

Grado Universitario en Ingeniería Informática (2023-2024)

Trabajo Fin de Grado

“Chaleco de feedback háptico para entornos de realidad virtual”

Isaac Buiza González

Tutor:

Alejandro Rey López

Leganés, septiembre de 2024



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons
Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada

RESUMEN

Los sistemas inmersivos, como la realidad virtual, aumentada o mixta, tienen un gran potencial para involucrar a los usuarios en su contenido. Aunque el uso de estas tecnologías se está expandiendo rápidamente, aún no existe un conjunto estándar de dispositivos de entrada y salida. Esta flexibilidad permite el desarrollo de una variedad de dispositivos diseñados tanto para mejorar la inmersión del usuario como para hacer que su interacción con el entorno virtual se asemeje lo más posible a la interacción en el mundo real.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un dispositivo que permita al usuario experimentar interacciones con elementos del entorno virtual mediante retroalimentación háptica, específicamente a través de vibraciones. Para lograrlo, se dispondrá un microcontrolador con capacidades de comunicación inalámbrica, que controlando una serie de actuadores proveerá al usuario con dichos estímulos. El sistema será montado sobre una plataforma similar a un chaleco, diseñada para poder utilizarse sin interferir con las capacidades motoras del usuario.

Palabras clave: Realidad virtual, háptica, vibración, vestible

ABSTRACT

Immersive systems, such as virtual, augmented or mixed reality, can highly engage users in their content. Although the use of these technologies is expanding rapidly, there is still no standard set of input and output devices. This flexibility allows for the development of a variety of devices designed both to enhance user immersion and make their interaction with the virtual environment as close as possible to real-world interaction.

The objective of this Project is to develop a device that allows its users to experience interactions with elements of a virtual environment through haptic feedback, based on vibrations. To achieve this objective, a microcontroller with wireless communication capabilities will be used to control a series of actuators which will provide the user with such stimuli. The system will be mounted on a vest-like platform, designed to be worn without interfering with the user's motion ability.

Key words: Virtual reality, haptics, vibration, wearable

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Contexto y Motivaciones	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estructura del documento	3
2. ESTADO DEL ARTE	4
2.1 Retroalimentación háptica	4
2.2 Dispositivos similares	5
2.2.1 Sistemas comerciales.....	5
2.2.2 Proyectos libres	8
2.3 Microcontroladores	9
2.3.1 Ordenadores en un chip.....	9
2.3.2 Arduino.....	10
2.3.3 ESP32	11
2.3.4 Selección Microcontrolador	12
2.4 Motores de realidad virtual	13
3. ANÁLISIS DEL PROBLEMA	14
3.1 Casos de uso.....	15
3.2 Requisitos.....	19
3.2.1 Requisitos de usuario	19
3.2.2 Requisitos de sistema	22
3.3 Matriz de trazabilidad	26
4. IMPLEMENTACIÓN	27
4.1 Diseño físico del dispositivo.....	27
4.2 Protocolo de mensajería.....	30
4.3 Diseño software del dispositivo	31
5. EVALUACIÓN.....	33
6. PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO	38
6.1 Planificación	38
6.2 Presupuesto	38
6.2.1 Recursos humanos.....	39
6.2.2 Recursos software	39
6.2.3 Recursos Hardware	40

6.2.4 Costes indirectos	40
6.2.5 Costes totales.....	41
7. MARCO REGULADOR.....	42
8. ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO	43
9. CONCLUSIONES.....	44
9.1 Retrospectiva sobre los objetivos	44
9.2 Trabajos Futuros	45
9.3 Conclusiones personales	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación microcontroladores	12
Tabla 2. Comparación protocolos.....	12
Tabla 3. Plantilla casos de uso.....	15
Tabla 4. Caso de uso CU-01.....	16
Tabla 5. Caso de uso CU-02.....	16
Tabla 6. Caso de uso CU-03.....	17
Tabla 7. Caso de uso CU-04.....	17
Tabla 8. Caso de uso CU-05.....	17
Tabla 9. Caso de uso CU-06.....	17
Tabla 10. Caso de uso CU-07.....	18
Tabla 11. Caso de uso CU-08.....	18
Tabla 12. Plantilla requisitos de usuario.....	19
Tabla 13. Requisito de usuario RU-01	19
Tabla 14. Requisito de usuario RU-02	20
Tabla 15. Requisito de usuario RU-03	20
Tabla 16. Requisito de usuario RU-04	20
Tabla 17. Requisito de usuario RU-05	20
Tabla 18. Requisito de usuario RU-06	21
Tabla 19. Requisito de usuario RU-07	21
Tabla 20. Requisito de usuario RU-08	21
Tabla 21. Plantilla requisitos de sistema	22
Tabla 22. Requisito de sistema RS-F-01	23
Tabla 23. Requisito de sistema RS-F-02	23
Tabla 24. Requisito de sistema RS-F-03	23
Tabla 25. Requisito de sistema RS-F-04	24
Tabla 26. Requisito de sistema RS-F-05	24
Tabla 27. Requisito de sistema RS-F-06	24
Tabla 28. Requisito de sistema RS-N-07.....	24
Tabla 29. Requisito de sistema RS-N-08.....	25
Tabla 30. Requisito de sistema RS-F-09	25
Tabla 31. Requisito de sistema RS-F-10	25
Tabla 32. Requisito de sistema RS-F-11	25
Tabla 33. Requisito de sistema RS-N-12.....	26
Tabla 34. Matriz de trazabilidad requisitos	26
Tabla 35. Estructura de mensaje.....	30
Tabla 36. Plantilla caso de prueba	33
Tabla 37. Caso de prueba CP-01	34
Tabla 38. Caso de prueba CP-02	34
Tabla 39. Caso de prueba CP-03	35
Tabla 40. Caso de prueba CP-04	35
Tabla 41. Caso de prueba CP-05	36
Tabla 42. Caso de prueba CP-06	36
Tabla 43. Caso de prueba CP-07	37
Tabla 44. Matriz de trazabilidad casos de prueba	37

Tabla 45. Presupuesto recursos humanos	39
Tabla 46. Presupuesto recursos software.....	39
Tabla 47. Presupuesto herramientas	40
Tabla 48. Presupuesto componentes.....	40
Tabla 49. Presupuesto costes indirectos	40
Tabla 50. Presupuesto total.....	41

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Zonas teslasuit	6
Ilustración 2. Aplicación bHaptics	7
Ilustración 3. LucidGloves	8
Ilustración 4. Raspberry Pi Zero 2 W	9
Ilustración 5. Arduino Nano 33 IoT	10
Ilustración 6. ESP32 Devkit	11
Ilustración 7. Diagrama casos de uso	15
Ilustración 8. Patrón de construcción alojamiento microcontrolador.....	27
Ilustración 9. Patrón de construcción sistema de ajuste	28
Ilustración 10. Patrón de construcción alojamiento actuadores	28
Ilustración 11. Diagrama de conexiones.....	29
Ilustración 12. Flujo de funcionamiento.....	31
Ilustración 13. Diagrama de estados.....	32
Ilustración 14. Diagrama de Gantt.....	38

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de este capítulo, se presentan las motivaciones detrás de este trabajo, los objetivos de este y la estructura de este documento.

1.1 Contexto y Motivaciones

A diferencia de los entornos convencionales, como escritorios, tabletas o móviles, donde existen formas y dispositivos de entrada y salida de información bien establecidos (como teclados, pantallas táctiles, ratones o mandos para juegos); los sistemas inmersivos, como la realidad virtual (RV), realidad aumentada (RA) y realidad mixta (RM), presentan un entorno completamente diferente. En estos entornos inmersivos, no existe un estándar universal para la interacción, lo que abre un vasto campo de posibilidades para la exploración y creación de nuevas formas de interacción.

El objetivo en estos sistemas inmersivos es involucrar de la manera más profunda posible a los usuarios, buscando una interacción natural que utilice los sentidos y habilidades corporales para completar tareas dentro de los entornos inmersivos. A través de la realidad virtual, los usuarios pueden experimentar el contenido digital de una manera que se asemeja a la interacción con el mundo real, potenciando la sensación de presencia.

Los sistemas de realidad virtual están compuestos por diversos dispositivos, cuyo conjunto puede aumentar significativamente el grado de inmersión del usuario. Los más comunes incluyen un visor o casco, junto con mandos que permiten interactuar con el entorno virtual. Aunque esta configuración es la más extendida debido a su facilidad de uso y coste accesible, existen otros periféricos que pueden integrarse para enriquecer la experiencia inmersiva.

Se pueden clasificar estos periféricos en dos grandes grupos: aquellos que mejoran la creación de experiencias de realidad virtual y aquellos que optimizan la interacción con estas mismas. En el segundo grupo, encontramos dispositivos de entrada, que traducen las acciones del usuario en el mundo real en interacciones dentro del entorno virtual, y dispositivos de salida, que envían estímulos generados en el entorno virtual al usuario. También existen dispositivos híbridos, como los visores o mandos ya mencionados, que combinan funciones de entrada y salida, permitiendo una experiencia aún más envolvente.

La ausencia de estándares establecidos para la interacción en realidad virtual precisamente abre la puerta a la innovación. Gracias a esto surgen prototipos como el desarrollado en este proyecto, que exploran nuevas formas de interacción y ofrecen oportunidades para mejorar la sensación de presencia en entornos digitales.

1.2 Objetivos

El presente proyecto tiene como objetivo principal, **el diseño y construcción de un dispositivo periférico para sistemas de realidad virtual**. De este dispositivo se espera que pueda proveer al usuario con retroalimentación háptica sobre las interacciones que ocurran entre su avatar y el entorno virtual.

Con el fin de alcanzar el objetivo principal de este proyecto, se define la siguiente serie de hitos:

- Diseño y construcción del dispositivo físico.
 - Implementación de un sistema de actuadores que permitan la retroalimentación háptica.
 - Diseño físico de un marco que permita el ajuste de los actuadores a preferencia del usuario, a la vez que no limita el movimiento de este.
- Diseño de una interfaz de comunicación.
 - Estudio y análisis acerca de los protocolos de comunicación inalámbrica utilizados en dispositivos periféricos.
 - Diseño de una interfaz de comunicación que sea escalable y permita su adaptación a diferentes configuraciones.
- Implementación de un escenario virtual que permita demostrar las capacidades del dispositivo.

1.3 Estructura del documento

El cuerpo de este documento (excluyendo portada, resúmenes e índices) consta de las secciones descritas a continuación:

- **Introducción:** Se contextualiza el proyecto, mencionando las **motivaciones** de este. También cuenta con una descripción general de los **objetivos** del proyecto.
- **Estado del arte:** Se estudian **trabajos relacionados**, así como **dispositivos similares** y **tecnologías** que podrían resultar útiles a la hora de alcanzar los objetivos definidos. También se justifican las tecnologías o patrones a seguir.
- **Análisis del problema:** Se realiza un análisis del proyecto, detallando **casos de uso** y los diferentes **requisitos** que debe cumplir el sistema final. De esta forma se realiza una descripción formal del sistema. A modo de verificación se incluyen las respectivas **matrices de trazabilidad**.
- **Implementación:** Se detalla el proceso de **diseño** y **construcción** tanto del hardware como del software que compondrá el sistema final, se describe el sistema utilizando diagramas de construcción.
- **Evaluación:** Se describe el proceso de validación realizado para asegurar que el sistema cumple con los requisitos descritos anteriormente. Se definen los **casos de prueba** a validar y se registran sus resultados.
- **Planificación y presupuesto:** Se detalla la **planificación** seguida durante el desarrollo del proyecto, haciendo uso de un diagrama de Gantt. También se recogen los **costes** que genera el proyecto, tanto humanos, como de recursos hardware, software y costes indirectos.
- **Marco regulador:** Se analiza el entorno **legislativo** que rodea al proyecto, recogiendo las posibles regulaciones que aplican al sistema desarrollado.
- **Entorno socio-económico:** Se estudia el posible **impacto social y económico** que el sistema desarrollado puede tener.
- **Conclusiones:** Se recogen las **conclusiones del autor** tras la realización del proyecto. Se realiza una revisión de los **objetivos alcanzados** y se introducen posibles ramas de **trabajo de cara al futuro**.

