.Texto, 'Text', 'Pulse en la pantalla donde crea que ha acabado el
551             movimiento');
552             % Esperar 1 segundo
553             pause(1);
554             % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia CR)
555             set(app.TextoRepetir, 'Text', 'Puede repetir el est imulo si no est a seguro/a de
556             su respuesta');
557             % Habilitar el espacio de respuesta
558             habilitar_botones_experimento1(app);
559             set(app.Repetir, 'Visible', 'on');
560             set(app.Repetir, 'Enable', 'on');
561             % Detener el programa hasta recibir respuesta
562             uiwait(app.UIFigure);
563             % Cambiar el texto del componente de texto (LIMPIAR)
564             set(app.Texto, 'Text', ' ');
565             set(app.TextoRepetir, 'Text', ' ');
566             % Gestion del boton repetir
567             if app.repetir == 1
568                 % Actualizar variables para repetir la ilusion tactil
569                 app.repetir = 0;
570                 i=i-1;
571                 twice = 1;
572                 % Deshabilitar el espacio de respuesta
573                 deshabilitar_botones_experimento1(app);
574                 set(app.Repetir, 'Visible', 'off');
575                 set(app.Repetir, 'Enable', 'off');
576                 % Cambiar el texto del componente de texto (cuenta atras 3,2,1)
577                 set(app.TextoNumeros, 'Text', '3');
578                 pause(1)
579                 set(app.TextoNumeros, 'Text', '2');
580                 pause(1)
581                 set(app.TextoNumeros, 'Text', '1');
582                 pause(1)
583                 set(app.TextoNumeros, 'Text', ' ');
584             else
585                 % Actualizar matriz de resultados
586                 app.matriz_experimentos(indice) = app.experimento;
587                 % Ocultar direcci on del movimiento
588                 if app.direccion == 0
589                     set(app.FlechaDerecha, 'Visible', 'off');
590                 else
591                     set(app.FlechaIzquierda, 'Visible', 'off');
592                 end
593             end
594             % Deshabilitar el espacio de respuesta
595             deshabilitar_botones_experimento1(app);
596             set(app.Repetir, 'Visible', 'off');
597             set(app.Repetir, 'Enable', 'off');
598         end
599     end
600     i=i+1;
601 end
```

```
624
625     % Guardar los resultados en un fichero .xls
626     writematrix(app.matriz_experimentos',app.NombreCompleto);
627     app.matriz_experimentos=[];
628
629     % Ocultar todos los botones de la interfaz
630     ocultar_botones(app);
631
632     if app.introduccion == 2
633
634         % Cambiar el texto del componente de texto (final)
635         set(app.Texto, 'Text', 'Ya ha finalizado el experimento');
636
637         % Esperar 3 segundos
638         pause(3);
639
640         % Cambiar el texto del componente de texto (LIMPIAR)
641         set(app.Texto, 'Text', '');
642
643         % Mostrar gif 'Muchas gracias por su participaci on'
644         set(app.Image, 'Visible', 'on');
645
646     else
647
648         % Cambiar el texto del componente de texto (mitad del experimento)
649         set(app.Texto, 'Text', 'Ha completado la mitad del experimento, t omese un descanso');
650
651         % Esperar 4 segundos
652         pause(4);
653
654         % Cambiar el texto del componente de texto (LIMPIAR)
655         set(app.Texto, 'Text', '');
656
657         % Descanso de 2 minutos
658         for j=1:120
659             set(app.TextoNumeros, 'Text', num2str(121-j));
660             pause(1);
661         end
662         set(app.TextoNumeros, 'Text', '');
663
664     end
665 end
666
667 % Button pushed function: Repetir
668 function RepetirButtonPushed(app, event)
669     uiresume(app.UIFigure);
670     app.repetir = 1;
671 end
672
673 % Button pushed function: Siguiente
674 function SiguienteButtonPushed(app, event)
675     uiresume(app.UIFigure);
676 end
677
678 % Image clicked function: ImageSoporte
679 function ImageSoporteClicked(app, event)
680     uiresume(app.UIFigure);
681     coordenada=app.UIFigure.CurrentPoint(1);
682     if coordenada>944
683         app.experimento = 52*coordenada/1888 - 26;
684     elseif coordenada < 944
685         app.experimento = - (26-52*coordenada/1888);
686     else
687         app.experimento=0;
688     end
689 end
690
691 % Button pushed function: IzquierdaButton
692 function IzquierdaButtonPushed(app, event)
693     uiresume(app.UIFigure);
694     app.experimento = -30;
695 end
696
697 % Button pushed function: DerechaButton
698 function DerechaButtonPushed(app, event)
699     uiresume(app.UIFigure);
700     app.experimento = 30;
701 end
702 end
703
```

```
704 % Component initialization
705 methods (Access = private)
706
707 % Create UIFigure and components
708 function createComponents(app)
709
710 % Get the file path for locating images
711 pathToMLAPP = fileparts(mfilename('fullpath'));
712
713 % Create UIFigure and hide until all components are created
714 app.UIFigure = uifigure('Visible', 'off');
715 app.UIFigure.Position = [100 100 1947 1031];
716 app.UIFigure.Name = 'MATLAB App';
717
718 % Create RecuadroFondo
719 app.RecuadroFondo = uibutton(app.UIFigure, 'push');
720 app.RecuadroFondo.BackgroundColor = [0.5804 0.5804 0.5804];
721 app.RecuadroFondo.Enable = 'off';
722 app.RecuadroFondo.Position = [27 21 1897 975];
723 app.RecuadroFondo.Text = '';
724
725 % Create RecuadroBotones
726 app.RecuadroBotones = uibutton(app.UIFigure, 'push');
727 app.RecuadroBotones.FontColor = [0.9608 0.9608 0.9608];
728 app.RecuadroBotones.Position = [32 454 1887 137];
729 app.RecuadroBotones.Text = '';
730
731 % Create RecuadroMano
732 app.RecuadroMano = uibutton(app.UIFigure, 'push');
733 app.RecuadroMano.BackgroundColor = [0.5804 0.5804 0.5804];
734 app.RecuadroMano.FontSize = 72;
735 app.RecuadroMano.Enable = 'off';
736 app.RecuadroMano.Position = [851 436 250 171];
737 app.RecuadroMano.Text = 'Mano';
738
739 % Create TextoNumeros
740 app.TextoNumeros = uilabel(app.UIFigure);
741 app.TextoNumeros.HorizontalAlignment = 'center';
742 app.TextoNumeros.WordWrap = 'on';
743 app.TextoNumeros.FontSize = 200;
744 app.TextoNumeros.Position = [762 590 425 271];
745 app.TextoNumeros.Text = '';
746
747 % Create Image
748 app.Image = uiimage(app.UIFigure);
749 app.Image.Position = [604 605 738 175];
750 app.Image.ImageSource = fullfile(pathToMLAPP, 'logo-participar.png');
751
752 % Create Siguiete
753 app.Siguiete = uibutton(app.UIFigure, 'push');
754 app.Siguiete.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @SiguieteButtonPushed, true);
755 app.Siguiete.Icon = fullfile(pathToMLAPP, '20230630_120541_0000.png');
756 app.Siguiete.Position = [869 419 211 205];
757 app.Siguiete.Text = '';
758
759 % Create EjecutarButton
760 app.EjecutarButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
761 app.EjecutarButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @EjecutarButtonPushed, true);
762 app.EjecutarButton.Icon = fullfile(pathToMLAPP, '20230630_120533_0000.png');
763 app.EjecutarButton.Position = [121 753 116 115];
764 app.EjecutarButton.Text = '';
765
766 % Create TextoRepetir
767 app.TextoRepetir = uilabel(app.UIFigure);
768 app.TextoRepetir.HorizontalAlignment = 'center';
769 app.TextoRepetir.WordWrap = 'on';
770 app.TextoRepetir.FontSize = 24;
771 app.TextoRepetir.Position = [580 636 791 72];
772 app.TextoRepetir.Text = '';
773
774 % Create Texto
775 app.Texto = uilabel(app.UIFigure);
776 app.Texto.HorizontalAlignment = 'center';
777 app.Texto.WordWrap = 'on';
778 app.Texto.FontSize = 36;
779 app.Texto.Position = [35 697 1881 64];
780 app.Texto.Text = '';
781
782 % Create Repetir
783 app.Repetir = uibutton(app.UIFigure, 'push');
```

```
784 app.Repetir.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @RepetirButtonPushed, true);
785 app.Repetir.Icon = fullfile(pathToMLAPP, '20230630_120537_0000.png');
786 app.Repetir.IconAlignment = 'center';
787 app.Repetir.Position = [121 98 116 115];
788 app.Repetir.Text = '';
789
790 % Create ImageSoporte
791 app.ImageSoporte = uiimage(app.UIFigure);
792 app.ImageSoporte.ImageClickedFcn = createCallbackFcn(app, @ImageSoporteClicked, true);
793 app.ImageSoporte.Position = [30 449 1888 147];
794 app.ImageSoporte.ImageSource = fullfile(pathToMLAPP, 'pppp10.jpg');
795
796 % Create IzquierdaButton
797 app.IzquierdaButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
798 app.IzquierdaButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @IzquierdaButtonPushed, true);
799 app.IzquierdaButton.FontSize = 48;
800 app.IzquierdaButton.Position = [32 299 63 137];
801 app.IzquierdaButton.Text = '<=';
802
803 % Create DerechaButton
804 app.DerechaButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
805 app.DerechaButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @DerechaButtonPushed, true);
806 app.DerechaButton.FontSize = 48;
807 app.DerechaButton.Position = [1857 299 63 137];
808 app.DerechaButton.Text = '=>';
809
810 % Create FlechaDerecha
811 app.FlechaDerecha = uiimage(app.UIFigure);
812 app.FlechaDerecha.Position = [851 230 250 138];
813 app.FlechaDerecha.ImageSource = fullfile(pathToMLAPP, 'Flecha_derecha.png');
814
815 % Create FlechaIzquierda
816 app.FlechaIzquierda = uiimage(app.UIFigure);
817 app.FlechaIzquierda.Position = [850 247 250 138];
818 app.FlechaIzquierda.ImageSource = fullfile(pathToMLAPP, 'Flecha_izquierda.png');
819
820 % Show the figure after all components are created
821 app.UIFigure.Visible = 'on';
822 end
823 end
824
825 % App creation and deletion
826 methods (Access = public)
827
828 % Construct app
829 function app = TFG_exp1_DEF
830
831 % Create UIFigure and components
832 createComponents(app)
833
834 % Register the app with App Designer
835 registerApp(app, app.UIFigure)
836
837 % Execute the startup function
838 runStartupFcn(app, @startupFcn)
839
840 if nargin == 0
841     clear app
842 end
843 end
844
845 % Code that executes before app deletion
846 function delete(app)
847
848 % Delete UIFigure when app is deleted
849 delete(app.UIFigure)
850 end
851 end
852
853 end
```

Código 12: Code View completo del primer experimento

### E.3. Interfaz gráfica del segundo experimento

