



**Análisis de usabilidad para un sistema de captura de movimiento inalámbrico basado  
en unidades de medida inercial (IMU)**

**Dana Lucía Garay Prada**

Código. 10561914956

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Ingeniería Biomédica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá D. C., Colombia

2023

**Análisis de usabilidad para un sistema de captura de movimiento inalámbrico basado  
en unidades de medida inercial (IMU)**

**Dana Lucía Garay Prada**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniera Biomédica**

Director (a):

Ing. Andrés Ruiz Olaya PhD.

Codirector (a):

Ing. Sebastián Jaramillo Isaza PhD.

Línea de Investigación:

• Diseño. • Biomateriales. • Rehabilitación.

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Ingeniería Biomédica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá D.C., Colombia

2023

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

El trabajo de grado titulado  
\_\_\_\_\_, Cumple con  
los requisitos para optar  
Al título de \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_

Firma del Tutor

\_\_\_\_\_

Firma Jurado

\_\_\_\_\_

Firma Jurado

## *Dedicatoria*

*A mis padres, Olga y Julio, que me han enseñado a ser una mejor persona cada día. Gracias infinitas por su apoyo y amor. Gracias por creer en mí. Gracias por impulsarme a seguir mis sueños.*

*A mi hermana Vivian, por ser la luz que guía mi camino, mi compañera, mi mejor amiga. Gracias por tu apoyo inquebrantable.*

*A mi abuela Nidia, por sus palabras de amor y sus historias mágicas que incentivaron mi curiosidad de entender el mundo.*

*A Willow, quien me ayudo a renacer.*

*Dana Garay*

## Agradecimientos

Quiero agradecerle a Dios y a la vida por permitirme esta oportunidad maravillosa. Por las lecciones aprendidas en este proceso de crecimiento académico y personal.

Le agradezco a mis directores de proyecto, los ingenieros Sebastián Jaramillo y Andrés Ruiz, por su paciencia y gentileza. Gracias por tomarse el tiempo de enseñarme y motivarme cada día de este proyecto, por no abandonarme, por respetar y respaldar mis ideas. Mi admiración para ustedes.

A mis amigos Jehov, Gabriela y Javier, que estuvieron en los momentos más difíciles de este proyecto. Que siempre creyeron en mí, me ayudaron y atravesaron junto a mi este proceso.

También quiero agradecerle a mis compañeros y futuros colegas ingenieros, por su apoyo, por sus consejos y compromiso. Sin ustedes este proyecto no sería lo mismo. Deseo que consigan aquello que merecen.

Por último, quiero agradecerme a mí misma, por el esfuerzo realizado durante estos últimos años, por la resiliencia que he cultivado. Por no renunciar en esos momentos en donde todo indicaba que no se podría, pero se pudo. Gane mucho.

*“Del mismo dolor, vendrá un nuevo amanecer”*

*Gustavo Cerati.*

## Contenido

<b>Resumen .....</b>	<b>11</b>
<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>13</b>
1.1    Introducción y antecedentes .....	13
1.2    Planteamiento del problema .....	16
1.3    Objetivos .....	18
1.3.1    Objetivo general .....	18
1.3.2    Objetivos específicos .....	18
1.4    Justificación .....	18
1.5    Alcance.....	19
<b>Capítulo 2. Marco teórico .....</b>	<b>21</b>
2.1    Usabilidad.....	21
2.1.1    Antecedentes (Historia) .....	21
2.1.2    Definición usabilidad.....	22
2.1.3    Características de usabilidad.....	22
2.1.4    Pruebas de usabilidad .....	23
2.1.5    Tipos de pruebas de usabilidad .....	23
2.1.6    Métodos de evaluación de usabilidad .....	25
2.1.7    La usabilidad y el diseño de producto .....	28
2.2    Sistemas de captura de movimiento.....	28
2.2.1    Tipos de sistemas de captura de movimiento.....	28
2.3    Impresión 3D .....	30
2.3.1    Tipos de impresoras 3D .....	30
2.3.2    Materiales.....	31
2.4    Método de elementos finitos .....	33
2.4.1    Tipos de análisis .....	34
<b>Capítulo 3. Diseño Metodológico .....</b>	<b>35</b>
3.1    Fase 1: Especificaciones del diseño .....	35
3.2    Fase 2: Diseño mecánico e impresión 3D .....	37
3.3    Fase 3: Simulación de elementos finitos .....	41
3.4    Fase 4: Evaluación de usabilidad del sistema.....	43