2. ESTADO DEL ARTE

A lo largo de esta sección se realizará un análisis de diversas tecnologías y dispositivos de realidad virtual, así como de distintos protocolos de comunicación. Se compararán las características y prestaciones ofrecidas por las diferentes alternativas, eligiendo las que mejor se adapten al contexto de este proyecto.

2.1 Retroalimentación háptica

Para completar la inmersión que ofrecen los dispositivos de realidad virtual tradicionales, con el tiempo ha surgido una amplia gama de dispositivos con el fin de aprovechar más vías de comunicación entre el usuario y el entorno virtual.

Una de las vías más exploradas es la de la retroalimentación háptica. Este tipo de estimulación no es que haya sido introducida gracias al desarrollo de la realidad virtual, sino que lleva formando parte de la industria de los videojuegos por décadas (e.g., vibración en los mandos controladores), dónde esta aportaba favorablemente al grado de inmersión del usuario [1].

Dentro del campo de la realidad virtual, es particularmente interesante el uso de retroalimentación háptica y visual, ya que juntas aumentan significativamente la sensación de presencia del individuo y la inmersión que este experimenta. De hecho, se ha demostrado que la combinación de estos tipos de retroalimentación mejora la experiencia del usuario en comparación con el uso de solo una de ellas [2]. En particular, la retroalimentación háptica sola fue muy efectiva para incrementar la sensación de presencia, destacando su importancia en la creación de experiencias de realidad virtual más inmersivas y realistas.

El concepto de retroalimentación háptica engloba todos los estímulos que se perciben a través del sentido del tacto. Gracias a la amplia superficie que representa la piel (receptor encargado del sentido del tacto), surgen diferentes categorías en las que se pueden englobar estos sistemas: Aquellos sistemas hápticos que se pueden agarrar, llevar puestos (wearables) y tocar [3]. En el contexto de la realidad virtual, los que mejor se pueden integrar son aquellos que se pueden agarrar, o aquellos que se pueden llevar puestos.

2.2 Dispositivos similares

En el panorama actual, se pueden observar dos grandes vertientes de dispositivos que utilizan la retroalimentación háptica para aumentar el grado de inmersión de las experiencias de realidad virtual. Por una parte, se encuentran aquellas soluciones que se comercializan como un sistema propietario por parte de grandes compañías y por otra, aquellos proyectos de carácter libre que la comunidad integra y desarrolla con los diferentes sistemas de realidad virtual.

2.2.1 Sistemas comerciales

Dentro del sector comercial, podemos encontrar tanto sistemas orientados al uso profesional como al uso recreacional. Los sistemas profesionales se caracterizan por el uso de tecnologías más complejas y precisas para la estimulación del usuario, también pueden incorporar sensores que permitan capturar el movimiento u otra información del usuario. Por contraparte, los sistemas recreacionales suelen ser más simples debido a su reducido coste y se suelen centrar en representar de forma más precisa las interacciones con el entorno virtual.

Tesla Suit

TeslaSuit es una interfaz humano-digital, que permite la captura de movimiento y medidas biométricas, así como la retroalimentación háptica por todo el cuerpo del usuario [4].

Este sistema se caracteriza por ser de cuerpo completo y el uso de electrodos para controlar el proceso de retroalimentación, los cuales presentan una frecuencia de actualización de 150 Hz. Por parte del subsistema de captura de datos, las mediciones mecánicas tienen una frecuencia de muestreo de unas 100 métricas por segundo, mientras que la frecuencia de muestreo de las biometrías es de 200 métricas por segundo. Según se puede observar en las especificaciones técnicas, se utiliza un interfaz wifi para la comunicación con el dispositivo principal [5].

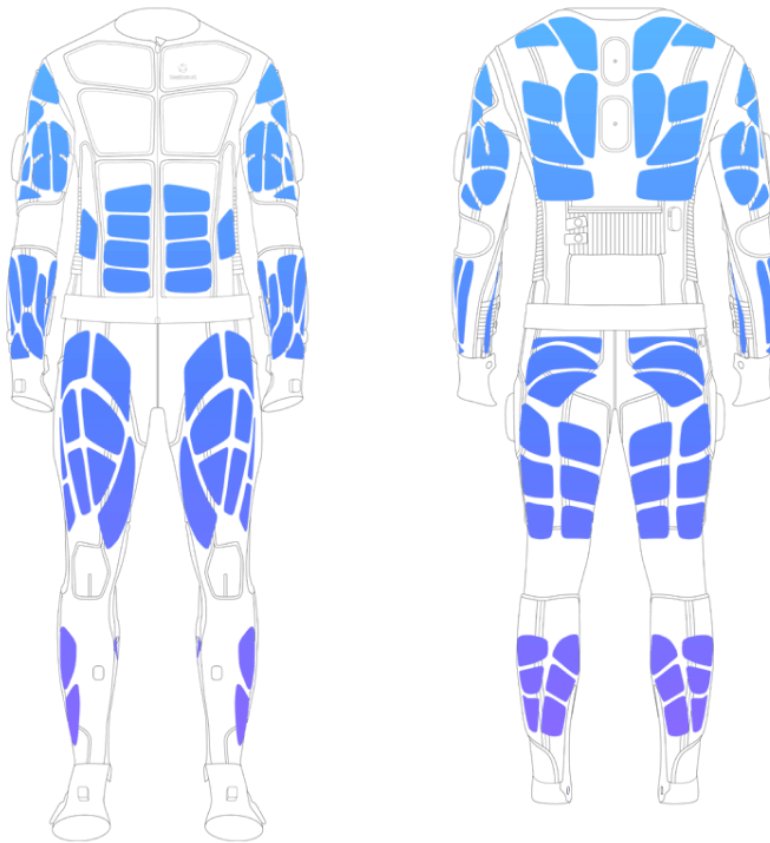


Ilustración 1. Zonas teslasuit [4]

Las principales aplicaciones de un sistema como el TeslaSuit son simulaciones de diversos tipos de escenarios. Estas pueden variar desde simulaciones de conducción de alto rendimiento [6] hasta el entrenamiento de situaciones de alto riesgo en entornos laborales [7].

TactSuit

TactSuit es una gama de productos de la compañía BHaptics, se trata de un conjunto de dispositivos vestibles (chalecos, muñequeras, guantes y calcetines) que se comercializan de manera independiente. Estos dispositivos están orientados hacia el mercado del entretenimiento y son sistemas de menor complejidad a los comentados anteriormente [8].

El TactsuitX40 es el dispositivo principal de esta gama, utiliza motores RME a modo de actuadores para proveer la retroalimentación al usuario. En base a su público objetivo las características más destacables de este sistema vienen dadas por su integración mediante software, gracias a su controlador bHaptics Player [9]. Este dispositivo se puede integrar con experiencias de realidad virtual que no hayan sido expresamente diseñadas para ello.

Al tratarse de un dispositivo orientado al uso recreacional los casos de uso más destacado son su uso en videojuegos, como “Blade and Sorcery” o “Ghost of Tabor” [10], o la adición de respuesta háptica a experiencias musicales, como se explica en su sección “Enjoy Audio-to-Haptic” [9]. En el caso de “Blade and Sorcery” el TactsuitX40 hace notar al usuario los efectos de los hechizos a la hora de lanzarlos o ser alcanzado por ellos.

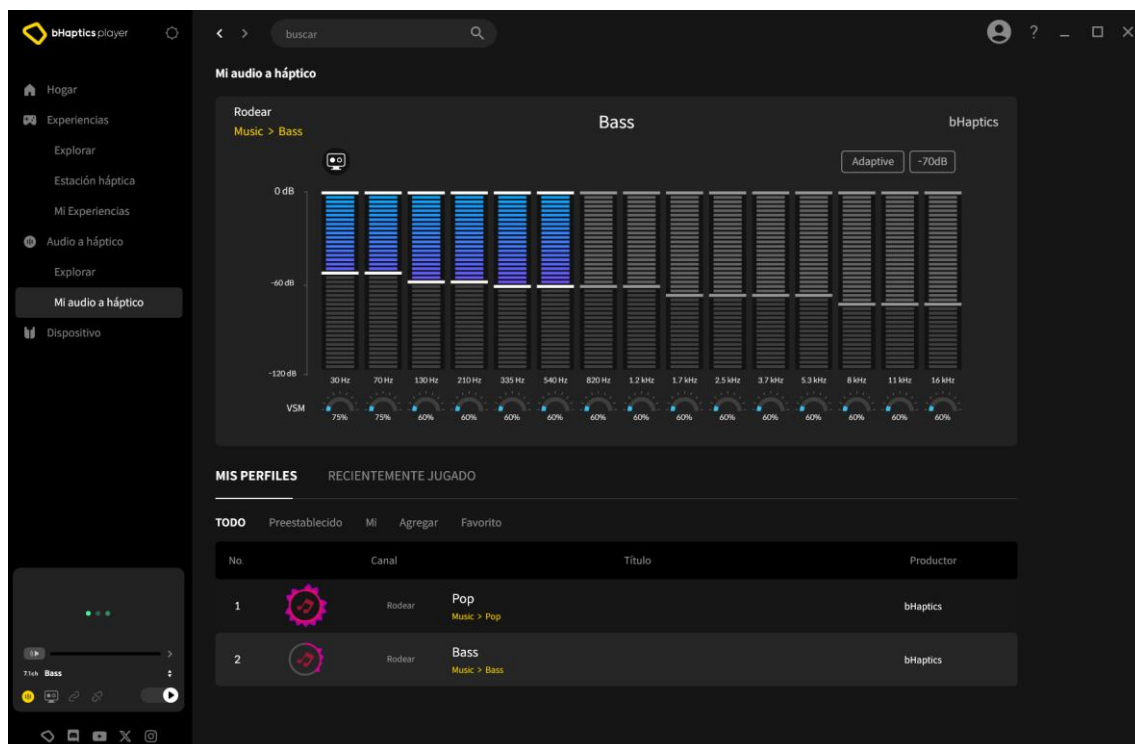


Ilustración 2. Aplicación bHaptics

2.2.2 Proyectos libres

En el ámbito de los proyectos libres, existen sistemas periféricos para realidad virtual desarrollados por comunidades de código abierto y entusiastas de la tecnología. Estos sistemas, aunque no siempre igualan en complejidad a los productos comerciales, ofrecen una gran flexibilidad y personalización, permitiendo a los usuarios construir dispositivos adaptados a sus necesidades específicas. Además, al tratarse de un proyecto de código abierto facilita el acceso a tecnologías avanzadas a un costo menor, en cambio presentan mayores dificultades en sus procesos de ensamblaje y configuración.

LucidGloves

LucidGloves es un proyecto de código abierto que permite a los usuarios construir sus propios guantes hápticos para realidad virtual utilizando componentes accesibles y económicos [11]. Este sistema se destaca por su capacidad de seguimiento de movimientos de las manos y dedos, así como por ofrecer retroalimentación háptica básica a través de motores que generan resistencia a la flexión de los dedos. Los LucidGloves utilizan sensores como potenciómetros para capturar el movimiento de los dedos, y están diseñados para ser altamente personalizables, permitiendo a los usuarios ajustar tanto el hardware como el software según sus necesidades.