```

1 classdef TFG_exp2_DEF < matlab.apps.AppBase
2
3     % Properties that correspond to app components
4     properties (Access = public)
5         UIFigure                matlab.ui.Figure
6         AmbosigualButton        matlab.ui.control.Button
7         NoButton                matlab.ui.control.Button
8         SiButton                matlab.ui.control.Button
9         PantallaButton          matlab.ui.control.Button
10        ManoButton              matlab.ui.control.Button
11        Repetir                 matlab.ui.control.Button
12        Texto                   matlab.ui.control.Label
13        Texto2                   matlab.ui.control.Label
14        EjecutarButton          matlab.ui.control.Button
15        Continuar                matlab.ui.control.Button
16        Image                    matlab.ui.control.Image
17        IdenticosButton         matlab.ui.control.Button
18        MuysimilaresButton      matlab.ui.control.Button
19        SeparecenButton         matlab.ui.control.Button
20        DistintosButton         matlab.ui.control.Button
21        TotalmentediferentesButton matlab.ui.control.Button
22        TextoNumeros            matlab.ui.control.Label
23        grafica                  matlab.ui.control.UIAxes
24        UIAxes                   matlab.ui.control.UIAxes
25    end
26
27
28    properties (Access = public)
29
30        codigos_movimientoFS     % Matriz que contiene los codigos que ejecutan el movimiento de la bola
31        codigos_movimientoCR     % Matriz que contiene los codigos que ejecutan el movimiento de la bola
32        codigos_vibracionFS      % Matriz que contiene los codigos que ejecutan las vibraciones de los
33        actuadores
34        codigos_vibracionCR      % Matriz que contiene los codigos que ejecutan las vibraciones de los
35        actuadores
36        matriz_experimentos      % Matriz que guarda los resultados del experimento completo
37        experimento              % Valor numerico que el usuario marca al acabar cada parte del
38        experimento
39        experimento2             % Valor numerico de la pregunta adicional al usuario en CR
40        experimento3            % Valor numerico de la pregunta segunda adicional al usuario en CR
41
42        punto                    % Punto que se mueve
43        inicio                   % Variable empleada para controlar el inicio del movimiento del pto
44        fin                       % Variable empleada para controlar el final del movimiento del pto
45        continuidad              % Variable utilizada para controlar la continuidad del movimiento del
46        punto (0, movimiento continuo y >0 movimiento discontinuo)
47        duracion                 % Variable que controla la duracion del movimiento del pto
48        direccion                % Variable que controla la direccion del movimiento del pto
49
50        Nombre                   % Nombre del usuario
51        Apellido                 % Apellido del usuario
52        NombreCompleto           % Nombre del archivo donde se guardaran los resultados del experimento
53
54        introduccion             % Variable que indica la completitud de la experiencia
55        repetir                  % Variable empleada para gestionar la repeticion de las ilusiones
56        experiencia              % Variable que indica la experiencia a realizarm(SFM o CR)
57
58    end
59
60    methods (Access = private)
61
62        function deshabilitar_botones_pregunta1(app)
63
64            % Deshabilitar el botones
65            set(app.TotalmentediferentesButton, 'Enable', 'off');
66            set(app.DistintosButton, 'Enable', 'off');
67            set(app.SeparecenButton, 'Enable', 'off');
68            set(app.MuysimilaresButton, 'Enable', 'off');
69            set(app.IdenticosButton, 'Enable', 'off');
70
71            % Hacer invisibles los botones
72            set(app.TotalmentediferentesButton, 'Visible', 'off');
73            set(app.DistintosButton, 'Visible', 'off');
74            set(app.SeparecenButton, 'Visible', 'off');
75            set(app.MuysimilaresButton, 'Visible', 'off');
76            set(app.IdenticosButton, 'Visible', 'off');
77
78        end
79
80    end
81
82 end

```

```
76
77
78     function habilitar_botones_pregunta1(app)
79
80         % Habilitar el botones
81         set(app.TotalmentediferentesButton, 'Enable', 'on');
82         set(app.DistintosButton, 'Enable', 'on');
83         set(app.SeparecenButton, 'Enable', 'on');
84         set(app.MuysimilaresButton, 'Enable', 'on');
85         set(app.IdenticosButton, 'Enable', 'on');
86
87         % Hacer visibles los botones
88         set(app.TotalmentediferentesButton, 'Visible', 'on');
89         set(app.DistintosButton, 'Visible', 'on');
90         set(app.SeparecenButton, 'Visible', 'on');
91         set(app.MuysimilaresButton, 'Visible', 'on');
92         set(app.IdenticosButton, 'Visible', 'on');
93
94         % Ocultar el punto
95         set(app.punto, 'Visible', 'off');
96
97     end
98
99
100    function deshabilitar_botones_pregunta2(app)
101
102        % Deshabilitar los botones
103        set(app.ManoButton, 'Enable', 'off');
104        set(app.PantallaButton, 'Enable', 'off');
105        set(app.AmbosigualButton, 'Enable', 'off');
106
107        % Hacer invisibles los botones
108        set(app.ManoButton, 'Visible', 'off');
109        set(app.PantallaButton, 'Visible', 'off');
110        set(app.AmbosigualButton, 'Visible', 'off');
111
112    end
113
114    function habilitar_botones_pregunta2(app)
115
116        % Habilitar los botones
117        set(app.ManoButton, 'Enable', 'on');
118        set(app.PantallaButton, 'Enable', 'on');
119        set(app.AmbosigualButton, 'Enable', 'on');
120
121        % Hacer visibles los botones
122        set(app.ManoButton, 'Visible', 'on');
123        set(app.PantallaButton, 'Visible', 'on');
124        set(app.AmbosigualButton, 'Visible', 'on');
125
126    end
127
128    function deshabilitar_botones_pregunta3(app)
129
130        % Deshabilitar los botones
131        set(app.SiButton, 'Enable', 'off');
132        set(app.NoButton, 'Enable', 'off');
133
134        % Hacer invisibles los botones
135        set(app.SiButton, 'Visible', 'off');
136        set(app.NoButton, 'Visible', 'off');
137
138    end
139
140
141    function habilitar_botones_pregunta3(app)
142
143        % Habilitar los botones
144        set(app.SiButton, 'Enable', 'on');
145        set(app.NoButton, 'Enable', 'on');
146
147        % Hacer visibles los botones
148        set(app.SiButton, 'Visible', 'on');
149        set(app.NoButton, 'Visible', 'on');
150
151    end
152
153    function movimientoPunto(app)
154
155        % Calcular la velocidad del punto
```

```
156     velocidad = (app.fin - app.inicio) / app.duracion;
157
158     % Configurar el grafico
159     app.punto = plot(app.grafica, app.inicio, 0, 'o', 'MarkerSize',20, 'MarkerEdgeColor','r', '
MarkerFaceColor','r');
160     set(app.punto, 'Visible', 'on');
161     xlim(app.grafica, [0, 52]);
162     ylim(app.grafica, [-1, 1]);
163     grid(app.grafica, 'on');
164
165     % Iniciar temporizador
166     tic;
167
168     % Fijar posicion inicial (xo)
169     pos_inicial= app.inicio;
170
171     if app.inicio < app.fin
172
173         % Mover el app.punto (x = xo + vo*t)
174         while app.inicio < app.fin
175
176             % Actualizar la posicion del app.punto
177             app.inicio = pos_inicial + velocidad*toc;
178
179             % Dibujar el app.punto en la grafica
180             app.punto=plot(app.grafica, app.inicio, 0, 'o', 'MarkerSize',40, 'MarkerEdgeColor','r
', 'MarkerFaceColor','r');
181             set(app.punto, 'Visible', 'on');
182             drawnow;
183
184             % Eliminar el app.punto entre iteraciones en CR
185             if app.continuidad ~= 0
186
187                 set(app.punto, 'Visible', 'off');
188
189             end
190
191             % Esperar un breve periodo de tiempo para mantener una velocidad constante
192             pause(app.continuidad);
193
194         end
195
196     else
197
198         % Mover el app.punto (x = xo + vo*t)
199         while app.inicio > app.fin
200
201             % Actualizar la posicion del app.punto
202             app.inicio = pos_inicial + velocidad*toc;
203
204             % Dibujar el app.punto en la grafica
205             app.punto=plot(app.grafica, app.inicio, 0, 'o', 'MarkerSize',40, 'MarkerEdgeColor','r
', 'MarkerFaceColor','r');
206             set(app.punto, 'Visible', 'on');
207             drawnow;
208
209             % Eliminar el app.punto entre iteraciones en CR
210             if app.continuidad ~= 0
211
212                 set(app.punto, 'Visible', 'off');
213
214             end
215
216             % Esperar un breve periodo de tiempo para mantener una velocidad constante
217             pause(app.continuidad);
218
219         end
220
221     end
222
223     end
224
225     end
226
227     end
228
229
230
231
232
```

```

233
234     end
235
236
237
238     % Callbacks that handle component events
239     methods (Access = private)
240
241         % Code that executes after component creation
242         function startupFcn(app)
243
244             % Inicializar variable repetir
245             app.repetir = 0;
246
247             % Inicializar las matrices con los codigos que se ejecutan
248             app.codigos_vibracionFS = ['Vib_FS_050_ID'; 'Vib_FS_100_ID'; 'Vib_FS_250_ID'; 'Vib_FS_050_ID'
249 ; 'Vib_FS_100_ID'; 'Vib_FS_250_ID';
250     'Vib_FS_050_ID'; 'Vib_FS_100_ID'; 'Vib_FS_250_ID'; 'Vib_FS_050_ID'; 'Vib_FS_100_ID'; '
251     Vib_FS_250_ID';
252     'Vib_FS_050_ID'; 'Vib_FS_100_ID'; 'Vib_FS_250_ID'; 'Vib_FS_050_ID'; 'Vib_FS_100_ID'; '
253     Vib_FS_250_ID'];
254             app.codigos_vibracionCR = ['Vib_CR_470_ID'; 'Vib_CR_470_ID'; 'Vib_CR_470_ID'; 'Vib_CR_470_ID'
255 ; 'Vib_CR_470_ID';
256     'Vib_CR_470_ID'; 'Vib_CR_470_ID'; 'Vib_CR_470_ID'; 'Vib_CR_470_ID'; 'Vib_CR_470_ID';
257     'Vib_CR_470_ID'; 'Vib_CR_470_ID'; 'Vib_CR_470_ID'; 'Vib_CR_470_ID'; 'Vib_CR_470_ID'];
258             app.codigos_movimientoFS = ['Mov_FS_035cm_05s'; 'Mov_FS_035cm_10s'; 'Mov_FS_035cm_25s'; '
259     Mov_FS_07Acm_05s'; 'Mov_FS_07Acm_10s'; 'Mov_FS_07Acm_25s';
260     'Mov_FS_07Bcm_05s'; 'Mov_FS_07Bcm_10s'; 'Mov_FS_07Bcm_25s'; 'Mov_FS_20Acm_05s'; '
261     Mov_FS_20Acm_10s'; 'Mov_FS_20Acm_25s';
262     'Mov_FS_20Bcm_05s'; 'Mov_FS_20Bcm_10s'; 'Mov_FS_20Bcm_25s'; 'Mov_FS_400cm_05s'; '
263     Mov_FS_400cm_10s'; 'Mov_FS_400cm_25s'];
264             app.codigos_movimientoCR = ['Mov_CR_06ptos_07Acm'; 'Mov_CR_06ptos_07Bcm'; '
265     Mov_CR_06ptos_20Acm'; 'Mov_CR_06ptos_20Bcm'; 'Mov_CR_06ptos_400cm';
266     'Mov_CR_10ptos_07Acm'; 'Mov_CR_10ptos_07Bcm'; 'Mov_CR_10ptos_20Acm'; 'Mov_CR_10ptos_20Bcm
267     '; 'Mov_CR_10ptos_400cm';
268     'Mov_CR_15ptos_07Acm'; 'Mov_CR_15ptos_07Bcm'; 'Mov_CR_15ptos_20Acm'; 'Mov_CR_15ptos_20Bcm
269     '; 'Mov_CR_15ptos_400cm'];];
270
271             % Inicializar la matriz de resultados
272             app.matriz_experimentos = [];
273
274             % Inicializar Design View
275             deshabilitar_botones_pregunta1(app);
276             deshabilitar_botones_pregunta2(app);
277             deshabilitar_botones_pregunta3(app);
278
279             set(app.Repetir, 'Visible', 'off');
280             set(app.Repetir, 'Enable', 'off');
281             set(app.Continuar, 'Visible', 'off');
282             set(app.Continuar, 'Enable', 'off');
283             set(app.Image, 'Visible', 'off');
284
285             imagen_fondo=imread('interfaz2_fondo4.jpg','jpg');
286             imshow(imagen_fondo, 'Parent', app.UIAxes);
287
288             % Preguntar al usuario su nombre
289             nombre = inputdlg('Por favor, ingrese el nombre del participante:', 'Nombre', [1 60]);
290
291             % Almacenar la respuesta del usuario en una variable
292             if ~isempty(nombre)
293                 app.Nombre = nombre{1};
294             end
295
296             % Preguntar al usuario su primer apellido
297             apellido = inputdlg('Por favor, ingrese el primer apellido del participante:', 'Primer
298     apellido', [1 60]);
299
300             % Almacenar la respuesta del usuario en una variable
301             if ~isempty(apellido)
302                 app.Apellido = apellido{1};
303             end
304
305             % Preguntar al usuario el experimento a realizar
306             pregunta1 = inputdlg('Indique la experiencia a realizar:', 'SFM o CR', [1 60]);
307
308

```