<b>Capítulo 4. Resultados y Discusión.....</b>	<b>48</b>
4.1 Fase 1: Especificaciones del diseño .....	48
4.2 Fase 2: Diseño mecánico e impresión.....	48
4.3 Fase 3: Simulación de elementos finitos .....	50
4.4 Fase 4: Evaluación de usabilidad.....	51
4.4.1 Primera prueba .....	51
4.4.2 Segunda prueba .....	52
4.4.3 Encuesta de satisfacción .....	56
4.4.4 Encuesta de validación .....	60
4.5 Discusión.....	67
4.5.1 Diseño e impresión de las carcasas .....	67
4.5.2 Simulación de elementos finitos .....	68
4.5.3 Método de fijación.....	69
4.5.4 Hallazgos de usabilidad .....	70
<b>Capítulo 5. Conclusiones.....</b>	<b>72</b>
5.1 Conclusiones.....	72
5.2 Recomendaciones .....	74
5.3 Trabajos futuros .....	74
<b>Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>76</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>81</b>

## Lista de figuras

Figura 1 <i>Sistema de captura de movimiento alámbrico: carcasa, sensor y soporte</i> .....	16
Figura 2 <i>Sistema de captura de movimiento alámbrico: unidad de control y cables</i> .....	17
Figura 3 <i>Tipos de sistemas de captura de movimiento</i> .....	29
Figura 4 <i>Tipos de tecnología de impresión y materiales</i> .....	31
Figura 5 <i>Propiedades de algunos materiales para impresión 3D</i> .....	33
Figura 6 <i>Prototipo electrónico</i> .....	35
Figura 7 <i>Primer diseño: Vista isométrica de carcasa completa, base y tapa</i> .....	37
Figura 8 <i>Impresión 3D del primer diseño en ABS</i> .....	38
Figura 9 <i>Longitud Trocantérea – Tibial lateral</i> .....	45
Figura 10 <i>Pruebas del sistema con el sensor ubicado en el muslo</i> .....	46
Figura 11 <i>Pruebas del sistema con el sensor ubicado en la zona lumbar. Vel. 4,82 km/h</i> .....	46
Figura 12 <i>Carcasa final y sistema de fijación</i> .....	50
Figura 13 <i>Trayectoria de desplazamiento en mujeres. Velocidad de marcha: 4,82 km/h (3 mph)</i> .....	53
Figura 14 <i>Trayectoria de desplazamiento en hombres. Velocidad de marcha: 4,82 km/h (3 mph)</i> .....	53
Figura 15 <i>Trayectoria de desplazamiento en mujeres. Velocidad de marcha: 6,44 km/h (4mph)</i>	54
Figura 16 <i>Trayectoria de desplazamiento en hombres. Velocidad de marcha: 6,44 km/h (4mph)</i>	54
Figura 17 <i>Trayectoria de desplazamiento en mujeres. Velocidad de marcha: 8.05km/h (5mph)</i> ..	55
Figura 18 <i>Trayectoria de desplazamiento en hombres. Velocidad de marcha: 8.05km/h (5mph)</i> .	55
Figura 19 <i>Encuesta de satisfacción - Parte 1</i> .....	56
Figura 20 <i>Encuesta de satisfacción - Parte 2</i> .....	57



Figura 21 <i>Encuesta de satisfacción - Parte 3</i> .....	58
Figura 22 <i>Encuesta de satisfacción - Parte 4</i> .....	59
Figura 23 <i>Encuesta de satisfacción - Parte 5</i> .....	60
Figura 24 <i>Encuesta de validación - Parte 1</i> .....	60
Figura 25 <i>Encuesta de validación - Parte 2</i> .....	61
Figura 26 <i>Encuesta de validación - Parte 3</i> .....	62
Figura 27 <i>Encuesta de validación - Parte 4</i> .....	63
Figura 28 <i>Encuesta de validación - Parte 5</i> .....	64
Figura 29 <i>Encuesta de validación - Parte 6</i> .....	65
Figura 30 <i>Encuesta de validación - Parte 7</i> .....	66
Figura 31 <i>Encuesta de validación - Parte 8</i> .....	67
Figura 32 <i>Comparación mecánica de los sistemas alámbrico e inalámbrico</i> .....	73