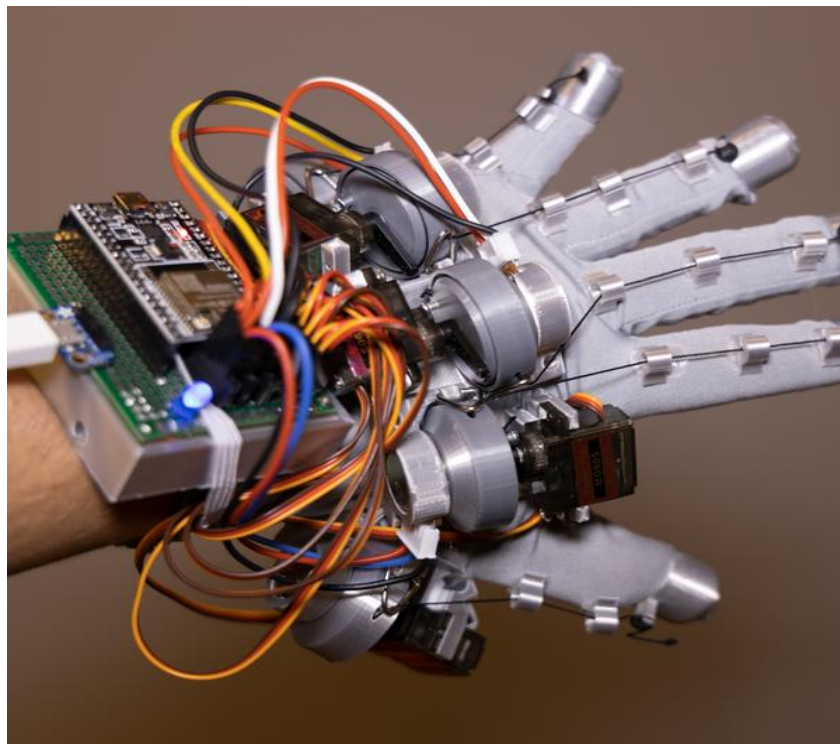


Ilustración 3. LucidGloves[11]

2.3 Microcontroladores

Uno de los objetivos de este proyecto es la creación de un dispositivo, que sea vestible y que permita al usuario recibir retroalimentación háptica. A continuación, se analizarán diferentes microcontroladores con el objetivo de encontrar el que mejor se adapte a las necesidades de presupuesto, sistemas de comunicación e interfaces de entrada y salida.

2.3.1 Ordenadores en un chip

Los ordenadores en un chip son sistemas informáticos contenidos en una sola placa, que se centran en mantener un factor de forma pequeño junto con un rendimiento aceptable y consumo mínimo [12].

Un ejemplo de este tipo de sistemas es la gama de ordenadores Raspberry Pi [13]. Estos miniordenadores cuentan con un sistema operativo completo con soporte para las tecnologías de comunicación inalámbricas comentadas en la sección anterior. A la hora de controlar diferentes tipos de hardware ofrecen una interfaz GPIO con 40 pines [14].



Ilustración 4. Raspberry Pi Zero 2 W [14]

2.3.2 Arduino

La familia de productos Arduino está formada por microcontroladores que, debido a la naturaleza específica de sus tareas, no utilizan un sistema operativo de propósito general. Esto implica que trabajar con ellos requiere programación a bajo nivel, también conocida como embedded programming, lo que permite un control y acceso directo y granular a las interfaces de entrada y salida [15].

Un ejemplo de microcontrolador utilizado en proyectos de electrónica y programación es el Arduino Nano 33 IoT [16]. Este dispositivo incluye un procesador ARM Cortex-M0+ de 32 bits. Además, cuenta con conectividad inalámbrica integrada mediante Wi-Fi y Bluetooth, compatible con el estándar Bluetooth low energy (BLE). Para la interacción con hardware externo, el Arduino Nano 33 IoT dispone de una interfaz GPIO con 14 pines digitales y 8 entradas analógicas.



Ilustración 5. Arduino Nano 33 IoT

2.3.3 ESP32

El ESP32 es un microprocesador de bajo coste y alto rendimiento desarrollado por Espressif Systems, diseñado principalmente para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT). Este microprocesador cuenta con un núcleo dual de 32 bits basado en la arquitectura Xtensa LX6 [17]. Además, integra conectividad Wi-Fi y Bluetooth, compatible con el estándar de Bluetooth low energy. Respecto a la conectividad de periféricos, presenta una interfaz GPIO de hasta 34 pines. La programación de este microcontrolador es compatible tanto con Arduino IDE [18] como con Micro Python a través del framework ESP-IDF [19].

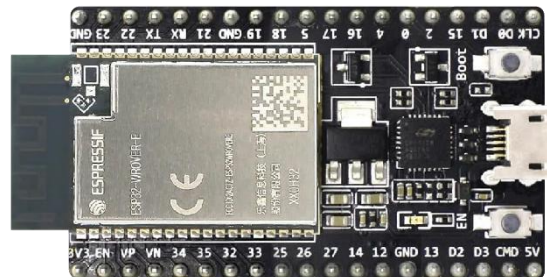


Ilustración 6. ESP32 Devkit

2.3.4 Selección Microcontrolador

Las principales limitaciones del sistema serán el consumo energético, la comunicación entre el microcontrolador y el ordenador principal y el presupuesto global del proyecto. A continuación, se comparan los microcontroladores propuestos anteriormente, según sus protocolos de comunicación y coste, en este caso se obvia el consumo energético ya que este se verá afectado principalmente por los actuadores elegidos y no por el microcontrolador.

	Comunicación	Conexiones Hardware	Coste
Raspberry Pi Zero 2 W	Wi-Fi 2.4GHz 802.11 b/g/n Bluetooth 4.2 Bluetooth Low Energy	GPIO 27 pines	22€
Arduino Nano 33 IoT	Wi-Fi 2.4GHz 802.11 b/g/n Bluetooth® BR/EDR Bluetooth Low Energy 4.2	14 pines digitales 9 pines analógicos	28.07€
ESP32WROOM32E	Wi-Fi 2.4GHz 802.11 b/g/n Bluetooth V4.2 BR/EDR Bluetooth Low Energy	GPIO 26 pines	3-7€

Tabla 1. Comparación microcontroladores [14][16][17]

Si bien todas las opciones planteadas anteriormente presentan las prestaciones necesarias para el desarrollo de este proyecto, teniendo en cuenta las limitaciones de presupuesto y el conocimiento previo, el microcontrolador seleccionado es el ESP32.

Cabe resaltar que uno de los puntos críticos de este tipo de sistemas es la comunicación entre el dispositivo que ejecuta el motor de realidad virtual y el microcontrolador que se encarga del funcionamiento del periférico. Como concluyen estudios como “*Latency impact on Quality of Experience in a virtual reality simulator for remote control of machines*” [20], una latencia excesivamente alta entre el dispositivo principal y el microcontrolador puede reducir la calidad de la experiencia y provocar rechazo con el usuario. Debido a esto será necesario elegir de entre los disponibles un protocolo de comunicación con unos valores de latencia y estabilidad que sean aceptables.

	Latencia (ms)	Consideraciones Estabilidad
Wi-Fi	3.5	Dependerá de la red.
Bluetooth	100	Rango cercano a 30 metros, requiere emparejamiento.
Bluetooth LE	6	Rango cercano a 50 metros, no requiere emparejamiento.

Tabla 2. Comparación protocolos [21][22]

Según las características mostradas en la tabla 2, el protocolo de comunicación que mejor se ajusta a los requisitos del proyecto es el Wi-Fi. Considerando la elección del microcontrolador ESP32, una opción viable sería utilizar la tecnología ESP-NOW [23], que se basa en el protocolo Wi-Fi y permite conexiones nodo a nodo entre estos microcontroladores. No obstante, debido a limitaciones de tiempo y la complejidad del desarrollo en esta primera etapa, se ha decidido emplear el protocolo Bluetooth. Aunque ESP-NOW sería ideal en condiciones óptimas.

2.4 Motores de realidad virtual

Si bien no es el objetivo principal de este proyecto, será necesario el desarrollo de una experiencia de realidad virtual para demostrar el funcionamiento del sistema desarrollado. El visor de realidad virtual seleccionado será uno de los pertenecientes al ecosistema de “Meta”, ya bien sea el modelo “Meta Quest 2” o “Meta Quest 3”. Esta decisión viene dada por su previa disponibilidad.

El ecosistema de meta es compatible de forma nativa con OpenXR y posee integraciones oficiales con los motores de Unity y Unreal Engine [24]. La elección de un motor en concreto dependerá de la experiencia de realidad virtual que se desee obtener, así como de la experiencia del desarrollador. En el caso de este proyecto y teniendo en cuenta la naturaleza simple de la experiencia a crear la elección viene dada por la previa experiencia con el motor de Unity.

3. ANÁLISIS DEL PROBLEMA

En la siguiente sección de este documento se especifican los casos de uso del dispositivo a desarrollar, así como los de la experiencia de realidad virtual que nos permitirá demostrar las capacidades de este. Posteriormente se detallan los requisitos, tanto del usuario como los del sistema. En los requisitos de usuario se definen las necesidades del usuario mientras que los de sistema detallan las características que debe cumplir el sistema para suplir los anteriores. Finalmente se añaden las matrices de trazabilidad a modo de validación.

Previo a la definición de los casos de uso y los requisitos asociados, es necesario delimitar el alcance previsto de este proyecto. Con base en la investigación realizada previamente, se ha decidido desarrollar **un dispositivo con características físicas similares a las de un chaleco. Se espera que este dispositivo pueda comunicarse con otros sistemas mediante tecnología Bluetooth y permita proporcionar a los usuarios retroalimentación háptica mediante el uso de motores de vibración.** Con el fin de mantener la escalabilidad del sistema, el protocolo de mensajes se diseñará de forma independiente del protocolo de comunicación seleccionado.

3.1 Casos de uso

En esta sección se detallan los casos de uso, en los que se define de manera formal las capacidades del dispositivo a desarrollar. Estos se encuentran especificados tanto en forma de diagrama (ilustración 7); como de tablas (tablas de la 4 a la 11).

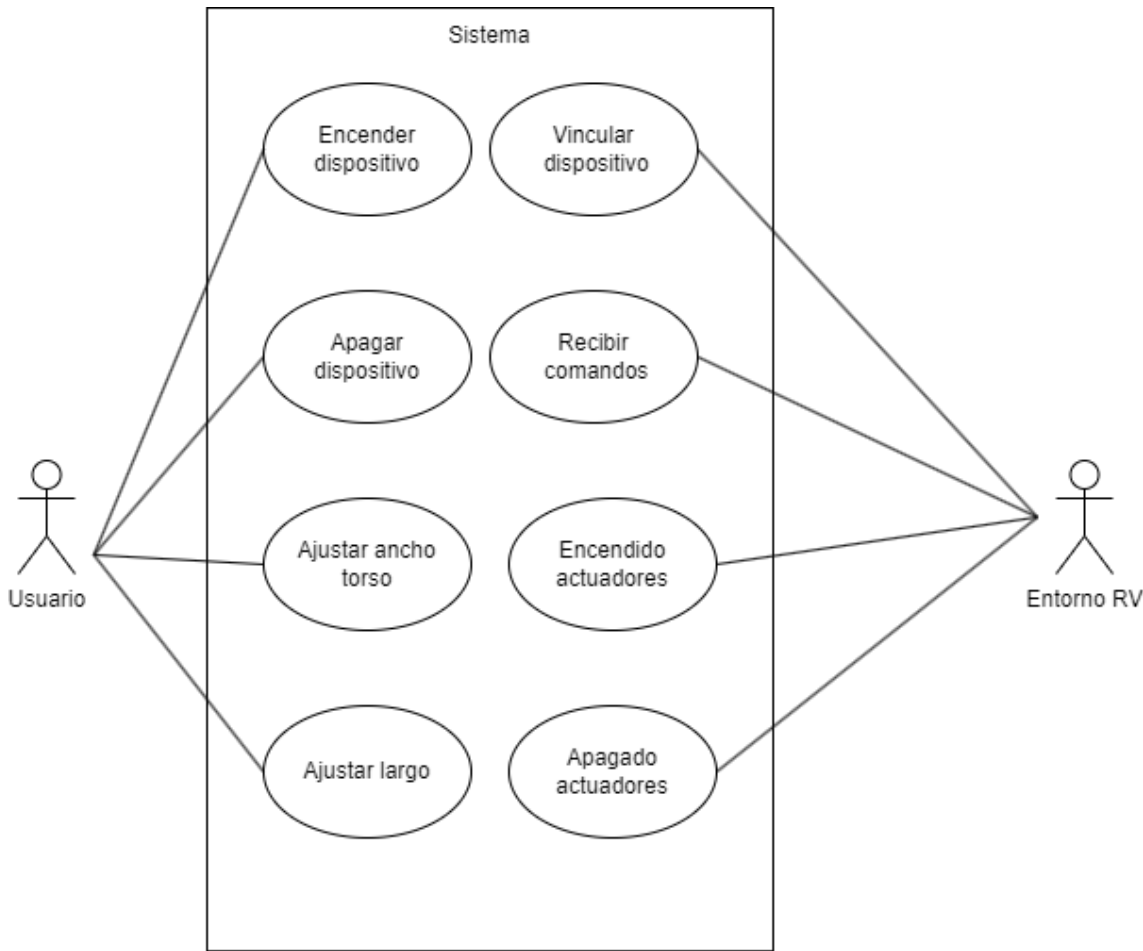


Ilustración 7. Diagrama casos de uso

Para la recopilación de los casos de uso se utilizará la siguiente tabla:

ID	
Nombre	
Actor	
Descripción	
Precondiciones	
Postcondiciones	

Tabla 3. Plantilla casos de uso

Los campos de la tabla son:

- **ID:** Identificador único de cada caso de uso, siguen el patrón CU-XX.
- **Nombre:** Identificador descriptivo del caso de uso.
- **Actor:** Indica el ejecutor del caso de uso, puede tratarse del usuario o el entorno de realidad virtual.
- **Descripción:** Definición detallada del caso de uso.
- **Precondiciones:** Definición del estado previo del sistema para que se pueda dar el caso de uso.
- **Postcondiciones:** Definición del estado resultante del sistema tras la ejecución del caso de uso.

Los casos de uso que se han definido son los siguientes:

ID	CU-01
Nombre	Encender dispositivo
Actor	Usuario.
Descripción	El usuario pulsa el botón de encendido/apagado para iniciar el funcionamiento del dispositivo
Precondiciones	El dispositivo tiene batería.
Postcondiciones	El dispositivo inicia su funcionamiento. Los actuadores quedan conectados a la corriente eléctrica (batería).

Tabla 4. Caso de uso CU-01

ID	CU-02
Nombre	Apagar dispositivo
Actor	Usuario.
Descripción	El usuario pulsa el botón de encendido/apagado, estando el dispositivo encendido.
Precondiciones	El dispositivo está encendido.
Postcondiciones	El dispositivo cesa su funcionamiento. Los actuadores quedan desconectados de la corriente eléctrica (batería).

Tabla 5. Caso de uso CU-02

ID	CU-03
Nombre	Ajustar el ancho del torso.
Actor	Usuario.
Descripción	El usuario ajusta la talla del dispositivo, haciendo uso del ajuste de torso, respecto al diámetro de su torso.
Precondiciones	El usuario lleva puesto el dispositivo.
Postcondiciones	El dispositivo queda ajustado a la talla del usuario (diámetro del torso).

Tabla 6. Caso de uso CU-03

ID	CU-04
Nombre	Ajustar largo.
Actor	Usuario.
Descripción	A través del ajuste de hombros, el usuario ajusta el dispositivo según el largo correspondiente.
Precondiciones	El usuario lleva puesto el dispositivo. El ancho de torso ha sido ajustado
Postcondiciones	El dispositivo queda totalmente ajustado a la talla del usuario. El dispositivo no impide ningún movimiento del usuario.

Tabla 7. Caso de uso CU-04

ID	CU-05
Nombre	Vincular dispositivo.
Actor	Entorno RV (Realidad Virtual).
Descripción	El entorno de realidad virtual se conecta con el dispositivo.
Precondiciones	El dispositivo está encendido.
Postcondiciones	El dispositivo y el entorno de realidad virtual pueden comunicarse entre sí.

Tabla 8. Caso de uso CU-05

ID	CU-06
Nombre	Recibir comandos.
Actor	Entorno RV.
Descripción	El entorno de realidad virtual envía comandos al dispositivo, indicando como este debe actuar.
Precondiciones	El dispositivo y el entorno RV se han conectado.
Postcondiciones	El dispositivo ejecuta el comando recibido.

Tabla 9. Caso de uso CU-06

ID	CU-07
Nombre	Encendido de actuadores.
Actor	Entorno RV.
Descripción	Al recibir un comando del entorno RV se activan los actuadores indicados como activos en este.
Precondiciones	El dispositivo y el entorno RV se han conectado. Se recibe un comando desde el entorno RV.
Postcondiciones	Los actuadores indicados en el comando pasan a estar encendidos.

Tabla 10. Caso de uso CU-07

ID	CU-08
Nombre	Apagado de actuadores.
Actor	Entorno RV.
Descripción	Al recibir un comando del entorno RV se desactivan los actuadores indicados como no activos en este.
Precondiciones	El dispositivo y el entorno RV se han conectado. Se recibe un comando desde el entorno RV.
Postcondiciones	Los actuadores indicados en el comando pasan a estar apagados.

Tabla 11. Caso de uso CU-08

3.2 Requisitos

En esta sección se describen los requisitos del dispositivo desarrollado. Estos se dividen en dos categorías principales: los requisitos de usuario, que definen las interacciones del usuario con el sistema, y los requisitos de sistema, que sirven para formalizar las capacidades que debe presentar el dispositivo a desarrollar.

3.2.1 Requisitos de usuario

Para definir los requisitos de usuario se hará uso de la siguiente tabla:

ID	
Nombre	
Descripción	
Prioridad	
Verificabilidad	
Necesidad	

Tabla 12. Plantilla requisitos de usuario

Los campos de la tabla son:

- **ID:** Identificador único de requisito de usuario. Sigue el patrón RU-XX, donde XX indica el número de requisito.
- **Nombre:** Identificador descriptivo del requisito.
- **Descripción:** Definición detallada del requisito de usuario.
- **Prioridad:** Indica el nivel de importancia del requisito durante el desarrollo. Puede tomar uno de los siguientes valores: “alta”, “media” o “baja”.
- **Verificabilidad:** Indicador sobre si se puede comprobar el cumplimiento del requisito a través de una prueba. Puede tomar uno de los siguientes valores: “verificable” o “no verificable”.
- **Necesidad:** Indicador sobre si este requisito es “esencial” u “opcional” para conseguir el funcionamiento deseado del dispositivo.

Los requisitos de usuario definidos son:

ID	RU-01
Nombre	Tallaje variable
Descripción	El usuario puede ajustar el tallaje del dispositivo.
Prioridad	Alta
Verificabilidad	Verificable
Necesidad	Opcional

Tabla 13. Requisito de usuario RU-01

ID	RU-02
Nombre	Libertad de movimiento
Descripción	El usuario podrá moverse libremente mientras viste el dispositivo.
Prioridad	Alta
Verificabilidad	Verificable
Necesidad	Esencial

Tabla 14. Requisito de usuario RU-02

ID	RU-03
Nombre	Comunicación Bluetooth
Descripción	El dispositivo utilizará Bluetooth para comunicarse con el dispositivo donde se ejecute la aplicación de realidad virtual
Prioridad	Alta
Verificabilidad	Verificable
Necesidad	Esencial

Tabla 15. Requisito de usuario RU-03

ID	RU-04
Nombre	Protocolo autónomo
Descripción	El protocolo de comunicación del dispositivo será independiente del motor de realidad virtual.
Prioridad	Alta
Verificabilidad	Verificable
Necesidad	Esencial

Tabla 16. Requisito de usuario RU-04

ID	RU-05
Nombre	Retroalimentación zonal
Descripción	El dispositivo podrá proveer retroalimentación a través de diferentes zonas diferenciadas del mismo.
Prioridad	Alta
Verificabilidad	Verificable
Necesidad	Esencial

Tabla 17. Requisito de usuario RU-05

ID	RU-06
Nombre	Intensidad ajustable
Descripción	El usuario podrá regular la intensidad con la que se activan los actuadores del dispositivo
Prioridad	Media
Verificabilidad	Verificable
Necesidad	Opcional

Tabla 18. Requisito de usuario RU-06

ID	RU-07
Nombre	Actuación simultánea
Descripción	El dispositivo podrá activar o desactivar varias de las zonas de actuación de manera simultánea.
Prioridad	Alta
Verificabilidad	Verificable
Necesidad	Esencial

Tabla 19. Requisito de usuario RU-07

ID	RU-08
Nombre	Interrupción de corriente
Descripción	El usuario podrá cortar la conexión entre la corriente eléctrica y el dispositivo.
Prioridad	Alta
Verificabilidad	Verificable
Necesidad	Esencial

Tabla 20. Requisito de usuario RU-08

3.2.2 Requisitos de sistema

Dentro de los propios requisitos de sistema, podemos encontrar requisitos funcionales, que detallan las capacidades del sistema, y requisitos no funcionales, que detallan las cualidades de este.

Para definir los requisitos de sistema se hará uso de la siguiente tabla:

ID	
Nombre	
Descripción	
Prioridad	
Verificabilidad	
Necesidad	
Satisface	

Tabla 21. Plantilla requisitos de sistema

Los campos de la tabla son:

- **ID:** Identificador único de requisito de usuario, sigue el patrón RS-Y-XX. “Y” podrá tomar los valores “F” o “N”, que indican si se trata de un requisito funcional o no funcional. “XX” representa la numeración de los requisitos.
- **Nombre:** Identificador descriptivo del requisito.
- **Descripción:** Definición detallada del requisito de usuario.
- **Prioridad:** Indica el nivel de importancia del requisito durante el desarrollo. Puede tomar uno de los siguientes valores: “alta”, “media” o “baja”.
- **Verificabilidad:** Indicador sobre si se puede comprobar el cumplimiento del requisito a través de una prueba. Puede tomar uno de los siguientes valores: “verificable” o “no verificable”.
- **Necesidad:** Indicador sobre este requisito es “esencial” u “opcional” para conseguir el funcionamiento deseado del dispositivo.
- **Satisface:** Identificador del requisito de usuario a partir del cual se deriva el requisito de sistema.