```
302 % Almacenar la respuesta del usuario en una variable
303 if ~isempty(pregunta1)
304     respuesta1 = pregunta1{1};
305 end
306
307 if strcmp (respuesta1, 'SFM')
308     app.experiencia = 1;
309 elseif strcmp (respuesta1, 'CR')
310     app.experiencia = 2;
311 end
312
313
314 % Preguntar al usuario si es el primer experimento que realiza
315 pregunta2 = inputdlg(' Es la primera experiencia que realiza ', 'si o no', [1 60]);
316
317 % Almacenar la respuesta del usuario en una variable
318 if ~isempty(pregunta2)
319     respuesta2 = pregunta2{1};
320 end
321
322 if strcmp (respuesta2, 'si')
323     app.introduccion = 1;
324 elseif strcmp (respuesta2, 'no')
325     app.introduccion = 2;
326 end
327 end
328
329 % Button pushed function: EjecutarButton
330 function EjecutarButtonPushed(app, event)
331 % Deshabilitar el boton Ejecutar
332 set(app.EjecutarButton, 'Visible', 'off');
333 set(app.EjecutarButton, 'Enable', 'off');
334
335 if app.introduccion == 1
336     % Cambiar el texto del componente de texto (introduccion)
337     set(app.Texto, 'Text', 'Bienvenido/a al experimento de puntos moviles');
338
339     % Esperar 4 segundos
340     pause(5);
341
342     % Cambiar el texto del componente de texto (LIMPIAR)
343     set(app.Texto, 'Text', '');
344
345 end
346
347
348
349 if app.experiencia == 1
350
351     % Nombre del fichero que se creara tras realizar la experiencia de FS
352     app.NombreCompleto = [app.Nombre app.Apellido '_Exp2_FS.xlsx'];
353
354     % Cambiar el texto del componente de texto (entrenamiento experiencia FS)
355     set(app.Texto, 'Text', 'Cuando este preparado pulse el boton Siguiente para comenzar la
experiencia de MOVIMIENTOS CONTINUOS');
356
357     % Fin de la introduccion para FS (actualizacion de variables)
358     introduccion_FS = 0;
359
360     % Generar n numeros del 1 al n de forma aleatoria y sin repetir
361     numeros_aleatorios = randperm(18,18);
362
363     % Pulsar boton para continuar
364     set(app.Continuar, 'Visible', 'on');
365     set(app.Continuar, 'Enable', 'on');
366
367     % Detener el programa hasta recibir respuesta
368     uiwait(app.UIFigure);
369     set(app.Texto, 'Text', '');
370
371     % Deshabilitar el boton de continuar
372     set(app.Continuar, 'Visible', 'off');
373     set(app.Continuar, 'Enable', 'off');
374
375 elseif app.experiencia == 2
376
377     % Nombre del fichero que se creara tras realizar la experiencia de CR
378     app.NombreCompleto = [app.Nombre app.Apellido '_Exp2_CR.xlsx'];
379
380     % Cambiar el texto del componente de texto (entrenamiento experiencia CR)
```

```
381     set(app.Texto, 'Text', 'Cuando este preparado pulse el boton Siguiente para comenzar la
    experiencia PUNTOS QUE SALTAN');
382
383     % Fin de la introduccion para CR (actualizacion de variables)
384     introduccion_CR = 0;
385
386     % Generar n numeros del 1 al n de forma aleatoria y sin repetir
387     numeros_aleatorios = randperm(15,15);
388
389     % Pulsar boton para continuar
390     set(app.Continuar, 'Visible', 'on');
391     set(app.Continuar, 'Enable', 'on');
392
393     % Detener el programa hasta recibir respuesta
394     uiwait(app.UIFigure);
395     set(app.Texto, 'Text', '');
396
397     % Deshabilitar el boton de continuar
398     set(app.Continuar, 'Visible', 'off');
399     set(app.Continuar, 'Enable', 'off');
400
401     end
402
403
404     % Inicializar variable que controla el avance en el bucle while
405     i=1;
406
407     % Inicializar variable que permite repetir todas las vibraciones una vez
408     twice = 0;
409
410     % Bucle que ejecuta el conjunto de experiencias
411     while i <= length(numeros_aleatorios)
412
413         if app.experiencia == 1
414
415             if introduccion_FS == 0
416
417                 % Actualizacion de la variable que permite realizar la introduccion a las FS una
418                 vez
419                 introduccion_FS=1;
420
421                 % Cambiar el texto del componente de texto (inicio experiencia FS)
422                 set(app.Texto, 'Text', 'Ha comenzado la experiencia dedicada a MOVIMIENTOS
423                 CONTINUOS');
424
425                 % Esperar 5 segundos
426                 pause(5)
427
428                 % Cambiar el texto del componente de texto (inicio experiencia FS)
429                 set(app.Texto, 'Text', 'Se le presentaran movimientos continuos de un punto en el
430                 mango que sujeta');
431
432                 % Esperar 5 segundos
433                 pause(5)
434
435                 % Cambiar el texto del componente de texto (inicio experiencia FS)
436                 set(app.Texto, 'Text', 'Los movimientos pueden ser de derecha a izquierda o de
437                 izquierda a derecha');
438
439                 % Esperar 5 segundos
440                 pause(5)
441
442                 % Cambiar el texto del componente de texto (LIMPIAR)
443                 set(app.Texto, 'Text', '');
444
445                 % Cambiar el texto del componente de texto (cuanta atras 3,2,1)
446                 set(app.TextoNumeros, 'Text', '3');
447                 pause(1)
448                 set(app.TextoNumeros, 'Text', '2');
449                 pause(1)
450                 set(app.TextoNumeros, 'Text', '1');
451                 pause(1)
452                 set(app.TextoNumeros, 'Text', ' ');
453                 pause(1)
454                 set(app.TextoNumeros, 'Text', ' ');
```

```
455
456         elseif twice == 0
457
458             % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia FS)
459             set(app.Texto, 'Text', 'Un nuevo movimiento');
460
461             % Esperar 2 segundos
462             pause(2)
463
464             % Cambiar el texto del componente de texto (LIMPIAR)
465             set(app.Texto, 'Text', '');
466
467             % Cambiar el texto del componente de texto (cuenta atras 3,2,1)
468             set(app.TextoNumeros, 'Text', '3');
469             pause(1)
470             set(app.TextoNumeros, 'Text', '2');
471             pause(1)
472             set(app.TextoNumeros, 'Text', '1');
473             pause(1)
474             set(app.TextoNumeros, 'Text', ' ');
475
476         end
477
478         % Ejecutar los codigos correspondientes
479         indice = numeros_aleatorios(i);
480         codigo_movimiento = app.codigos_movimientoFS(indice,1:16);
481         codigo_vibracion = app.codigos_vibracionFS(indice,1:13);
482         eval(codigo_movimiento);
483
484         % Visualizar pto que se mueve
485         eval(codigo_vibracion),
486         movimientoPunto(app);
487
488         % Esperar 2 segundos
489         pause(2);
490
491         if twice == 0
492
493             % Actualizar variables para repetir todas las vibraciones una vez
494             twice = 1;
495             i=i-1;
496
497             % Ocultar punto
498             set(app.punto, 'Visible', 'off');
499
500             % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia FS)
501             set(app.Texto, 'Text', 'Atento/a, se le repetira el movimiento anterior');
502
503             % Esperar 2 segundos
504             pause(2);
505
506             % Cambiar el texto del componente de texto (LIMPIAR)
507             set(app.Texto, 'Text', ' ');
508
509         else
510
511             % Actualizar variable para repetir todas las vibraciones una vez
512             twice = 0;
513
514             % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia FS)
515             set(app.Texto, 'Text', 'Evalua el grado de semejanza entre el punto de la
516             pantalla y el movimiento en el mango');
517
518             % Esperar 1 segundo
519             pause(1);
520
521             % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia FS)
522             set(app.Texto2, 'Text', 'Puede repetir el estimulo si no esta seguro/a de su
523             respuesta');
524
525             % Habilitar el espacio de respuesta
526             habilitar_botones_pregunta1(app);
527             set(app.Repetir, 'Visible', 'on');
528             set(app.Repetir, 'Enable', 'on');
529
530             % Detener el programa hasta recibir respuesta
531             uiwait(app.UIFigure);
532
533             % Cambiar el texto del componente de texto (LIMPIAR)
```