**Lista de Tablas**

Tabla 1	<i>Materiales comunes en impresión 3D</i> .....	32
Tabla 2	<i>Medidas de los componentes</i> .....	36
Tabla 3	<i>Diseño iterativo de la carcasa</i> .....	39
Tabla 4	<i>Simulación tracción para ABS</i> .....	42
Tabla 5	<i>Simulación compresión de ABS</i> .....	42
Tabla 6	<i>Simulación tracción PLA</i> .....	43
Tabla 7	<i>Simulación compresión PLA</i> .....	43
Tabla 8	<i>Propiedades de los filamentos</i> .....	49
Tabla 9	<i>Propiedades del Neopreno</i> .....	49
Tabla 10	<i>Desplazamiento del sensor ubicado en el muslo</i> .....	51
Tabla 11	<i>Ventajas y desventajas de impresión 3D por FMD</i> .....	67
Tabla 12	<i>Ventajas y desventajas de la Fijación de sistemas IMU entre la ropa y la piel</i> .....	69

## Resumen

Las pruebas de usabilidad son un conjunto de métodos empleados para evaluar la facilidad de uso y la eficacia de un producto. Estas pruebas a menudo implican que los usuarios interactúen con el dispositivo mientras se registran sus interacciones y opiniones, buscando identificar mejoras en el diseño con el fin de optimizar el funcionamiento final del producto y aumentar el nivel de satisfacción del usuario.

Este proyecto se llevó a cabo en cuatro fases, en donde cada una contribuyó al desarrollo y evaluación del sistema de análisis de movimiento inalámbrico. En la primera fase se identificó las dimensiones de las carcasas que alojarían los componentes necesarios. Para la segunda, se realizó la creación de las piezas de las carcasas en un software de diseño asistido por computadora (CAD), para luego ser impresas a través de la técnica FDM. Adicionalmente, se determinó que para los soportes del sistema se utilizarían bandas por sus ventajas en comodidad, sujeción precisa, estabilidad, entre otras. En la tercera fase, se ejecutaron simulaciones de elementos finitos para evaluar la dureza y la resistencia al impacto de los materiales seleccionados, específicamente ABS y PLA, proporcionando datos importantes sobre la capacidad de estos para resistir situaciones de estrés y cargas externas.

Finalmente, en la última fase del proyecto, se ejecutaron dos pruebas diferentes para el análisis de usabilidad del sistema. Estas pruebas se centraron en evaluar la facilidad de uso al caminar, con el sensor ubicando en diferentes zonas del cuerpo, lo que permitió aclarar tanto la comodidad como el nivel de fijación al momento de realizar la actividad.

La información recopilada de las interacciones y opiniones de los usuarios del sistema se reflejó en dos encuestas efectuadas, una por cada prueba, para observar el nivel de agrado del usuario con el diseño. La mayoría de los usuarios reportaron un alto grado de aceptación y comodidad, considerando que el sistema era fácil de usar.

Este trabajo no solo contribuye a aumentar la cantidad de investigaciones relacionadas con la usabilidad en elementos tangibles, sino también en resaltar la importancia de considerar la satisfacción y comodidad del usuario en el diseño de sistemas de análisis de movimiento.

**Palabras clave:** Unidades de Medida Inercial, captura de movimiento, impresión 3D, diseño, usabilidad.

## Abstract

Usability testing is a set of methods used to evaluate the usability and effectiveness of a product. These tests often involve users interacting with the device while recording their interactions and opinions, seeking to identify design improvements in order to optimize the final performance of the product and increase the level of user satisfaction.

This project was carried out in four phases, each contributing to the development and evaluation of the wireless motion analysis system. In the first phase, the dimensions of the housings that would house the necessary components were identified. For the second phase, the housing parts were created in computer-aided design (CAD) software and then printed using the FMD technique. Additionally, it was determined that bands would be used for the supports of the system due to their advantages in terms of comfort, precise fastening, stability, among others. In the third phase, finite element simulations were carried out to evaluate the hardness and impact resistance of the selected materials, specifically ABS and PLA, providing important data on their ability to withstand stress and external loads.