Los requisitos de sistema definidos son:

ID	RS-F-01
Nombre	Ajuste de largo
Descripción	El sistema permite ajustar su largo a preferencia del usuario
Prioridad	Alta
Verificabilidad	Verificable
Necesidad	Opcional
Satisface	RU-01, RU-02

Tabla 22. Requisito de sistema RS-F-01

ID	RS-F-02
Nombre	Ajuste de ancho
Descripción	El sistema permite ajustar su ancho a preferencia del usuario
Prioridad	Alta
Verificabilidad	Verificable
Necesidad	Opcional
Satisface	RU-01, RU-02

Tabla 23. Requisito de sistema RS-F-02

ID	RS-F-03
Nombre	Movimiento sin restricciones
Descripción	El sistema deberá permitir que el usuario realice movimientos completos de brazos, torso y cuello sin que el dispositivo limite su rango de movimiento.
Prioridad	Alta
Verificabilidad	Verificable
Necesidad	Esencial
Satisface	RU-02

Tabla 24. Requisito de sistema RS-F-03

ID	RS-F-04
Nombre	Conectividad Bluetooth
Descripción	El sistema podrá vincularse a otros dispositivos mediante Bluetooth.
Prioridad	Alta
Verificabilidad	Verificable
Necesidad	Esencial
Satisface	RU-03

Tabla 25. Requisito de sistema RS-F-04

ID	RS-F-05
Nombre	Enviar mensajes
Descripción	El sistema podrá recibir mensajes a través del protocolo Bluetooth.
Prioridad	Alta
Verificabilidad	Verificable
Necesidad	Esencial
Satisface	RU-03

Tabla 26. Requisito de sistema RS-F-05

ID	RS-F-06
Nombre	Recibir mensajes
Descripción	El sistema podrá enviar mensajes a través del protocolo Bluetooth.
Prioridad	Alta
Verificabilidad	Verificable
Necesidad	Esencial
Satisface	RU-03

Tabla 27. Requisito de sistema RS-F-06

ID	RS-N-07
Nombre	Protocolo de comunicación
Descripción	El sistema implementará un protocolo de comunicación que funcione de manera autónoma e independiente del motor de realidad virtual.
Prioridad	Alta
Verificabilidad	No verificable
Necesidad	Esencial
Satisface	RU-04

Tabla 28. Requisito de sistema RS-N-07

ID	RS-N-08
Nombre	Número de actuadores
Descripción	El sistema contará con N actuadores a través de los que proveer retroalimentación.
Prioridad	Alta
Verificabilidad	Verificable
Necesidad	Esencial
Satisface	RU-05

Tabla 29. Requisito de sistema RS-N-08

ID	RS-F-09
Nombre	Control mediante PWM
Descripción	El sistema podrá controlar los actuadores mediante pulsos PWM.
Prioridad	Alta
Verificabilidad	Verificable
Necesidad	Esencial
Satisface	RU-06

Tabla 30. Requisito de sistema RS-F-09

ID	RS-F-10
Nombre	Activación simultánea de actuadores
Descripción	El sistema podrá encender de manera simultánea un número cualquiera de sus actuadores.
Prioridad	Alta
Verificabilidad	Verificable
Necesidad	Esencial
Satisface	RU-07

Tabla 31. Requisito de sistema RS-F-10

ID	RS-F-11
Nombre	Apagado simultáneo de actuadores
Descripción	El sistema podrá apagar de manera simultánea un número cualquiera de sus actuadores.
Prioridad	Alta
Verificabilidad	Verificable
Necesidad	Esencial
Satisface	RU-07

Tabla 32. Requisito de sistema RS-F-11

ID	RS-N-12
Nombre	Interruptor de corriente
Descripción	El sistema contará con un interruptor físico entre este mismo y su fuente de corriente eléctrica.
Prioridad	Alta
Verificabilidad	Verificable
Necesidad	Esencial
Satisface	RU-08

Tabla 33. Requisito de sistema RS-N-12

3.3 Matriz de trazabilidad

Con el fin de realizar un seguimiento de la cobertura de los diferentes requisitos se realiza la siguiente matriz de trazabilidad (ver tabla 35). En esta encontramos los requisitos de usuario en la cabecera de las columnas frente a los requisitos de sistema en la cabecera de las filas.

	RU-01	RU-02	RU-03	RU-04	RU-05	RU-06	RU-07	RU-08
RS-F-01								
RS-F-02								
RS-F-03								
RS-F-04								
RS-F-05								
RS-F-06								
RS-N-07								
RS-N-08								
RS-F-09								
RS-F-010								
RS-F-011								
RS-N-012								

Tabla 34. Matriz de trazabilidad requisitos

4. IMPLEMENTACIÓN

En esta sección se detalla el proceso de diseño e implementación realizado en este proyecto. Se menciona tanto el diseño físico del dispositivo como la implementación de software.

4.1 Diseño físico del dispositivo

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo es diseñar un dispositivo con forma similar a un chaleco. Es importante que el diseño de este permita dar cobertura a los requisitos del sistema, las características más significativas que podemos derivar de estos son:

- El dispositivo no debe interferir en el movimiento de las extremidades superiores del usuario.
- Debe tener 16 actuadores diferentes (divididos entre el frente y la espalda).
- Debe tener un lugar donde alojar el microcontrolador y la batería correspondiente.

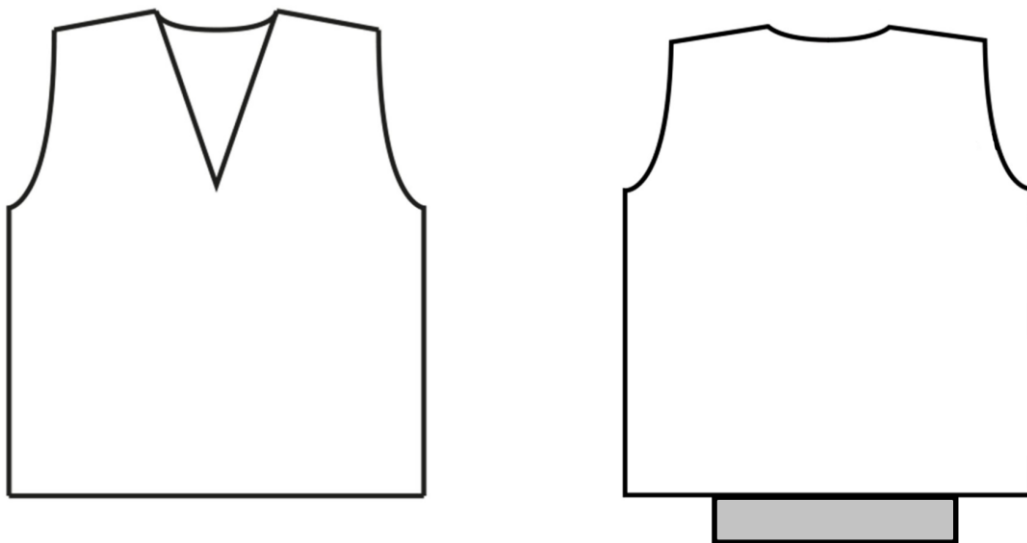


Ilustración 8. Patrón de construcción alojamiento microcontrolador

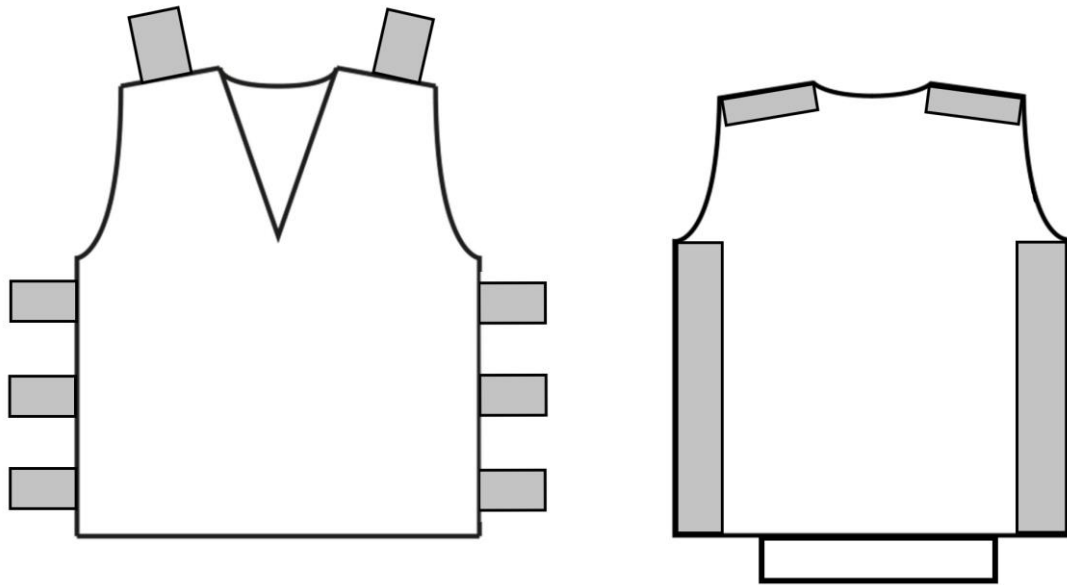


Ilustración 9. Patrón de construcción sistema de ajuste

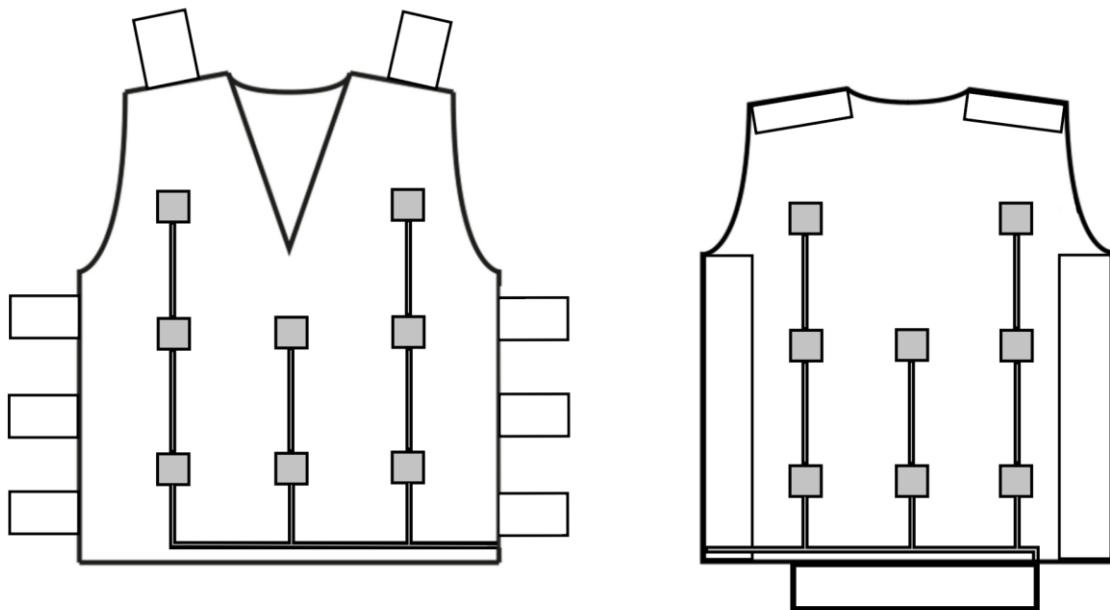


Ilustración 10. Patrón de construcción alojamiento actuadores

En estos diagramas de diseño se puede observar, en primer lugar, el espacio designado en la parte inferior del panel trasero para almacenar el microcontrolador junto con la batería (ilustración 8), lo que permitirá alimentar el dispositivo sin necesidad de una conexión permanente a la corriente eléctrica. Además, se han incorporado tiras de ajuste con sistemas de gancho y bucle (Velcro) ubicadas en los hombros y costados (ilustración 9), las cuales facilitarán la adaptación del dispositivo a diferentes tallas. Por último, se han previsto espacios específicos para los actuadores, junto con canales que permitirán llevar

los cables hasta ellos sin interferir con el uso del dispositivo por parte de los usuarios (ilustración 10).

Respecto a las conexiones, se ha decidido alimentar los actuadores directamente desde la batería; ya que estos podían llegar a requerir mayor potencia frente a la que puede llegar a suministrar el microcontrolador. Debido a esto el microcontrolador se valdrá de una serie de transistores para controlar el flujo de corriente a los diferentes actuadores.