```
533 set(app.Texto, 'Text', ' ');
534 set(app.Texto2, 'Text', ' ');
535
536 % Gestion del boton reiniciar
537 if app.repetir == 1
538
539     % Actualizar variables para repetir la ilusion tactil
540     app.repetir = 0;
541     i=i-1;
542     twice = 1;
543
544     % Deshabilitar el espacio de respuesta
545     deshabilitar_botones_pregunta1(app);
546     set(app.Repetir, 'Visible', 'off');
547     set(app.Repetir, 'Enable', 'off');
548
549     % Cambiar el texto del componente de texto (cuenta atras 3,2,1)
550     set(app.TextoNumeros, 'Text', '3');
551     pause(1)
552     set(app.TextoNumeros, 'Text', '2');
553     pause(1)
554     set(app.TextoNumeros, 'Text', '1');
555     pause(1)
556     set(app.TextoNumeros, 'Text', ' ');
557
558 else
559
560     % Actualizar matriz de resultados
561     app.matriz_experimentos(indice) = app.experimento;
562
563 end
564
565 % Deshabilitar el espacio de respuesta
566 deshabilitar_botones_pregunta1(app);
567 set(app.Repetir, 'Visible', 'off');
568 set(app.Repetir, 'Enable', 'off');
569
570 end
571
572 elseif app.experiencia == 2
573
574     if introduccion_CR == 0
575
576         % Actualizacion de la variable que permite realizar la introduccion a CR una vez
577         introduccion_CR=1;
578
579         % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia CR)
580         set(app.Texto, 'Text', 'Ha comenzado la experiencia dedicada a PUNTOS QUE SALTAN'
581 );
582
583         % Esperar 5 segundos
584         pause(5)
585
586         % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia CR)
587         set(app.Texto, 'Text', 'Se le presentaran movimientos discontinuos de un punto en
588 el mango que sujeta');
589
590         % Esperar 5 segundos
591         pause(5)
592
593         % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia CR)
594         set(app.Texto, 'Text', 'Los movimientos pueden ser de derecha a izquierda o de
595 izquierda a derecha');
596
597         % Esperar 5 segundos
598         pause(5)
599
600         % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia CR)
601         set(app.Texto, 'Text', 'Tras cada estimulo, responda a las preguntas que le
602 apareceran en pantalla');
603
604         % Esperar 5 segundos
605         pause(5)
606
607         % Cambiar el texto del componente de texto (LIMPIAR)
608         set(app.Texto, 'Text', ' ');
609
610         % Cambiar el texto del componente de texto (cuenta atras 3,2,1)
```

```
609     set(app.TextoNumeros, 'Text', '3');
610     pause(1)
611     set(app.TextoNumeros, 'Text', '2');
612     pause(1)
613     set(app.TextoNumeros, 'Text', '1');
614     pause(1)
615     set(app.TextoNumeros, 'Text', ' ');
616
617     elseif twice == 0
618
619         % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia CR)
620         set(app.Texto, 'Text', 'Un nuevo movimiento');
621
622         % Esperar 2 segundos
623         pause(2);
624
625         % Cambiar el texto del componente de texto (LIMPIAR)
626         set(app.Texto, 'Text', '');
627
628         % Cambiar el texto del componente de texto (cuenta atras 3,2,1)
629         set(app.TextoNumeros, 'Text', '3');
630         pause(1)
631         set(app.TextoNumeros, 'Text', '2');
632         pause(1)
633         set(app.TextoNumeros, 'Text', '1');
634         pause(1)
635         set(app.TextoNumeros, 'Text', ' ');
636
637     end
638
639
640     % Ejecutar los codigos correspondientes
641     indice = numeros_aleatorios(i);
642     codigo_movimiento = app.codigos_movimientoCR(indice,1:19);
643     codigo_vibracion = app.codigos_vibracionCR(indice,1:13);
644     eval(codigo_movimiento);
645
646     % Visualizar pto que se mueve
647     eval(codigo_vibracion),
648     movimientoPunto(app);
649
650     % Esperar 2 segundos
651     pause(2);
652
653     if twice == 0
654
655         % Actualizar variables para repetir todas las vibraciones una vez
656         twice = 1;
657         i=i-1;
658
659         % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia CR)
660         set(app.Texto, 'Text', 'Atento/a, se le repetira el movimiento anterior');
661
662         % Esperar 2 segundos
663         pause(2);
664
665         % Cambiar el texto del componente de texto (LIMPIAR)
666         set(app.Texto, 'Text', ' ');
667
668         % Cambiar el texto del componente de texto (cuenta atras 3,2,1)
669         set(app.TextoNumeros, 'Text', '3');
670         pause(1)
671         set(app.TextoNumeros, 'Text', '2');
672         pause(1)
673         set(app.TextoNumeros, 'Text', '1');
674         pause(1)
675         set(app.TextoNumeros, 'Text', ' ');
676
677     else
678
679         % Actualizar variable para repetir todas las vibraciones una vez
680         twice = 0;
681
682         % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia CR)
683         set(app.Texto, 'Text', 'Evalua el grado de semejanza entre el punto de la
684         pantalla y el movimiento en el mango');
685
686         % Esperar 1 segundo
687         pause(1);
```

```
688 % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia CR)
689 set(app.Texto2, 'Text', 'Puede repetir el estimulo si no esta seguro/a de su
respuesta');
690
691 % Habilitar el espacio de respuesta
692 habilitar_botones_pregunta1(app);
693 set(app.Repetir, 'Visible', 'on');
694 set(app.Repetir, 'Enable', 'on');
695
696 % Detener el programa hasta recibir respuesta
697 uiwait(app.UIFigure);
698 set(app.punto, 'Visible', 'off');
699
700 % Cambiar el texto del componente de texto (LIMPIAR)
701 set(app.Texto, 'Text', ' ');
702 set(app.Texto2, 'Text', ' ');
703
704
705 if app.experimento ~= 5
706
707     % Ocultar botones de respuesta anterior
708     deshabilitar_botones_pregunta1(app);
709     set(app.Repetir, 'Visible', 'off');
710     set(app.Repetir, 'Enable', 'off');
711
712     % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia CR)
713     set(app.Texto, 'Text', ' Donde ha percibido mas saltos, en la mano o en la
pantalla ');
714
715     % Esperar 1 segundos
716     pause(1);
717
718     % Habilitar el espacio de la segunda respuesta
719     habilitar_botones_pregunta2(app);
720
721     % Detener el programa hasta recibir respuesta
722     uiwait(app.UIFigure);
723
724     % Deshabilitar el espacio de la segunda respuesta
725     deshabilitar_botones_pregunta2(app);
726
727     % Cambiar el texto del componente de texto (experiencia CR)
728     set(app.Texto, 'Text', ' Coinciden la direccion y la localizacion del
movimiento con el punto de la pantalla ');
729
730     % Esperar 1 segundos
731     pause(1);
732
733     % Habilitar el espacio de la tercera respuesta
734     habilitar_botones_pregunta3(app);
735
736     % Detener el programa hasta recibir respuesta
737     uiwait(app.UIFigure);
738
739     % Deshabilitar el espacio de la tercera respuesta
740     deshabilitar_botones_pregunta3(app);
741
742 else
743
744     app.experimento2=0;
745     app.experimento3=1;
746
747 end
748
749
750 % Gestion del boton reiniciar
751 if app.repetir == 1
752
753     % Actualizar variables para repetir la ilusion tactil
754     app.repetir = 0;
755     i=i-1;
756     twice = 1;
757
758     % Deshabilitar el espacio de respuesta
759     deshabilitar_botones_pregunta1(app);
760     set(app.Repetir, 'Visible', 'off');
761     set(app.Repetir, 'Enable', 'off');
762
763     % Cambiar el texto del componente de texto (cuenta atras 3,2,1)
764     set(app.TextoNumeros, 'Text', '3');
```

```
765         pause(1)
766         set(app.TextoNumeros, 'Text', '2');
767         pause(1)
768         set(app.TextoNumeros, 'Text', '1');
769         pause(1)
770         set(app.TextoNumeros, 'Text', ' ');
771
772     else
773
774         if app.experiencia == 1
775
776             % Actualizar matriz de resultados
777             app.matriz_experimentos(indice) = app.experimento;
778
779         else
780
781             % Actualizar matriz de resultados
782             app.matriz_experimentos(1,indice) = app.experimento;
783             app.matriz_experimentos(2,indice) = app.experimento2;
784             app.matriz_experimentos(3,indice) = app.experimento3;
785
786             app.experimento = 5;
787
788         end
789
790     end
791
792     end
793
794     % Deshabilitar el espacio de respuesta
795     deshabilitar_botones_pregunta1(app);
796     set(app.Repetir, 'Visible', 'off');
797     set(app.Repetir, 'Enable', 'off');
798
799     end
800
801     end
802
803
804
805     i=i+1;
806
807 end
808
809
810 % Guardar los resultados en un fichero .xls
811 writematrix(app.matriz_experimentos',app.NombreCompleto);
812 app.matriz_experimentos=[];
813
814 % Ocultar botones de respuesta
815 deshabilitar_botones_pregunta1(app);
816
817
818 if app.introduccion == 2
819
820     % Cambiar el texto del componente de texto (final)
821     set(app.Texto, 'Text', 'Ya ha finalizado el experimento');
822
823     % Esperar 3 segundos
824     pause(3);
825
826     % Cambiar el texto del componente de texto (LIMPIAR)
827     set(app.Texto, 'Text', ' ');
828
829     % Mostrar gif 'Muchas gracias por su participacion'
830     set(app.Image, 'Visible', 'on');
831
832 else
833
834     % Cambiar el texto del componente de texto (mitad del experimento)
835     set(app.Texto, 'Text', 'Ha completado la mitad del experimento, tomese un descanso');
836
837     % Esperar 4 segundos
838     pause(4);
839
840     % Cambiar el texto del componente de texto (LIMPIAR)
841     set(app.Texto, 'Text', ' ');
842
843     % Descanso de 2 minutos
844     for j=1:120
```

```
845         set(app.TextoNumeros, 'Text', num2str(121-j));
846         pause(1);
847     end
848     set(app.TextoNumeros, 'Text', '');
849
850     end
851
852     end
853
854     % Button pushed function: Repetir
855     function RepetirButtonPushed(app, event)
856         uiresume(app.UIFigure);
857         app.repetir = 1;
858     end
859
860     % Button pushed function: Continuar
861     function ContinuarButtonPushed(app, event)
862         uiresume(app.UIFigure);
863     end
864
865     % Button pushed function: TotalmentediferentesButton
866     function TotalmentediferentesButtonPushed(app, event)
867         uiresume(app.UIFigure);
868         app.experimento = 1;
869     end
870
871     % Button pushed function: DistintosButton
872     function DistintosButtonPushed(app, event)
873         uiresume(app.UIFigure);
874         app.experimento = 2;
875     end
876
877     % Button pushed function: SeparecenButton
878     function SeparecenButtonPushed(app, event)
879         uiresume(app.UIFigure);
880         app.experimento = 3;
881     end
882
883     % Button pushed function: MuysimilaresButton
884     function MuysimilaresButtonPushed(app, event)
885         uiresume(app.UIFigure);
886         app.experimento = 4;
887     end
888
889     % Button pushed function: IdenticosButton
890     function IdenticosButtonPushed(app, event)
891         uiresume(app.UIFigure);
892         app.experimento = 5;
893     end
894
895     % Button pushed function: PantallaButton
896     function PantallaButtonPushed(app, event)
897         uiresume(app.UIFigure);
898         app.experimento2=1;
899     end
900
901     % Button pushed function: ManoButton
902     function ManoButtonPushed(app, event)
903         uiresume(app.UIFigure);
904         app.experimento2=2;
905     end
906
907     % Button pushed function: SiButton
908     function SiButtonPushed(app, event)
909         uiresume(app.UIFigure);
910         app.experimento3=1;
911     end
912
913     % Button pushed function: NoButton
914     function NoButtonPushed(app, event)
915         uiresume(app.UIFigure);
916         app.experimento3=0;
917     end
918
919     % Button pushed function: AmbosigualButton
920     function AmbosigualButtonPushed(app, event)
921         uiresume(app.UIFigure);
922         app.experimento2=0;
923     end
924     end
```