Finally, in the last phase of the project, two different tests were executed for the usability analysis of the system. These tests focused on evaluating the ease of use when walking, with the sensor placed in different areas of the body, which allowed to clarify both the comfort and the level of fixation when performing the activity.

The information gathered from the interactions and opinions of the users of the system was reflected in two surveys conducted, one for each test, to observe the level of user satisfaction with the design. Most users reported a high degree of acceptance and comfort, finding the system easy to use. This work not only contributes to increase the amount of research related to usability in tangible elements, but also in highlighting the importance of considering user satisfaction and comfort in the design of motion analysis systems.

**Keywords:** Inertial Measurement Units, motion capture, 3D printing, design, usability.

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1 Introducción y antecedentes

La usabilidad se refiere al grado de facilidad con el que un sistema, servicio o producto puede ser utilizado. Su propósito es mejorar la interacción y experiencia de uso entre los usuarios y el producto [1].

La usabilidad de un producto se define por su capacidad de ser comprensible, fácil de aprender, eficiente de usar y satisfacer las necesidades del usuario. La evaluación de la usabilidad ayuda a garantizar que el producto cumpla con las necesidades de los usuarios y que proporcione una experiencia satisfactoria y eficiente, convirtiéndose en una parte crucial en el diseño de cualquier herramienta o sistema que busque ser accesible y agradable a todo tipo de usuarios, mejorando la productividad y la calidad del producto final [2].

Existen múltiples estrategias y enfoques metodológicos planteados para la evaluación de la usabilidad, y cada uno de estos métodos emplea diferentes técnicas y recursos para evaluar estos aspectos. La selección del enfoque específico dependerá de factores diversos y consideraciones específicas a cada caso en particular. La selección de una metodología para la evaluación de la usabilidad proporciona al diseñador conocimiento, guía, apoyo y resultados durante el proceso de desarrollo del diseño. Además, permite evaluar el concepto de diseño desde su concepción hasta la fase final, obteniendo mejoras en el diseño de forma iterativa hasta el producto final. Actualmente, existen varias propuestas para métodos de usabilidad enfocadas en sitios web o desarrollo de software, sin embargo, existe una ausencia significativa de pruebas de usabilidad aplicadas en productos tangibles [3].

La realización de estas pruebas de usabilidad es fundamental, ya que nos permite identificar con antelación aquellos posibles problemas que podrían impactar la experiencia de los usuarios. Algunos inconvenientes, como un diseño poco claro o desorganizado, dificultades de accesibilidad para ciertos usuarios y el uso de términos técnicos que podrían no ser comprendidos por todos los participantes, afectan negativamente la satisfacción y la facilidad de uso del producto. Por lo cual se han clasificado en cuatro categorías las diferentes pruebas que se pueden emplear para evaluar un producto: Estudio exploratorio o formativo, evaluación o prueba sumativa, prueba de validación o verificación y pruebas de comparación [4]. Cada tipo de prueba tiene su propio propósito y

enfoque, y se pueden utilizar en diferentes etapas del proceso de desarrollo para obtener resultados más efectivos.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, en el año 2017 se llevó a cabo una investigación dirigida por B. Klaassen y su equipo, donde se evaluaba la usabilidad de un sistema de detección inercial portátil en pacientes que habían sobrevivido a un accidente cerebrovascular. El objetivo del sistema “INTERACTION” era medir la calidad de vida de los pacientes en su vida diaria. Se evaluaba el nivel de movimiento en sus extremidades superiores e inferiores tanto en un entorno controlado como en un entorno familiar. El propósito del estudio era evaluar la opinión de profesionales de la salud provenientes de diferentes instituciones médicas (Suiza y Países Bajos). Se buscaba determinar su nivel de satisfacción al usar este sistema en comparación con los métodos convencionales. Además, se pretendía averiguar si estos profesionales estuviesen dispuestos a adoptar un sistema de captura de movimiento de todo el cuerpo en su práctica clínica [5].