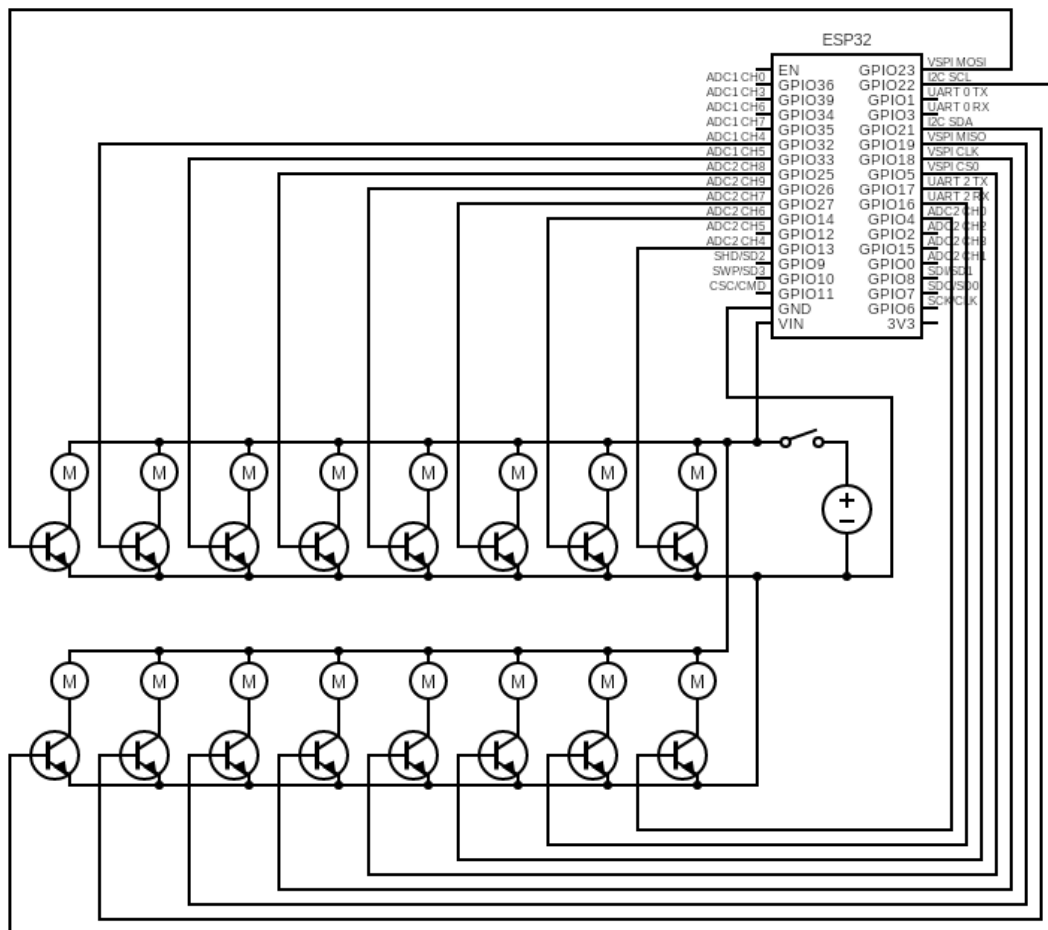


Ilustración 11. Diagrama de conexiones

Observando el diagrama de conexiones (ilustración 11), se puede apreciar como el microcontrolador utiliza los transistores a modo de interruptor; con el fin de encender o apagar los motores según se requiera. En conjunto con lo mencionado anteriormente, el conjunto de pines GPIO seleccionado para la conexión permite el control mediante pulsos PWM (Pulse Wave Modulation); de tal manera que permitirá controlar la intensidad de los actuadores.

4.2 Protocolo de mensajería

Para asegurar la escalabilidad del proyecto, se ha decidido diseñar un protocolo de mensajería que opere sobre la capa de transporte, permitiendo definir de manera flexible la estructura de los mensajes enviados por el dispositivo. Este protocolo ha sido concebido teniendo en cuenta la posibilidad de que futuras versiones del dispositivo incluyan diferentes tipos de actuadores y trabajen en conjunto con múltiples zonas del cuerpo, más allá del torso.

Con el objetivo de facilitar el intercambio de mensajes y minimizar la sobrecarga en la comunicación, se ha optado por utilizar una cadena numérica en texto plano para la estructura de los mensajes. Basado en estos criterios, el protocolo diseñado genera mensajes con la siguiente estructura:

Estructura			Longitud (Nº caracteres)
Cabecera	Común	Operación	2
		Zona	2
	Específica	Número Actuadores	2
		Resolución	1
Cuerpo			Nº actuadores * Resolución

Tabla 35. Estructura de mensaje

En la tabla 35 se detallan los campos definidos para los mensajes que el dispositivo utilizará. Es importante destacar que los campos correspondientes a la cabecera específica y al cuerpo varían en longitud según el tipo de operación. En este caso, se han especificado los campos relacionados con la única operación que se utilizará en la primera versión del dispositivo.

El significado de cada campo es el siguiente:

- **Cabecera fija:** Parte estándar para todos los mensajes del protocolo.
 - **Operación:** Define el tipo de operación al que corresponde el mensaje. En esta versión, puede tomar el valor "01", que indica vibración.
 - **Zona:** Especifica la zona del cuerpo donde se ejecutará la operación. En esta versión, el valor "01" indica el chaleco.
- **Cabecera Específica:** Parte común a todos los mensajes de un tipo específico de operación.
 - **Número actuadores:** Indica la cantidad de actuadores disponibles en la zona objetivo.
 - **Resolución:** Indica la precisión en cifras que puede adoptar la intensidad de acción de los actuadores.
- **Cuerpo:** Contiene los valores específicos que se deben aplicar a cada actuador, basados en la resolución definida.

Este protocolo asegura que el sistema pueda adaptarse a futuras revisiones y configuraciones, manteniendo una estructura clara y eficiente para la comunicación entre el dispositivo y otros sistemas.

4.3 Diseño software del dispositivo

El software de control del dispositivo se divide en tres capas: comunicación, estado y control. La capa de comunicación es la encargada de la comunicación, es decir, sus tareas se limitan al envío, recepción y decodificación de comandos. Tras esta encontramos la capa de estado, que se encarga de mantener una representación lógica del estado del dispositivo. Por último, encontramos la capa de control que se encarga de controlar los actuadores físicos del sistema.

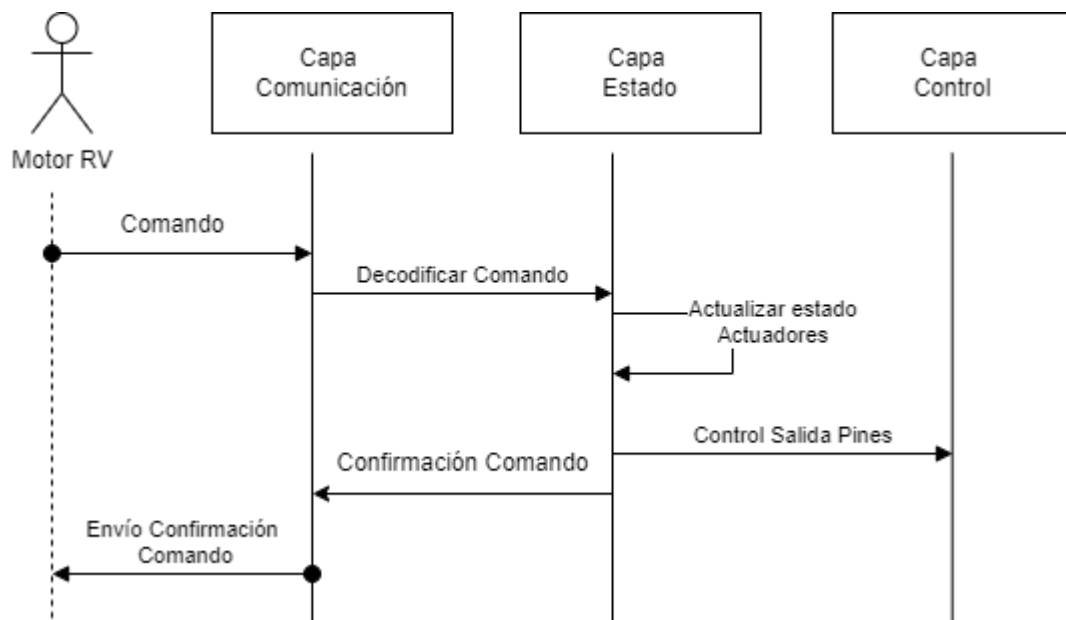


Ilustración 12. Flujo de funcionamiento

Por otro lado, en lo que respecta a los estados lógicos del dispositivo, este entra en modo de emparejamiento tan pronto como se conecta a la corriente y permanece en ese estado hasta que se establece una conexión con otro dispositivo. Una vez que la conexión se ha establecido, el sistema cambia al modo de operación, donde puede recibir comandos y controlar los actuadores. Mientras está en este modo, el dispositivo puede volver al estado de emparejamiento si la conexión con el dispositivo vinculado es interrumpida.

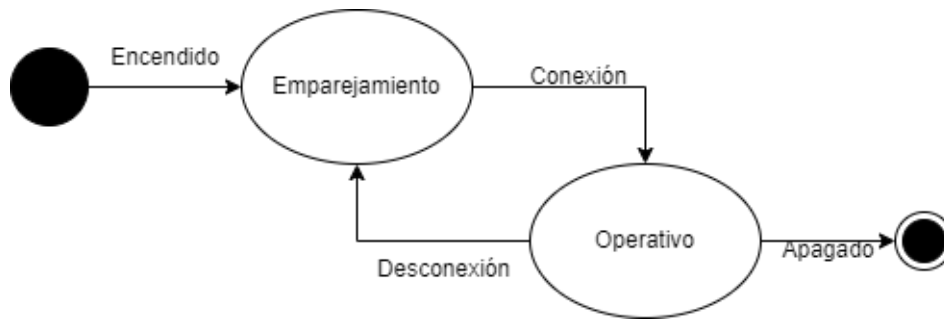


Ilustración 13. Diagrama de estados

5. EVALUACIÓN

En este apartado se presentan las pruebas realizadas con el fin de asegurar la calidad del sistema desarrollado. Estas se basan en aquellos requisitos de sistema expuestos anteriormente que se clasificaron como verificables. Para la representación de dichas pruebas se utiliza la siguiente tabla:

ID	
Nombre	
Precondiciones	
Pasos	
Resultados esperados	
Cubre	
Estado	

Tabla 36. Plantilla caso de prueba

Los campos de la tabla son:

- **ID:** Identificador único de cada caso de prueba, siguen el patrón CP-XX.
- **Nombre:** Identificador descriptivo del caso de prueba.
- **Precondiciones:** Definición del estado previo del sistema para que se pueda ejecutar el caso de prueba.
- **Pasos:** Definición detallada de las acciones a realizar durante el caso de prueba.
- **Resultados esperados:** Estado del sistema esperado al finalizar el caso de prueba.
- **Cubre:** Requisitos que verifica el caso de prueba.
- **Estado:** Resultado del caso de prueba. Puede ser “Aceptado” en caso de una ejecución satisfactoria o “Rechazado” en caso contrario.

Se han definido los siguientes casos de prueba:

ID	CP-01
Nombre	Comprobar ajustes de talla.
Precondiciones	El usuario no lleva vestido aún el dispositivo.
Pasos	1. Se desabrochan todos los sistemas de ajuste del dispositivo. 2. Se coloca el panel frontal y trasero en su posición. 3. Se juntan los sistemas de ajuste de tal manera que el dispositivo quede ceñido al cuerpo del usuario
Resultados esperados	El usuario puede moverse sin restricciones provocadas por el dispositivo, y este queda ceñido al cuerpo del usuario.
Cubre	RS-F-01, RS-F-02, RS-F-03
Estado	Aceptado

Tabla 37. Caso de prueba CP-01

ID	CP-02
Nombre	Comprobar capacidad de conexión.
Precondiciones	El dispositivo se encuentra encendido.
Pasos	1. Desde otro dispositivo con conectividad Bluetooth se intenta establecer una conexión con el dispositivo.
Resultados esperados	Ambos dispositivos quedan conectados y establecen un canal de comunicación.
Cubre	RS-F-04
Estado	Aceptado

Tabla 38. Caso de prueba CP-02

ID	CP-03
Nombre	Comprobar comandos de encendido.
Precondiciones	El dispositivo se encuentra conectado a un dispositivo que permita enviar comandos mediante Bluetooth. Los motores se encuentran apagados.
Pasos	1. Se envían los comandos correspondientes para encender cada uno de los motores y mantener el resto apagados. 2. Se envía el comando correspondiente para encender todos los motores a la vez.
Resultados esperados	Los motores quedan encendidos. Se reciben las respuestas que indican el encendido de cada motor.
Cubre	RS-F-05, RS-F-06, RS-F-10
Estado	Aceptado