```

925
926 % Component initialization
927 methods (Access = private)
928
929 % Create UIFigure and components
930 function createComponents(app)
931
932 % Get the file path for locating images
933 pathToMLAPP = fileparts(mfilename('fullpath'));
934
935 % Create UIFigure and hide until all components are created
936 app.UIFigure = uifigure('Visible', 'off');
937 app.UIFigure.Position = [100 100 1947 1031];
938 app.UIFigure.Name = 'MATLAB App';
939 app.UIFigure.Icon = fullfile(pathToMLAPP, 'interfaz2_fondo.jpg');
940
941 % Create UIAxes
942 app.UIAxes = uiaxes(app.UIFigure);
943 app.UIAxes.XTick = [];
944 app.UIAxes.YTick = [];
945 app.UIAxes.Position = [10 15 1947 1031];
946
947 % Create grafica
948 app.grafica = uiaxes(app.UIFigure);
949 app.grafica.AmbientLightColor = 'none';
950 app.grafica.TickLabelInterpreter = 'none';
951 app.grafica.GridLineStyle = 'none';
952 app.grafica.MinorGridLineStyle = 'none';
953 app.grafica.XColor = 'none';
954 app.grafica.XTick = [];
955 app.grafica.YColor = 'none';
956 app.grafica.YTick = [];
957 app.grafica.ZColor = 'none';
958 app.grafica.ZTick = [];
959 app.grafica.Color = 'none';
960 app.grafica.GridColor = [0.15 0.15 0.15];
961 app.grafica.MinorGridColor = [1 1 1];
962 app.grafica.Position = [34 475 1882 131];
963
964 % Create TextoNumeros
965 app.TextoNumeros = uilabel(app.UIFigure);
966 app.TextoNumeros.HorizontalAlignment = 'center';
967 app.TextoNumeros.WordWrap = 'on';
968 app.TextoNumeros.FontSize = 200;
969 app.TextoNumeros.Position = [710 422 508 271];
970 app.TextoNumeros.Text = '';
971
972 % Create TotalmentediferentesButton
973 app.TotalmentediferentesButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
974 app.TotalmentediferentesButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @
TotalmentediferentesButtonPushed, true);
975 app.TotalmentediferentesButton.FontSize = 36;
976 app.TotalmentediferentesButton.Position = [122 286 304 137];
977 app.TotalmentediferentesButton.Text = {'Totalmente'; 'diferentes'};
978
979 % Create DistintosButton
980 app.DistintosButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
981 app.DistintosButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @DistintosButtonPushed, true);
982 app.DistintosButton.FontSize = 36;
983 app.DistintosButton.Position = [469 286 304 137];
984 app.DistintosButton.Text = 'Distintos';
985
986 % Create SeparecenButton
987 app.SeparecenButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
988 app.SeparecenButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @SeparecenButtonPushed, true);
989 app.SeparecenButton.FontSize = 36;
990 app.SeparecenButton.Position = [811 286 304 137];
991 app.SeparecenButton.Text = 'Se parecen';
992
993 % Create MuysimilaresButton
994 app.MuysimilaresButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
995 app.MuysimilaresButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @MuysimilaresButtonPushed,
true);
996 app.MuysimilaresButton.FontSize = 36;
997 app.MuysimilaresButton.Position = [1158 286 304 137];
998 app.MuysimilaresButton.Text = 'Muy similares';
999
1000 % Create IdenticosButton
1001 app.IdenticosButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
1002 app.IdenticosButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @IdenticosButtonPushed, true);

```

```
1003 app.IdenticosButton.FontSize = 36;
1004 app.IdenticosButton.Position = [1504 286 304 137];
1005 app.IdenticosButton.Text = 'Identicos';
1006
1007 % Create Image
1008 app.Image = uiimage(app.UIFigure);
1009 app.Image.Position = [593 589 738 175];
1010 app.Image.ImageSource = fullfile(pathToMLAPP, 'logo-participar.png');
1011
1012 % Create Continuar
1013 app.Continuar = uibutton(app.UIFigure, 'push');
1014 app.Continuar.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @ContinuarButtonPushed, true);
1015 app.Continuar.Icon = fullfile(pathToMLAPP, '20230630_120541_0000.png');
1016 app.Continuar.Position = [857 437 211 205];
1017 app.Continuar.Text = '';
1018
1019 % Create EjecutarButton
1020 app.EjecutarButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
1021 app.EjecutarButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @EjecutarButtonPushed, true);
1022 app.EjecutarButton.Icon = fullfile(pathToMLAPP, '20230630_120533_0000.png');
1023 app.EjecutarButton.Position = [121 753 116 115];
1024 app.EjecutarButton.Text = '';
1025
1026 % Create Texto2
1027 app.Texto2 = uilabel(app.UIFigure);
1028 app.Texto2.HorizontalAlignment = 'center';
1029 app.Texto2.WordWrap = 'on';
1030 app.Texto2.FontSize = 24;
1031 app.Texto2.Position = [559 640 805 72];
1032 app.Texto2.Text = '';
1033
1034 % Create Texto
1035 app.Texto = uilabel(app.UIFigure);
1036 app.Texto.HorizontalAlignment = 'center';
1037 app.Texto.WordWrap = 'on';
1038 app.Texto.FontSize = 36;
1039 app.Texto.Position = [21 700 1881 64];
1040 app.Texto.Text = '';
1041
1042 % Create Repetir
1043 app.Repetir = uibutton(app.UIFigure, 'push');
1044 app.Repetir.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @RepetirButtonPushed, true);
1045 app.Repetir.Icon = fullfile(pathToMLAPP, '20230630_120537_0000.png');
1046 app.Repetir.IconAlignment = 'center';
1047 app.Repetir.Position = [121 98 116 115];
1048 app.Repetir.Text = '';
1049
1050 % Create ManoButton
1051 app.ManoButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
1052 app.ManoButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @ManoButtonPushed, true);
1053 app.ManoButton.FontSize = 36;
1054 app.ManoButton.Position = [469 286 304 137];
1055 app.ManoButton.Text = 'Mano';
1056
1057 % Create PantallaButton
1058 app.PantallaButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
1059 app.PantallaButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @PantallaButtonPushed, true);
1060 app.PantallaButton.FontSize = 36;
1061 app.PantallaButton.Position = [1158 286 304 137];
1062 app.PantallaButton.Text = 'Pantalla';
1063
1064 % Create SiButton
1065 app.SiButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
1066 app.SiButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @SiButtonPushed, true);
1067 app.SiButton.FontSize = 36;
1068 app.SiButton.Position = [639 286 304 137];
1069 app.SiButton.Text = 'Si';
1070
1071 % Create NoButton
1072 app.NoButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
1073 app.NoButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @NoButtonPushed, true);
1074 app.NoButton.FontSize = 36;
1075 app.NoButton.Position = [984 286 304 137];
1076 app.NoButton.Text = 'No';
1077
1078 % Create AmbosigualButton
1079 app.AmbosigualButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
1080 app.AmbosigualButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @AmbosigualButtonPushed, true);
1081 app.AmbosigualButton.FontSize = 36;
1082 app.AmbosigualButton.Position = [810 286 304 137];
```