A través de una entrevista semiestructurada y tres cuestionarios (dos cerrados y uno abierto), se determinó que es más probable que se utilice un sistema de medición inercial de cuerpo completo en centros de rehabilitación o en entornos ambulatorios. Sin embargo, es poco común que los profesionales trabajen con pacientes en sus hogares. También se encontró que este sistema sería poco empleado en sus instituciones debido al enfoque de estas, observándose que llevaría demasiado tiempo ponerse y quitarse el traje, además del tiempo de preparación que requiere el sistema. Finalmente, se concluyó que sigue siendo difícil para los profesionales de la salud determinar la calidad de vida de sus pacientes sin dispositivos que se vinculen a los sensores de movimiento, que permitan establecer el entorno en el que sus pacientes desarrollan sus actividades, por lo cual, en el estudio se recomienda vincular estos sistemas de detección y análisis de movimiento a una red de objetos interconectados (IoT) [5].

En investigaciones posteriores [6] se menciona que los estudios de usabilidad en dispositivos portátiles son escasos. Para superar esta deficiencia, en la ciudad de Beijing, China, Liang y su equipo realizaron un estudio de usabilidad en dispositivos de fitness portátiles convencionales, analizando las funciones y la escala de usabilidad de diferentes sistemas. Este estudio involucró una muestra de 388 participantes y comparó las funciones y atributos de siete dispositivos diferentes: Samsung Gear S, Huawei Honor B2, Apple Watch, Fitbit Surge, Jawbone Up3, Mi Band y Misfit Shine. Para llevar a cabo esta comparación se utilizó un enfoque mixto que incluyó la comparación de características y la evaluación de la Escala de Usabilidad del Sistema (SUS). En el caso de la escala SUS, se considera que una puntuación más alta del cuestionario estandarizado, indica una mayor usabilidad del producto.

Los resultados del estudio revelaron que, en primer lugar, se encontró que las funciones de los dispositivos portátiles tienden a ser homogéneas entre varias marcas, lo que sugiere una gran similitud en lo que respecta a las características de estos dispositivos. Además, se identificó que la

calificación SUS otorgada por un consumidor a un dispositivo no está directamente relacionada con la marca del dispositivo, sino más bien con la experiencia personal del usuario. Esto indica que la percepción de la usabilidad de un dispositivo está influenciada por la experiencia individual de uso y no por la marca en sí. Esto nos permite concluir que es importante destacar la importancia de considerar la percepción del usuario al evaluar la usabilidad de dispositivos portátiles.

Por otro lado, en el ámbito de la evaluación de la usabilidad de dispositivos portátiles con enfoque clínico, se destaca que la mayoría de las evaluaciones de usabilidad realizadas se han centrado principalmente en adultos sanos y existe una deficiencia de análisis en los potenciales usuarios finales. Por lo que es esencial profundizar en la perspectiva de los pacientes que padecen enfermedades crónicas en relación con estos dispositivos portátiles, ya que serán ellos quienes usen estos sistemas con mayor frecuencia. Es así como en la revista de neuroingeniería y rehabilitación (*Journal of neuroengineering and rehabilitation*) se publica en el 2021, una investigación que aborda la evaluación de la usabilidad de dispositivos portátiles para medir la marcha y la actividad física en enfermedades crónicas [7]. En esta revisión sistematizada se llevó a cabo un análisis exhaustivo para identificar cualquier tipo de estudio que abarcara la evaluación de usabilidad de dispositivos portátiles diseñados para medir la movilidad, incluyendo la marcha y la actividad física, en cinco grupos de pacientes con enfermedades crónicas: Enfermedad de Parkinson (EP), trastorno pulmonar obstructivo crónico (EPOC), insuficiencia cardiaca congestiva (ICC), esclerosis múltiple (EM) y fractura de fémur proximal (PFF).