Tabla 39. Caso de prueba CP-03

ID	CP-04
Nombre	Comprobar comandos de apagado.
Precondiciones	El dispositivo se encuentra conectado a un dispositivo que permita enviar comandos mediante Bluetooth. Los motores se encuentran encendidos.
Pasos	1. Se envían los comandos correspondientes para apagar cada uno de los motores y mantener el resto apagados. 2. Se envía el comando correspondiente para apagar todos los motores a la vez.
Resultados esperados	Los motores quedan apagados. Se reciben las respuestas que indican el apagado de cada motor.
Cubre	RS-F-05, RS-F-06, RS-F-11
Estado	Aceptado

Tabla 40. Caso de prueba CP-04

ID	CP-05
Nombre	Comprobar número de actuadores.
Precondiciones	El dispositivo se encuentra a la vista del usuario.
Pasos	1. Se comprueba que el número de actuadores independientes es igual a 16.
Resultados esperados	Se comprueba que hay 16 actuadores, conectados al microcontrolador.
Cubre	RS-N-08
Estado	Aceptado

Tabla 41. Caso de prueba CP-05

ID	CP-06
Nombre	Comprobar control de intensidad actuadores
Precondiciones	El dispositivo se encuentra conectado a un dispositivo que permita enviar comandos mediante Bluetooth. Los motores se encuentran apagados
Pasos	1. Se envía el comando correspondiente para encender todos los actuadores a la mínima intensidad. 2. Se envía el comando correspondiente para encender todos los actuadores en el siguiente nivel de intensidad. 3. Se repite el paso 2 hasta alcanzar la máxima intensidad.
Resultados esperados	Se distingue como los motores vibran con mayor intensidad en cada iteración
Cubre	RS-F-09
Estado	Aceptado

Tabla 42. Caso de prueba CP-06

ID	CP-07
Nombre	Comprobar interruptor de corriente.
Precondiciones	El controlador del dispositivo se encuentra conectado a la corriente eléctrica (batería). El interruptor de encendido se encuentra en posición de “apagado”.
Pasos	1. Se mide la diferencia de potencial en el controlador de actuadores. 2. Se cambia la posición del interruptor de encendido a “encendido”. 3. Se mide la diferencia de potencial en el controlador de actuadores.
Resultados esperados	En la primera medida se esperan 0V. En la última medida se esperan 5V.
Cubre	RS-N-12
Estado	Aceptado

Tabla 43. Caso de prueba CP-07

A modo de recopilación de la cobertura de los casos de prueba se ha realizado la siguiente matriz de trazabilidad. En esta encontramos los casos de prueba representados en la cabecera de cada columna y los requisitos de sistema representados en la cabecera de cada fila.

	CP-01	CP -02	CP -03	CP -04	CP -05	CP -06	CP-07
RS-F-01							
RS-F-02							
RS-F-03							
RS-F-04							
RS-F-05							
RS-F-06							
RS-N-07							
RS-N-08							
RS-F-09							
RS-F-010							
RS-F-011							
RS-N-012							

Tabla 44. Matriz de trazabilidad casos de prueba

6. PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO

En esta sección se detallan tanto la planificación del proyecto como el presupuesto que este ha tenido. A la hora de calcular el presupuesto, se detallan los costos derivados tanto de materiales, herramientas, recursos humanos y costes indirectos.

6.1 Planificación

Para el desarrollo del proyecto se ha seguido la metodología en espiral, que consiste en seguir un proceso iterativo de diseño, análisis e implementación. Esta metodología es particularmente adecuada para este proyecto, ya que permite realizar ajustes continuos sobre el prototipo del dispositivo. A medida que se avanza en su diseño, se pueden identificar y resolver problemas técnicos y de usabilidad en cada iteración, asegurando que se alcancen los objetivos establecidos.

En el siguiente diagrama de Gantt (ilustración 14), se puede observar la planificación establecida. En este se detallan las tareas en las que se ha dividido el desarrollo de este proyecto, su duración en días y sus respectivas fechas de inicio y fin. Para posteriores estimaciones de presupuesto, cabe resaltar que la media de trabajo por día ha sido de unas 3 horas, dando un tiempo de trabajo total de alrededor de **360 horas**.

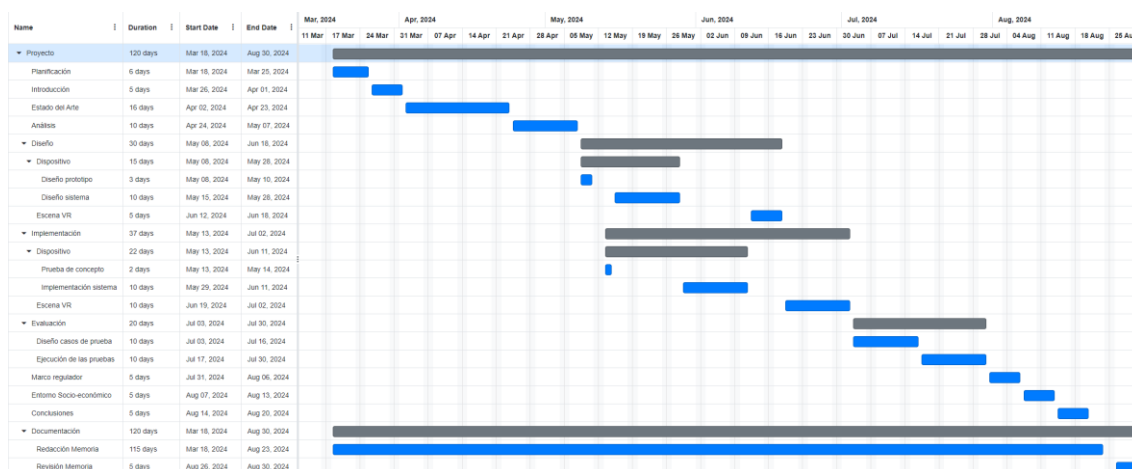


Ilustración 14. Diagrama de Gantt

6.2 Presupuesto

En esta sección se realiza un desglose de los diferentes tipos de costos asociados al desarrollo de este proyecto. Se abordarán los costos de recursos humanos, software y hardware (tanto el necesario como para el desarrollo como el necesario para la construcción del sistema). Al final se realiza un compendio de todos los costes y se presenta un presupuesto global para todo el desarrollo.

6.2.1 Recursos humanos

Para calcular estos costes partiremos del diagrama de Gantt (ilustración 14), donde podemos observar que el tiempo de trabajo total del proyecto son unas 360 horas. Una vez divididas las horas entre los diferentes roles que el autor ha asumido a lo largo del proyecto (tabla 45), estimaremos el costo en personal del proyecto utilizando los salarios medios de estas posiciones en España.

Puesto	Tiempo (horas)	Salario (€/hora)	Coste (€)
Jefe de Proyecto	81	22.21	1799.01
Arquitecto Sistemas	120	24.04	2884.8
Programador	111	17.79	1974.69
Tester	48	15.38	738.24
Totales			7396.74

Tabla 45. Presupuesto recursos humanos [25][26][27][28]

6.2.2 Recursos software

Teniendo en cuenta la amortización de productos informáticos descrita por la agencia tributaria española [29], se obtiene el siguiente desglose de los costes de software. En este caso se han podido disminuir costes gracias al uso de licencias educativas.

Software	Precio (€)	Amortización
Microsoft Office	0*	0
Onlinegantt	0	0
Visual Studio	0*	0
Unity 3D	0*	0
Arduino IDE	0	0
Draw io	0	0
Circuit diagram	0	0
Totales	0	0

Tabla 46. Presupuesto recursos software

*Licencias educativas

6.2.3 Recursos Hardware

Los recursos hardware que se han empleado en este proyecto pueden dividirse en dos categorías, los utilizados para el desarrollo del propio proyecto y los empleados en el dispositivo diseñado. En el caso de los primeros, aplicando la amortización definida por la agencia tributaria española [29], se obtiene el desglose de la tabla 47. Mientras que para los empleados en el dispositivo se calcula el coste total, visto en tabla 48.

Recurso	Precio (€)	Vida útil (meses)	Coste amortizado
Ordenador sobremesa	1200	60	120
Meta Quest 2	450	36	75
Máquina costura	300	48	37.5
Kit soldadura	50	24	12.5

Tabla 47. Presupuesto herramientas

Componente	Precio (€)
ESP32 DevKit	4
Transistores (16 uds)	0.5
Motores vibración (16 uds)	5.10
Cable	10
Tela	15
Batería portátil	20
Total	54.6

Tabla 48. Presupuesto componentes

6.2.4 Costes indirectos

A continuación, se desglosan los costes indirectos asociados al proyecto, para su cálculo se ha tenido en cuenta una duración aproximada de 6 meses de trabajo.

Producto	Coste mensual (€)	Coste total (€)
Luz	10	60
Agua	10	60
Internet	15	90
Total	35	210

Tabla 49. Presupuesto costes indirectos

6.2.5 Costes totales

Para el cómputo de los costes totales de este proyecto, se han tenido en cuenta todos los definidos anteriormente. A estos se ha añadido un margen de beneficios del 20%. Una vez calculados estos costes totales ha de añadirse el IVA correspondiente, por un valor del 21%, estos cálculos se pueden observar en la tabla 50.

Descripción	Total (€)
Recursos humanos	7396.74
Recursos software	0
Recursos hardware	245
Componentes dispositivo	54.6
Costes indirectos	210
Subtotal	7906.34
Margen beneficios (20%)	1581.268
Total (IVA no aplicado)	9487.608
IVA (21%)	1992.398
Total (IVA aplicado)	11480.01

Tabla 50. Presupuesto total

7. MARCO REGULADOR

En esta sección se revisarán las posibles restricciones legislativas aplicables a este proyecto y se detalla el por qué estas serán o no aplicables al mismo.

Ya que este proyecto se centra en la implementación del dispositivo físico, y este no se encarga de ningún tipo de captura de información; regulaciones como “Reglamento (UE) 2016/679, Reglamento General de Protección de Datos (RGPD)” [30] no se aplicarían sobre este trabajo, pero se deberían tener en cuenta en futuros desarrollos que sí recojan información del usuario.

Al tratarse de un dispositivo vestible, el cual cuenta con actuadores alimentados por corriente eléctrica es importante conocer las directivas “2014/35/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 26 de febrero de 2014 sobre la armonización de las legislaciones de los Estados miembros en materia de comercialización de material eléctrico destinado a utilizarse con determinados límites de tensión” [31] y “2014/30/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 26 de febrero de 2014 sobre la armonización de las legislaciones de los Estados miembros en materia de compatibilidad electromagnética (refundición)” [32]. Si bien no es estrictamente necesario cumplirlas, ya que están destinadas a productos comerciales, cumplirlas sería beneficioso de cara a la posible comercialización o publicación de este proyecto.

La “DIRECTIVA 2014/35/UE” tiene como objetivo garantizar que los equipos eléctricos comercializados en la Unión Europea cumplan con los requisitos esenciales de seguridad, asegurando así la protección de la salud y la seguridad de sus usuarios [31]. Para lograr este objetivo se describen procedimientos de evaluación que los fabricantes deben cumplir.

La “DIRECTIVA 2014/30/UE” tiene como objetivo garantizar que los equipos eléctricos y electrónicos que se comercializan en la Unión Europea no causen interferencias electromagnéticas inaceptables y sean inmunes a las perturbaciones electromagnéticas en su entorno [32]. A su vez, este reglamento busca permitir una correcta convivencia entre el gran número de aparatos electrónicos de uso habitual.

8. ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO

El desarrollo de este proyecto surge a partir del interés del autor en conseguir mejorar las experiencias de realidad virtual para que estas logren un mayor grado de inmersión. Si bien esta necesidad se podría haber suplido con un producto comercial, el desarrollo propio era una opción más económica.

Por el momento no se plantea la monetización de este proyecto, por lo que el impacto económico directo de este se limita a los gastos que se han incurrido durante el desarrollo. Por contraparte, los conocimientos y experiencia adquiridos a través de este trabajo podrían resultar en un impacto económico indirecto en cuanto al desarrollo profesional del autor en un futuro.