```
1083     app.AmbosigualButton.Text = 'Ambos igual';
1084
1085     % Show the figure after all components are created
1086     app.UIFigure.Visible = 'on';
1087 end
1088 end
1089
1090 % App creation and deletion
1091 methods (Access = public)
1092
1093     % Construct app
1094     function app = TFG_exp2_DEF
1095
1096         % Create UIFigure and components
1097         createComponents(app)
1098
1099         % Register the app with App Designer
1100         registerApp(app, app.UIFigure)
1101
1102         % Execute the startup function
1103         runStartupFcn(app, @startupFcn)
1104
1105         if nargin == 0
1106             clear app
1107         end
1108     end
1109
1110     % Code that executes before app deletion
1111     function delete(app)
1112
1113         % Delete UIFigure when app is deleted
1114         delete(app.UIFigure)
1115     end
1116 end
1117
1118 end
```

Código 13: Code View completo del segundo experimento

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

## **F. Estadísticas**

Este anexo contiene las tablas de datos que reúnen los resultados proporcionados por los 42 participantes que realizan los experimentos. Asimismo, se incluyen gráficas necesarias para realizar las estadísticas de los experimentos. Para realizar el análisis estadístico de la Sección 5, se necesita estudiar el tipo de dato que se obtiene de los experimentos, si presenta o no una distribución normal. En función del tipo de distribución se emplean un tipo de herramientas estadísticas u otras:

- Distribución normal, se usan métodos paramétricos.
- Distribución no normal, se usan métodos no paramétricos.

Es importante destacar, que el Anexo F.1 incluye las tablas de resultados original y para realizar las estadísticas, se transponen sus filas y columnas.

### **F.1. Resultados numéricos de la experimentación**

EXPERIMENTO 1 - Experiencias de Sensación Fantasma de Movimiento

PREGUNTA: Localización del punto final del movimiento ilusorio

EXPERIENCIAS	RESPUESTAS																				
	Participante 1	Participante 2	Participante 3	Participante 4	Participante 5	Participante 6	Participante 7	Participante 8	Participante 9	Participante 10	Participante 11	Participante 12	Participante 13	Participante 14	Participante 15	Participante 16	Participante 17	Participante 18	Participante 19	Participante 20	Participante 21
0,25 s, izquierda-derecha	0,716101695	4,213983051	-0,633474576	1,597457627	1,900423729	2,230932203	2,726694915	3,194915254	4,048728814	0,688559322	6,004237288	-0,027542373	3,305084746	5,288135593	3,828389831	1,349576271	4,158898305	2,533898305	0,963983051	4,213983051	4,241525424
0,5 s, izquierda-derecha	0,908898305	6,858050847	3,470338983	3,360169492	5,508474576	3,718220339	4,434322034	3,828389831	4,186440678	0,110169492	9,391949153	-0,440677966	7,93220339	12,14618644	7,023305085	4,516949153	5,012711864	4,103813559	1,707627119	6,775423729	10,68644068
1 s, izquierda-derecha	2,781779661	11,15466102	-3,63559322	4,186440678	8,152542373	3,552966102	6,913135593	4,021186441	12,31144068	1,542372881	11,89830508	2,86440678	20,54661017	25,50423729	21,04237288	4,461864407	7,133474576	4,847457627	3,360169492	13,99152542	18,12288136
1,5 s, izquierda-derecha	3,938559322	24,76059322	4,819915254	3,800847458	12,33898305	7,822033898	6,88559322	4,131355932	15,97457627	3,332627119	16,38771186	0,165254237	8,180084746	25,55932203	25,75211864	17,48940678	11,09957627	5,288135593	3,525423729	18,81144068	19,5
2 s, izquierda-derecha	5,508474576	22,91525424	4,351694915	10,49364407	14,9279661	12,03601695	3,277542373	5,012711864	23,96186441	3,580508475	23,19067797	2,836864407	22,39194915	21,53813559	25,80720339	13,13771186	15,12076271	3,855932203	3,580508475	30	22,50211864
2,5 s, izquierda-derecha	13,35805085	30	10,65889831	7,73940678	17,21398305	5,701271186	4,434322034	4,461864407	20,79449153	2,919491525	25,86228814	4,461864407	30	17,68220339	30	14,73516949	13,11016949	4,544491525	3,608050847	30	20,98728814
3 s, izquierda-derecha	14,0190678	30	6,802966102	30	23,02542373	11,70550847	3,029661017	7,794491525	25,25635593	1,762711864	30	13,88135593	30	20,16101695	30	8,483050847	18,97669492	5,480932203	3,966101695	30	30
0,25 s, derecha-izquierda	-1,377118644	-4,103813559	1,046610169	0,220338983	-1,349576271	-0,771186441	-2,561440678	-0,771186441	-2,974576271	2,286016949	-5,976694915	-0,137711864	-2,341101695	-3,855932203	-3,470338983	-1,266949153	-4,158898305	-1,872881356	-2,175847458	-4,269067797	-3,194915254
0,5 s, derecha-izquierda	-1,95508475	-7,463983051	-1,322033898	-1,597457627	-1,790254237	-1,129237288	-3,745762712	-2,230932203	-4,847457627	-1,487288136	-6,995762712	-1,597457627	-13,44067797	-14,68008475	-6,858050847	-3,029661017	-4,847457627	-1,707627119	-2,01059322	-10,10805085	-8,813559322
1 s, derecha-izquierda	-4,241525424	-11,51271186	3,608050847	-2,86440678	-6,775423729	-3,663135593	-9,832627119	-3,63559322	-13,46822034	-0,247881356	-9,144067797	-1,625	-20,60169492	-12,94491525	-17,79237288	-4,076271186	-8,538135593	-3,690677966	-1,983050847	-20,07838983	-20,60169492
1,5 s, derecha-izquierda	-3,993644068	-15,53389831	-3,084745763	-3,25	-1,294491525	-4,351694915	-3,911016949	-4,131355932	-17,98516949	-1,459745763	-16,25	-2,561440678	-30	-16,66313559	-24,95338983	-6,031779661	-12,53177966	-3,360169492	-1,983050847	-30	-19,91313559
2 s, derecha-izquierda	-8,978813559	-18,53601695	4,516949153	-2,093220339	-4,654661017	-4,792372881	-12,00847458	-6,968220339	-21,95127119	-1,81779661	-24,34745763	-3,828389831	-24,20974576	-21,15254237	-24,92584746	-10,57627119	-10,19067797	-4,406779661	-2,781779661	-7,766949153	-21,125
2,5 s, derecha-izquierda	-13,93644068	-24,04449153	5,508474576	-30	-13,77118644	-4,737288136	-2,809322034	-7,766949153	-24,34745763	-1,377118644	-25,06355932	-3,360169492	-30	-20,90466102	-30	-19,44491525	-14,40466102	-4,158898305	-2,451271186	-30	-30
3 s, derecha-izquierda	-16,22245763	-30	-4,764830508	-14,15677966	-19,16949153	-6,224576271	-10,93432203	-6,389830508	-23,68644068	-1,184322034	-25,55932203	-5,06779661	-30	-15,53389831	-30	-8,730932203	-18,31567797	-3,966101695	-2,451271186	-30	-30

EXPERIMENTO 1 - Experiencias Cutaneous Rabbit

PREGUNTA: Localización del punto final del movimiento ilusorio

EXPERIENCIAS	RESPUESTAS																				
	Participante 1	Participante 2	Participante 3	Participante 4	Participante 5	Participante 6	Participante 7	Participante 8	Participante 9	Participante 10	Participante 11	Participante 12	Participante 13	Participante 14	Participante 15	Participante 16	Participante 17	Participante 18	Participante 19	Participante 20	Participante 21
380 ms, izquierda-derecha	3,800847458	11,84322034	3,938559322	7,353813559	5,866525424	3,800847458	12,09110169	6,389830508	3,663135593	1,074152542	8,31779661	3,084745763	7,794491525	26,13771186	7,794491525	5,866525424	5,040254237	3,993644068	3,71822034	12,11864407	9,088983051
560 ms, izquierda-derecha	3,332627119	11,40254237	4,158898305	7,519067797	6,417372881	4,213983051	3,525423729	3,745762712	4,48940678	3,745762712	-5,233050847	3,800847458	4,324152542	25,6970339	16,05720339	6,141949153	6,610169492	3,993644068	2,9470339	8,427966102	9,006355932
740 ms, izquierda-derecha	4,709745763	6,802966102	2,451271186	3,277542373	4,737288136	3,525423729	4,516949153	6,637711864	7,463983051	2,919491525	6,30720339	6,059322034	6,5	25,42161017	23,02542373	7,463983051	6,252118644	4,186440678	3,58050848	11,6779661	8,951271186
380 ms, derecha-izquierda	-2,038135593	-4,847457627	-3,470338983	-30	-2,588983051	-4,158898305	-13,63347458	-3,663135593	-5,205508475	-2,919491525	-7,546610169	-2,368644068	-5,453389831	-25,42161017	-17,48940678	-4,351694915	-7,188559322	-3,194915254	-2,2309322	-10,57627119	-17,43432203
560 ms, derecha-izquierda	-2,478813559	-9,805084746	-3,608050847	-3,25	-4,461864407	-6,252118644	-5,591101695	-5,343220339	-4,269067797	-1,266949153	12,3940678	0,578389831	-2,726694915	-16,25	-17,875	-2,919491525	-5,783898305	-3,745762712	-1,59745763	-11,26483051	-7,133474576
740 ms, derecha-izquierda	-3,222457627	-6,472457627	-3,387711864	-1,211864407	-6,968220339	-3,938559322	-5,673728814	-3,277542373	-4,076271186	-1,459745763	-3,745762712	-1,845338983	-7,381355932	-22,75	-19,47245763	-4,021186441	-5,591101695	-3,25	-2,01059322	-10,49364407	-8,455508475

EXPERIMENTO 2 - Experiencias de Sensación Fantasma de Movimiento

PREGUNTA: Grado de coherencia

Totalmente diferentes: 1	Distintos: 2	Distintos: 2	Se parecen: 3	Muy similares: 4	Idénticos: 5
--------------------------	--------------	--------------	---------------	------------------	--------------

EXPERIENCIAS	RESPUUESTAS																				
	Participante 1	Participante 2	Participante 3	Participante 4	Participante 5	Participante 6	Participante 7	Participante 8	Participante 9	Participante 10	Participante 11	Participante 12	Participante 13	Participante 14	Participante 15	Participante 16	Participante 17	Participante 18	Participante 19	Participante 20	Participante 21
3,5 cm, 0,5 s centrado e izquierda-derecha	4	5	4	5	5	5	5	4	5	5	4	5	4	4	4	5	5	5	5	5	5
3,5 cm, 1 s centrado e izquierda-derecha	5	5	4	4	5	5	5	5	5	5	5	2	5	5	5	5	5	4	5	5	5
3,5 cm, 2,5 s centrado e izquierda-derecha	3	5	5	5	5	3	5	3	5	5	4	5	4	4	5	5	5	5	5	5	5
7 cm, 0,5 s centrado e izquierda-derecha	4	5	4	4	5	4	4	4	4	3	5	5	4	4	5	5	5	5	5	5	5
7 cm, 1 s centrado e izquierda-derecha	5	4	4	4	2	5	5	3	5	4	5	5	5	5	4	5	5	5	3	5	5
7 cm, 2,5 s centrado e izquierda-derecha	3	5	4	5	5	5	5	5	4	5	3	4	5	4	5	5	4	5	4	5	5
7 cm, 0,5 s centrado y derecha-izquierda	1	4	1	4	5	4	5	4	5	4	4	2	4	4	4	1	5	5	5	4	5
7 cm, 1 s centrado y derecha-izquierda	1	5	2	4	5	5	5	4	5	5	1	2	5	5	1	5	3	5	4	5	5
7 cm, 2,5 s centrado y derecha-izquierda	1	5	4	4	2	5	5	3	5	5	3	3	4	5	1	5	2	5	3	5	5
20 cm, 0,5 s mitad izquierda, izquierda-derecha	4	3	5	4	5	4	5	5	4	5	4	5	5	5	4	5	2	5	4	5	5
20 cm, 1 s mitad izquierda e izquierda-derecha	4	2	4	4	5	4	5	5	4	5	5	5	4	5	4	5	5	4	4	5	5
20 cm, 2,5 s mitad izquierda e izquierda-derecha	4	5	5	5	5	4	5	5	4	5	5	4	4	4	4	5	4	4	5	5	5
20 cm, 0,5 s mitad derecha, izquierda-derecha	4	4	2	4	5	5	4	5	4	5	5	5	4	4	4	5	5	4	3	4	5
20 cm, 1 s mitad derecha e izquierda-derecha	4	4	5	4	4	4	3	5	4	4	5	3	5	5	4	5	3	1	5	5	5
20 cm, 2,5 s mitad derecha e izquierda-derecha	5	5	2	5	2	4	4	5	3	5	5	5	4	4	5	5	5	2	5	5	5
40 cm, 0,5 s centrado e izquierda-derecha	3	5	5	4	5	4	5	5	3	3	5	5	3	4	4	4	3	3	4	4	5
40 cm, 1 s centrado e izquierda-derecha	4	4	3	5	5	4	5	5	3	5	5	5	4	5	5	4	5	5	3	4	5
40 cm, 2,5 s centrado e izquierda-derecha	3	3	1	5	5	5	5	5	3	5	5	3	4	5	5	4	5	5	5	5	5



F.2. Gráficas imprescindibles para el análisis de los datos experimentales

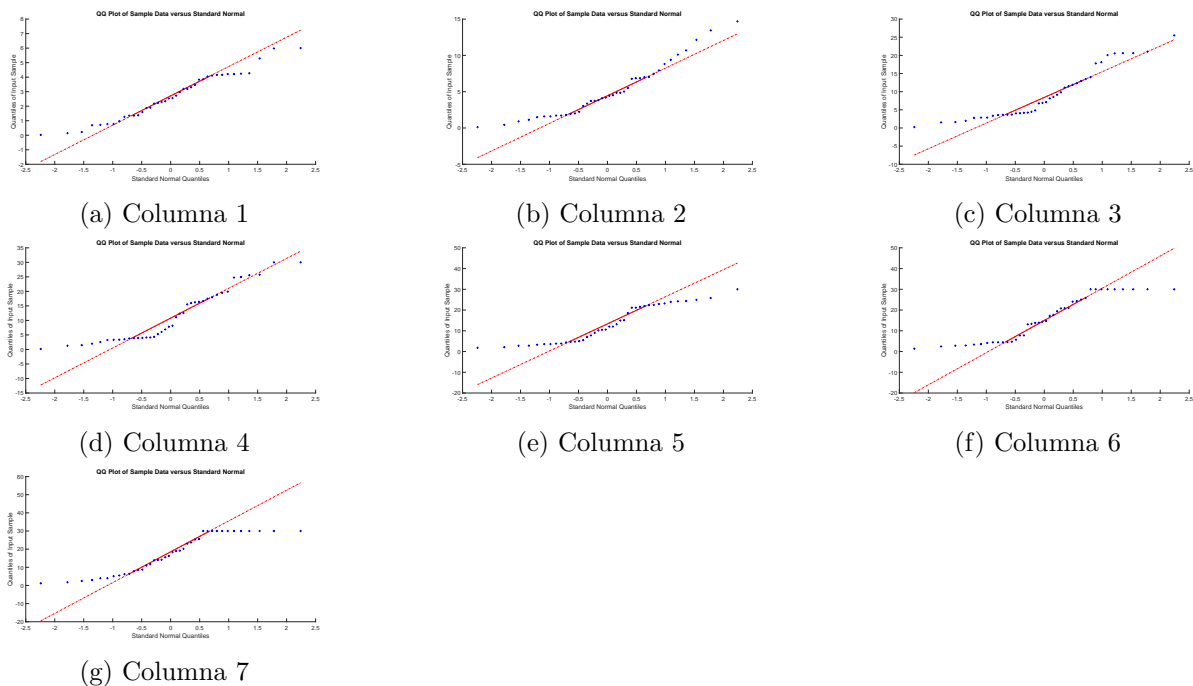


Figura 58: Experimento 1 - SFM, *qqplot()* de las columnas de datos

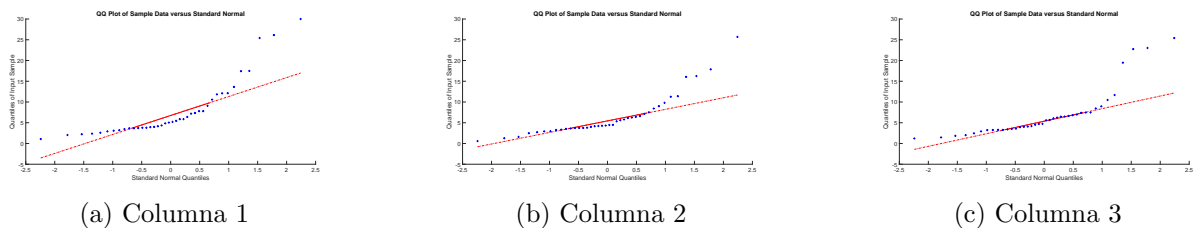


Figura 59: Experimento 1 - CR, *qqplot()* de las columnas de datos

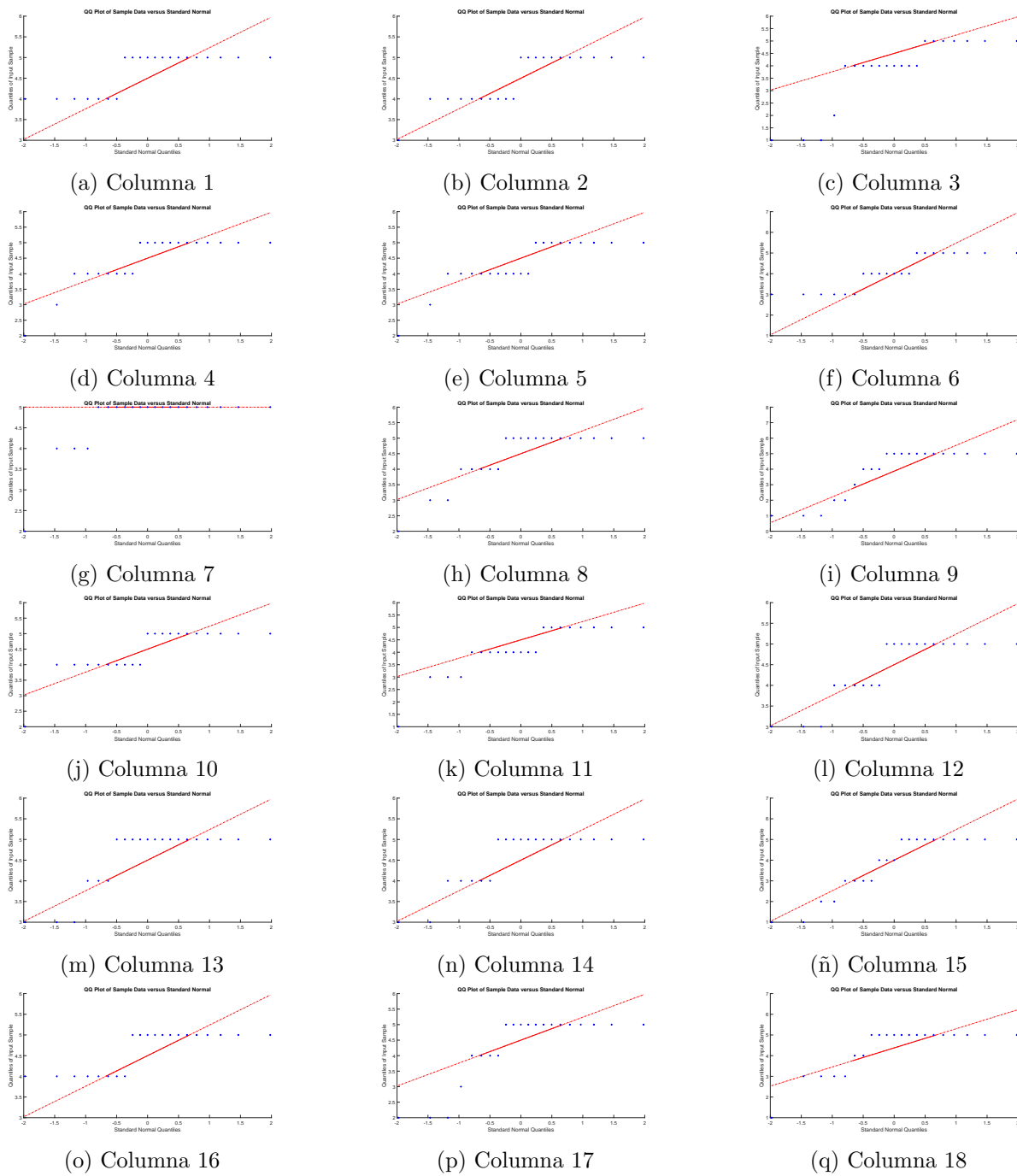


Figura 60: Experimento 2 - SFM, *qqplot()* de las columnas de datos

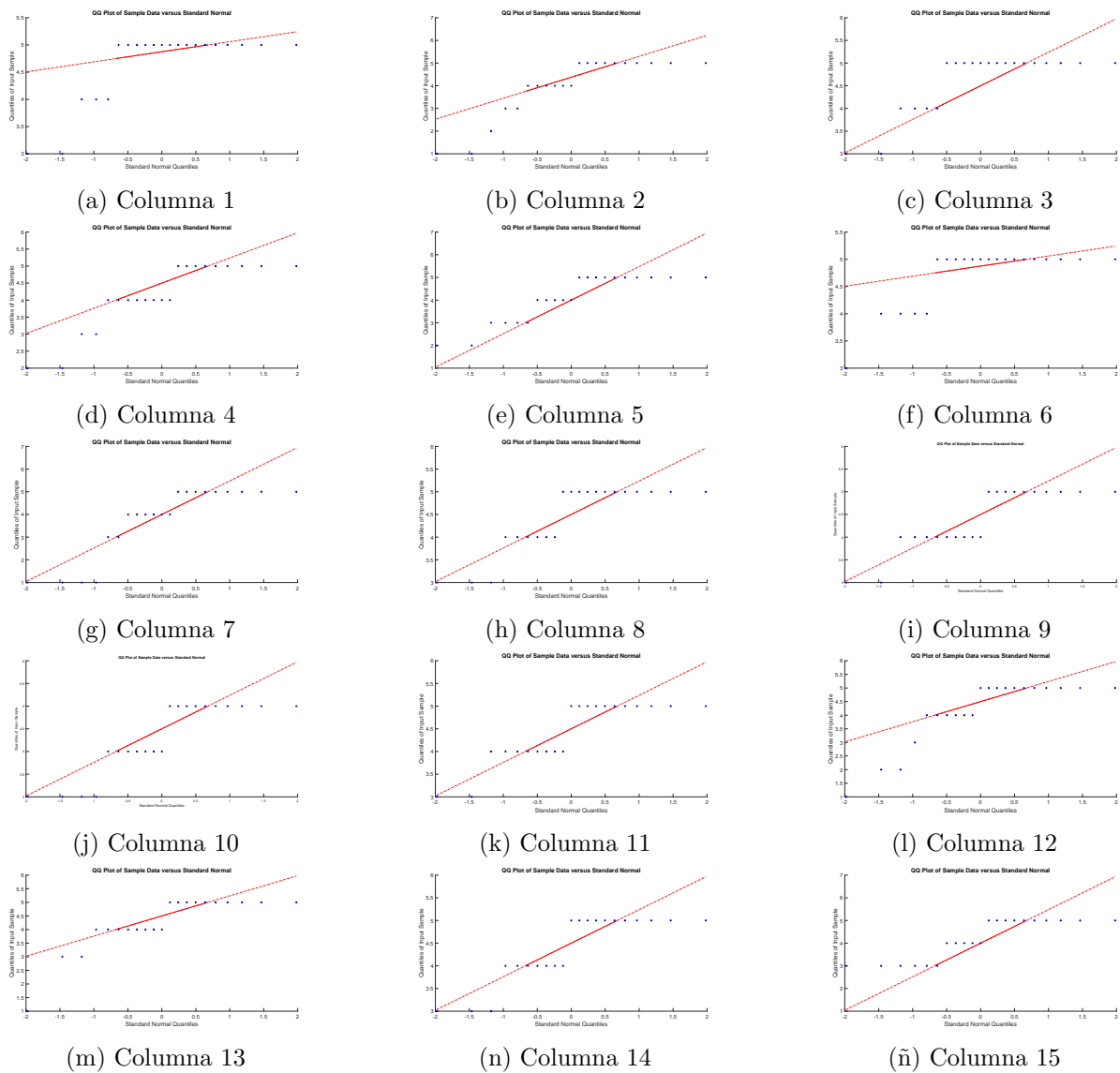


Figura 61: Experimento 2 - CR, *qqplot()* de las columnas de datos

## Símbolos

<i>Hz</i>	Hercio.
<i>KHz</i>	Kilohercio.
<i>V</i>	Voltio.
<i>V<sub>pp</sub></i>	Tensión pico a pico, su unidad es el <i>V</i> .
$\Omega$	Ohmio.
<i>cm</i>	Centímetro.
<i>m</i>	Metro.
<i>mm</i>	Milímetro.
<i>mm<sup>2</sup></i>	Milímetro cuadrado.
<i>ms</i>	Milisegundo.
<i>s</i>	Segundo.

## Siglas

CR	Cutaneous Rabbit, Conejo Cutáneo.
Hi-Fi	High Fidelity, Alta Fidelidad.
ISI	Interstimulus Interval.
PEA	Polímeros Electroactivos.
PLA	Ácido poliláctico o poliácido láctico.
RAE	Real Academia Española.
RVs	Realidades Virtuales.
SFM	Sensación Fantasma de Movimiento.
SMA	Shape Memory Alloy, aleación con memoria de forma.
SPL	Sound Pressure Level, Nivel de Presión Sonora.
TFG	Trabajo Fin de Grado.
UMA	Universidad de Málaga.

## Glosario

Actuador Vibrotáctil	Dispositivo, estructuralmente similar a un altavoz convencional, capaz de reproducir señales de audio que recrean ilusiones táctiles de movimiento.
Amortiguadores de silicona	<i>Dampers</i> en inglés, son pequeñas siliconas empleadas para amortiguar el golpe del imán de neodimio contra los extremos del actuador vibrotáctil, evitando rebotes bruscos del mismo que enturbian la percepción de las vibraciones deseadas.
Antropometría	Es el estudio cuantitativo de las características físicas del ser humano.
AppDesigner	Es un entorno de desarrollo interactivo para diseñar una aplicación y programar su comportamiento. Proporciona una versión totalmente integrada del editor de MATLAB y un gran conjunto de componentes interactivos.
Audacity	Es una aplicación informática multiplataforma libre que se puede usar para grabación y edición de multipista de audio.
Cinestesia	Cinestesia, kinestesia o quinestesia es la rama de la ciencia que estudia el movimiento humano.
Disestesia	Del griego antiguo "sensación anormal", es una sensación o percepción que se suele describir como dolor, picor, quemazón o de restricción. Principalmente ocurre por daños en el tejido nervioso..
Dispositivo Hi-Fi	Sinónimo de altavoz o equipo de audio en general, pero de alta calidad. Este tipo de equipo reduce significativamente el ruido no deseado y la distorsión, frente a los dispositivos de audio convencionales.
Insight	"Visión interna" o "clave", es la esencia que permite entender la verdad o resolver un problema.

MATLAB	MATLAB (MATrix LABoratory) es un lenguaje basado en matrices que permite la expresión natural de las matemáticas computacionales. Es una plataforma de programación diseñada específicamente para los ingenieros y científicos..
Percepción/Ilusión háptica	Es el efecto o ilusión que busca recrear las sensaciones corporales de cualquiera de los sentidos de forma artificial.
Plástico PLA	Es un polímero que se obtiene a partir de materias primas provenientes de la naturaleza. Resulta ser un plástico ecológico, renovable y biodegradable bajo ciertas condiciones de temperatura y humedad.
Script	Es un tipo de archivo que contiene líneas secuenciales de comandos y llamadas a funciones de MATLAB.
Seminal	De la semilla o relativo a ella. Hace referencia al origen o comienzo de algo.
SetUp	Término en inglés aun no reconocido por la Real Academia Española (Real Academia Española (RAE)) que significa distribución o configuración inicial..
Shapiro-Wilks	Es un test o una prueba que se usa para contrastar la normalidad de un conjunto de datos, para ello plantea como hipótesis nula que una muestra proviene de una población con distribución normal.
SolidWorks	Software de diseño asistido por computadora (CAD) ampliamente utilizado en la industria y especialmente útil en el diseño de piezas tridimensionales para impresión. Este programa ofrece una amplia gama de herramientas avanzadas que permiten a los usuarios crear modelos 3D precisos, simular productos, diseñar ensamblajes y generar planos técnicos.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