Respecto al ámbito social, la publicación de este tipo de proyectos suele abrir la posibilidad de colaboración entre desarrolladores. Esto podría ser beneficioso tanto para el autor del trabajo, ya que permitiría el refinamiento del producto final, así como la adquisición de experiencia a la hora de trabajar en equipos organizados, cómo para el resto de usuarios ya que el producto final se podría ajustar más a necesidades específicas que no se abordaron inicialmente.

9. CONCLUSIONES

En esta sección se exponen las conclusiones obtenidas tras el desarrollo del dispositivo y la redacción de este documento. Se realizará una revisión y comparación de los objetivos iniciales con los alcanzados. Se exponen posibles ramas en las que ampliar el proyecto en un futuro. Por último, se añaden las conclusiones personales del autor.

9.1 Retrospectiva sobre los objetivos

El objetivo principal consiste en **el diseño y construcción de un dispositivo periférico para sistemas de realidad virtual**. Los objetivos secundarios abordan este desafío desde tres frentes de desarrollo fundamentales: hardware, software e integración con motores de realidad virtual.

- El **diseño físico** o hardware del dispositivo es un objetivo que ha sido alcanzado de manera satisfactoria. Se ha desarrollado un dispositivo que cumple con los subobjetivos establecidos, siendo **ajustable** para diferentes usuarios y capaz de proporcionar **retroalimentación háptica configurable**. Además, el diseño permite futuras expansiones, tanto en la gama de estímulos como en la integración de dispositivos auxiliares.
- El **desarrollo software** del dispositivo ha avanzado al mismo nivel que el hardware, ya que ambas partes se han desarrollado de forma paralela y son altamente dependientes. El enfoque principal en el software ha sido el sistema de **comunicaciones**. Aunque el protocolo de transporte actual no es el que se utilizará a largo plazo, el protocolo de mensajería desarrollado permitirá la incorporación de diferentes tipos de actuadores y la integración de múltiples dispositivos que funcionen en conjunto.
- La **integración con motores de RV** es el objetivo que ha tenido una menor cobertura. Aunque se ha demostrado que el dispositivo puede comunicarse correctamente con motores como Unity3D, queda como trabajo futuro la creación de librerías o plugins que faciliten su uso en diferentes entornos de desarrollo de RV.

9.2 Trabajos Futuros

Durante el desarrollo de este proyecto se han alcanzado los objetivos planteados inicialmente. Sin embargo, existen diferentes características que podrían ser implementadas para mejorar, tanto la experiencia de usuario como la funcionalidad del propio dispositivo. A continuación, se detallan las principales:

- En el estudio preliminar se estableció que la experiencia de usuario depende en gran medida de conseguir una baja latencia en las comunicaciones. Idealmente se decidió utilizar el protocolo de comunicaciones “**ESP-NOW**”, de los microcontroladores ESP32. Puesto que esto fue descartado debido a limitaciones de presupuesto y complejidad, queda como trabajo pendiente la migración desde Bluetooth a este protocolo. Añadido a esto, la utilización de este protocolo facilitaría la coordinación de diferentes dispositivos.
- Otra de las ampliaciones orientadas a una mejora de la experiencia de usuario, es la integración de **diferentes tipos de actuadores** en el dispositivo. La implementación de otro tipo de estímulos como podrían térmicos o de resistencia al movimiento, ayudarían a crear experiencias más inmersivas y darle una mayor versatilidad al dispositivo.
- Al ser parte de los objetivos principales, mejorar la **integración con motores de realidad virtual** es una rama de trabajo futuro importante. Una alternativa a esta sería realizar una integración con aplicaciones intermediarias como puede ser la ya mencionada “bHapticsPlayer”, lo que eliminaría la necesidad de integrarse directamente con los motores de realidad virtual.
- Diseñar **diferentes soportes físicos o prendas** en las que integrar el dispositivo. Esta línea de trabajo abriría la posibilidad de utilizar múltiples dispositivos en conjunto, ampliando la cantidad de zonas en las que proveer estímulos. Por otra parte, también aumentaría la adaptabilidad al usuario.

9.3 Conclusiones personales

A continuación, se pueden encontrar una serie de conclusiones personales sobre la realización del proyecto.

El desarrollo de este proyecto ha sido una oportunidad perfecta para adquirir conocimientos y experiencia que, de otro modo, no habría obtenido en un futuro cercano. Debido a la considerable envergadura del proyecto, fue necesario gestionar las tareas y el tiempo de manera mucho más rigurosa que en ocasiones anteriores. Además, la necesidad de realizar un trabajo bien fundamentado me ha demostrado la importancia de la investigación previa en cualquier proceso de desarrollo. Aunque contaba con conocimientos previos en el campo, la investigación me permitió descubrir enfoques más adecuados para abordar ciertos aspectos y tareas. En resumen, enfrentar un proyecto de esta magnitud ha sido una fuente significativa de crecimiento en los ámbitos académico, profesional y personal.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Mersusglobal. "The Art of Immersion: Crafting Feedback in Virtual Reality". MERSUS TECHNOLOGIES. <https://mersus.io/the-art-of-immersion-crafting-feedback-in-vr/> (acceso: 3 abril 2024)
- [2] J. K. Gibbs, M. Gillies y X. Pan. "A comparison of the effects of haptic and visual feedback on presence in virtual reality". *International Journal of Human – Computer Studies*, vol. 157, art. 102717, enero 2022. [En línea]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S107158192100135X>. Acceso: 6 abril 2024
- [3] H. Culbertson, S. B. Schorr y A. M. Okamura, "Haptics: The Present and Future of Artificial Touch Sensation", *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, vol. 1, pp 385-409, mayo 2018. [En línea]. Disponible en <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-control-060117-105043;jsessionid=Hre3h3WodCSGipA2871HJDLPMtRWMFwxHg395Hj-.annurevlive-10-241-10-71>. Acceso: 10 abril 2024
- [4] "TESLASUIT Dev Kit". Teslasuit. <https://teslasuit.io/products/teslasuit-4/> (acceso: 15 abril 2024)
- [5] VR Electronic Ltd. "TECHNICAL SPECIFICATION TESLASUIT Version 4.7/4.7.2 XR". Teslasuit, EEUU, Informe, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://teslasuit.io/wp-content/uploads/TS-specs.pdf>.
- [6] I. Salieiev. "High Voltage Electrical Safety Training". Teslasuit. <https://teslasuit.io/use-cases/high-voltage-electrical-safety-training/>. (acceso: 15 abril 2024)
- [7] K. Beavan. "Feel the drive". Teslasuit. <https://teslasuit.io/use-cases/feel-the-drive/> (acceso: 15 abril 2024)
- [8] "bHaptics", bHaptics. <https://www.bhaptics.com/es/>. (acceso: 17 abril 2024)
- [9] "bHaptics Player" bHaptics. <https://www.bhaptics.com/es/software/player/?type=vrplayer> (acceso: 17 abril 2024)
- [10] "Conozca los juegos de VR compatibles con el TactSuit". bHaptics. <https://www.bhaptics.com/es/compatibility/vr/>. (acceso: 17 abril 2024)
- [11] Lucas_VRTech's et al., "LucidGloves", Repositorio de Github, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/LucidVR/lucidgloves>. (acceso: 19 abril 2024)
- [12] P. Ranade. "System-on-chip technology comes of age". EE|Times. https://www.eetimes.com/system-on-chip-technology-comes-of-age/?_ga (acceso: 16 abril 2024)
- [13] "Buy a Raspberry Pi". Raspberry Pi. <https://www.raspberrypi.com/products/>. (acceso: 16 abril 2024)
- [14] Raspberry Pi Ltd. "Raspberry Pi Zero 2 W". Raspberry, EEUU, Informe, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpizero2/raspberry-pi-zero-2->

w-product-brief.pdf? gl=1*1j8d6u8* ga*MTIzMzM5NDk4My4xNzIxNDE1OTMz* ga 22FD70LWDS*MTcyMzEzODg1My4xLjEuMTcyMzEzOTYxNi4wLjAuMA.. (acceso: 16 abril 2024)

[15] “Arduino Hardware”. Arduino. <https://www.arduino.cc/en/hardware>. (acceso: 19 abril 2024)

[16] “Arduino Nano 33 IoT”. Arduino, EEUU, Informe, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/ABX00027-datasheet.pdf> (acceso: 24 agosto 2024)

[17] “ESP32-WROOM-32UE”. Espressif Systems, EEUU, Informe, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf (acceso: 21 abril 2024)

[18] “Installing”. ESPRESSIF. <https://docs.espressif.com/projects/arduino-esp32/en/latest/installing.html>. (acceso: 21 abril 2024)

[19] “ESP-IDF Programming Guide”. ESPRESSIF. <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/index.html>. (acceso: 22 abril 2024)

[20] K. Brunnström, E.Dima, T. Qureshi, M. Johanson, M. Andersson y M. Sjöström, “Latency impact on Quality of Experience in a virtual reality simulator for remote control of machines”, *Signal Processing: Image Communication*, vol. 89, art. 116005, noviembre 2020. [En línea]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0923596520301648>. Acceso: 23 abril 2024

[21] “ESP32 Latency Testing”. Eroc Wells. <https://ericdavidwells.com/projects/esp32latency/> (acceso: 23 abril 2024)

[22] F. Kuan. “Bluetooth VS Bluetooth Low Energy: A Detailed Comparison”. MOKO SMART. <https://www.mokosmart.com/bluetooth-vs-bluetooth-low-energy-a-detailed-comparison/>. (acceso: 23 abril 2024)

[23] S. Dietrich. “Understanding the Basics of Pulse Width Modulation (PWM)”. Control Automation. <https://control.com/technical-articles/understanding-the-basics-of-pulse-width-modulation-pwm/>. (acceso: 01 junio 2024)

[24] “Develop for the Meta Quest Platform”. Meta Quest. <https://developer.oculus.com/quest/> (acceso: 17 julio 2024)

[25] “Oferta de Empleo Jefe Proyecto”, Jobted. <https://www.jobted.es/?j=jefe%20proyecto>. (acceso: 20 julio 2024)

[26] “Ofertas de Empleo Arquitecto Sistemas”, Jobted. <https://www.jobted.es/?j=arquitecto%20sistemas> (acceso: 20 julio 2024)

[27] “Ofertas de Empleo Programador”, Jobted. <https://www.jobted.es/?j=programador>. (acceso: 20 julio 2024)

[28] “Ofertas de Empleo Tester”, Jobted. <https://www.jobted.es/?j=tester>. (acceso: 20 julio 2024)

[29] Agencia Tributaria, "Coeficientes de amortización lineal," Manual IRPF 2020, Capítulo 7, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://sede.agenciatributaria.gob.es/Sede/ayuda/manuales-videos-folletos/manuales-practicos/irpf-2020/capitulo-7-rendimientos-actividades-economicas-directa/fase-1-determinacion-rendimiento-neto/amortizaciones-dotaciones-ejercicio-fiscalmente-deducibles/requisitos-generales/coeficientes-amortizacion-lineal.html>. (acceso: 3 agosto 2024)

[30] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, "Reglamento (UE) 2016/679 del Parlamento Europeo y del Consejo de 27 de abril de 2016 relativo a la protección de las personas físicas en lo que respecta al tratamiento de datos personales y a la libre circulación de estos datos," Diario Oficial de la Unión Europea, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:02016R0679-20160504>. (acceso: 12 agosto 2024)

[31] Comisión Europea, "Directiva 2014/95/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 22 de octubre de 2014 sobre la divulgación de información no financiera e información sobre diversidad por parte de determinadas grandes empresas y grupos," Diario Oficial de la Unión Europea, L 96, pp. 357-374, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2014/096/L00357-00374.pdf>. (acceso: 12 agosto 2024).

[32] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, "Directiva 2014/59/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de mayo de 2014 por la que se establece un marco para la recuperación y la resolución de entidades de crédito y empresas de servicios de inversión," Diario Oficial de la Unión Europea, L 96, pp. 79-106, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2014/096/L00079-00106.pdf>. (acceso: 12 agosto 2024)