## Referencias

- [1] Angélica Bellicha, Andrés Trujillo-León y Wael Bachtá. «Phantom Sensation: When the phantom escapes the bounds of the actuators and the end-point is sensed in the air». En: *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*. 2019, págs. 91-96. DOI: 10.1109/WHC.2019.8816176.
- [2] J. Brooks E. Nguyen J. Taylor y T. Seizova-Cajic. «Velocity of motion across the skin influences perception of tactile location». En: *Journal of Neurophysiology* 115 (2016), págs. 674-684.
- [3] G. Kanizsa. «Margini Quasi-Perceptivi in Campi con Stimolazione Omogenea». En: *Rivista di Psicologia* 49 (1955), págs. 7-30.
- [4] Thorsten Plewan et al. «Ventral and Dorsal Stream Interactions during the Perception of the Müller-Lyer Illusion: Evidence Derived from fMRI and Dynamic Causal Modeling». En: *Journal of Cognitive Neuroscience* 24.10 (oct. de 2012), págs. 2015-2029. DOI: 10.1162/jocn\_a\_00258.
- [5] Zenon Pylshyn. *Seeing and visualizing: It's Not What You Think*. An Essay On Vision and Visual Imagination. Documento PDF: [http://rucss.rutgers.edu/images/personal-zenon-pylyshyn/class-info/Seeing\\_Visualizing/Book1-3.pdf](http://rucss.rutgers.edu/images/personal-zenon-pylyshyn/class-info/Seeing_Visualizing/Book1-3.pdf). 2006.
- [6] R. Plomp y W. J. M. Levelt. «Tonal Consonance and Critical Bandwidth». En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 38.4 (jul. de 2005), págs. 548-560. DOI: 10.1121/1.1909741. URL: <https://doi.org/10.1121/1.1909741>.
- [7] Gustav Kuhn, Aym A. Amlani y Ronald A. Rensink. «Towards a Science of Magic». En: *Trends in Cognitive Sciences* 12.9 (2008), págs. 349-354. DOI: 10.1016/j.tics.2008.05.008. URL: <https://philarchive.org/rec/RENTAS>.
- [8] Chaz Firestone y Brian J. Scholl. «Cognition does not affect perception: Evaluating the evidence for top-down effects». En: *Behavioral and Brain Sciences* 39 (2016), pág. 229. DOI: 10.1017/S0140525X15000965.
- [9] U. R. Karmarkar y D. V. Buonomano. «Timing in the absence of clocks: encoding time in neural network states». En: *Behavioral and Brain Sciences* 53 (2007), págs. 427-438. DOI: 10.1016/j.neuron.2007.01.006. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.01.006>.
- [10] Mel Slater et al. «Visual Realism Enhances Realistic Response in an Immersive Virtual Environment». En: *IEEE Computer Graphics and Applications* 29.3 (2009), págs. 76-84. DOI: 10.1109/MCG.2009.55.
- [11] Doug A. Bowman y Ryan P. McMahan. «Virtual Reality: How Much Immersion Is Enough?». En: *Computer* 40.7 (2007), págs. 36-43. DOI: 10.1109/MC.2007.257.
- [12] M. Pivec y O. Dziabenko. «Game-based learning in universities and lifelong learning: A luxuriation or a real chance?». En: *British Journal of Educational Technology* 46.1 (2014), págs. 5-15. DOI: 10.1111/bjet.12113. URL: <https://doi.org/10.1111/bjet.12113>.
- [13] A. A. Rizzo, G. J. Kim y B. Lange. «Use of virtual reality for adjunctive treatment of adult burn pain during physical therapy: A controlled study». En: *Clinical Journal of Pain* 33.11 (2017), págs. 1006-1013. DOI: 10.1097/AJP.0000000000000513. URL: <https://doi.org/10.1111/bjet.12113>.
- [14] Ernst Heinrich Weber. *Der und das Tastsinn gemeingefühl*. Edited by Ewald Hering, ("El sentido del tacto y la sensibilidad común" en español). Leipzig: Engelmann, 1905. URL: <https://vlp-new.ur.de/records/lit4037>.

- [15] Dean Burnett. *El cerebro idiota*. Temas de hoy, 2016.
- [16] Xataka Ciencia. *¿Qué es la ilusión de Aristóteles? (Pista: tiene que ver con tu tacto)*. URL: <https://www.xatakaciencia.com/sabias-que/que-es-la-ilusion-de-aristoteles-pista-tiene-que-ver-con-tu-tacto>, visitado en Mayo 7, 2023. 2016.
- [17] Matthew Botvinick y Jonathan Cohen. «Rubber hands 'feel' touch that eyes see». En: *Nature* 391 (1998). DOI: 10.1038/35784. URL: <https://doi.org/10.1038/35784>.
- [18] Matthew R. Longo y Patrick Haggard. «An implicit body representation underlying human position sense». En: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107.26 (2010), págs. 11727-11732. DOI: 10.1073/pnas.1003483107. URL: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1003483107>.
- [19] Eduardo Martínez de la Fe. «El tacto también es una alucinación controlada». En: *Tendencias* (2021). URL: <https://tendencias21.levante-emv.com/el-tacto-tambien-es-una-alucinacion-controlada.html>.
- [20] David S. Alles. «Information Transmission by Phantom Sensations». En: *IEEE Transactions on Man-Machine Systems* 11.1 (1970), págs. 85-91. DOI: 10.1109/TMMS.1970.299967.
- [21] Frank A. Geldard y Carl E. Sherrick. «The Cutaneous "Rabbit"': A Perceptual Illusion». En: *Science, New Series* 178 (oct. de 1972), págs. 178-179. URL: <http://www.jstor.org/stable/1734881>.
- [22] Seungmoon Choi y Katherine J. Kuchenbecker. «Vibrotactile Display: Perception, Technology, and Applications». En: *Proceedings of the IEEE* 101 (sep. de 2013), págs. 2093-2104. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6353870>.
- [23] Jérémy Streque et al. «New Magnetic Microactuator Design Based on PDMS Elastomer and MEMS Technologies for Tactile Display». En: *IEEE T. Haptics* 3 (abr. de 2010), págs. 88-97. DOI: 10.1109/TOH.2009.61.
- [24] Katherine Kuchenbecker et al. «The Touch Thimble: Providing Fingertip Contact Feedback During Point-Force Haptic Interaction». En: abr. de 2008, págs. 239-246. ISBN: 978-1-4244-2005-6. DOI: 10.1109/HAPTICS.2008.4479950.
- [25] Tao Li et al. «A Miniature Multimodal Actuator for Effective Tactile Feedback: Design and Characterization». En: *Procedia Engineering* 168 (dic. de 2016), págs. 1547-1550. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.457.
- [26] M.Arch. (a cargo) D.I. Carlos Borri. *Ergonomía II*. Cátedra Ergonomía, 2011. URL: <https://www.studocu.com/es/document/instituto-politecnico-nacional/relaciones-publicas/352491151-53162463-teorico-de-ergonomia-de-la-mano-pdf/16057660/download/352491151-53162463-teorico-de-ergonomia-de-la-mano-pdf.pdf>.
- [27] Arturo Castillo. *Manillares: características, tipos y homologación*. URL: <https://www.motosan.es/motocicleta/componentes/manillares-caracteristicas-tipos-y-homologacion/>, visitado en Abril 5, 2023. 2021.
- [28] tomado del datasheet de Tectonic RS. *Transductor de audio, 8 ohmios, 2W, 300 Hz, 20 kHz, Redondo, TEAX19C01-8*. URL: <https://es.rs-online.com/web/p/drivers-para-altavoces/8765266>, visitado en Abril 30, 2023. 2023.
- [29] Vincent Hayward Hsin-Yun Yao. «Design and analysis of a recoil-type vibrotactile transducer». En: *J Acoust Soc Am* 128.2 (2010), págs. 619-627. URL: <https://doi.org/10.1121/1.3458852>.

- [30] Blanca Visarrea et al. «Design of a Portable Interface for Vibrotactile Feedback Applications». En: nov. de 2022, págs. 86-90. ISBN: 978-3-031-19678-2. DOI: 10.1007/978-3-031-19679-9\_12.
- [31] Ramón Méndez. «Subtítulos y videojuegos: en busca de una norma que mejore la experiencia del usuario». En: *Quaderns* 12 (2017), págs. 87-103. URL: <https://www.cervantesvirtual.com/downloadPdf/subtitulos-y-videojuegos-en-busca-de-una-norma-que-mejore-la-experiencia-del-usuario-877591/>.
- [32] R. Plomp. «Detectability Threshold for Combination Tones». En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 37.6 (jul. de 2005), págs. 1110-1123. DOI: 10.1121/1.1909532.
- [33] G.A. (proyecto de la Universidad del País Vasco). *Curso de Acústica*. URL: <https://www.ehu.eus/acustica/espanol/electricidad/transes/transes.html> visitado en April 30, 2023. 2003.