De los 37 estudios seleccionados, se observó una considerable variedad en la calidad de los informes, en donde, los métodos empleados para evaluar la usabilidad, los dispositivos empleados y los objetivos de los estudios, complicaron cualquier comparación significativa. La mayoría de los estudios (26) emplearon cuestionarios como método de evaluación de usabilidad. Por otro lado, en el caso de los estudios que optaron por utilizar entrevistas (17), se observó que un número reducido proporciono guías temáticas y, en más de un tercio de los casos (6), no se brindaron detalles acerca de los métodos de análisis utilizados. Los hallazgos revelaron que la medición y la documentación de la usabilidad en dispositivos portátiles en el contexto de condiciones de salud crónicas ha sido inadecuada. A pesar de que la variedad en la forma en que estos dispositivos se usaron, indica cierto grado de aceptación por los sujetos de prueba, no se debe dar por sentado lo que piensa el paciente, en vez de esto sería ideal tener evidencia de la satisfacción del usuario con el uso del producto.

En el año 2015 el grupo de investigación Bioingeniería de la Universidad Antonio Nariño desarrolló un sistema de captura de movimiento basado en sensores inerciales, el cual se ha empleado en aplicaciones académicas y de investigación. El dispositivo desarrollado estaba compuesto de una unidad de control y cinco sensores inerciales, la obtención de información relacionada con la captura, transmisión y visualización de los datos del movimiento. Los resultados demostraron que el sistema cumple con los requisitos fundamentales para la captura de

movimientos. De acuerdo con el diseño del dispositivo, se recalca su asequibilidad y portabilidad, así como la importancia de desarrollar proyectos que permitan ser utilizados en entornos fuera del laboratorio, permitiendo el acceso a estas innovaciones tecnológicas no solo al personal de la salud, sino también a estudiantes de campos relacionados o a aquel que esté interesado [8].

## 1.2 Planteamiento del problema

El sistema de captura de movimiento basado en sensores inerciales, desarrollado en el 2015 por el grupo de investigación en Bioingeniería de la Universidad Antonio Nariño, permite realizar el registro y caracterización cinemática de diferentes movimientos. Gracias a varios proyectos a lo largo de los últimos 8 años, se obtuvo como resultado un sistema alámbrico de bajo costo que puede ser utilizado por los estudiantes y/o profesionales de la salud para evaluar alteraciones en los patrones de movimiento. [9]

Aunque el sistema permite adquirir parámetros cinemáticos, presenta falencias en su construcción física. Se ha identificado que el sistema de análisis de movimiento alámbrico carece de un diseño ergonómico, evitando que las carcasas se adapten a las características físicas de los músculos, asimismo el sistema de fijación de correas elásticas impide que los sensores mantengan una posición adecuada durante la ejecución de la prueba, ya que pueden desplazarse con facilidad al momento de ejecutar los respectivos movimientos. Esto se debe a que las bandas elásticas son proclives a deformarse perdiendo su capacidad elástica, lo cual genera un ajuste inadecuado en las extremidades del usuario y aumenta el riesgo de interrupción de la prueba.

### Figura 1

*Sistema de captura de movimiento alámbrico: carcasa, sensor y soporte*



*Nota.* Desarrollado por el grupo de investigación en bioingeniería. UAN.

Teniendo en consideración lo anterior, para diseñar un sistema de análisis de movimiento inalámbrico se deben tener en cuenta aspectos de ergonomía que permitan realizar un diseño capaz de adaptarse a las extremidades en que se suelen realizar las pruebas, además de replantear el diseño para el sistema de fijación, que permita un ajuste cómodo y seguro para el usuario. Adicionalmente, es importante que el diseño de la estructura interna de las nuevas carcasas considere la incorporación de la nueva referencia de sensores IMU y un microcontrolador; encargado de la transmisión inalámbrica de datos a los dispositivos periféricos. Estas mejoras



posibilitan la eliminación de las interferencias generadas por los cables que conectan los sensores con la unidad central, así como reducir la interferencia de los cables en el movimiento natural de la persona.

Por lo cual, las carcasas que contendrán los sensores deben asegurar su posición estable en varios puntos de colocación en las extremidades, además de evitar cualquier movimiento o desplazamiento no deseado de sus componentes en el interior. De esta forma se busca prevenir la presión excesiva del elástico en el músculo, visto en el modelo alámbrico. Otro aspecto que se busca corregir se relaciona con la adquisición de los datos. En el modelo que utiliza cables, esta adquisición de datos está limitada por la presencia de cables, lo que restringe tanto la amplitud del movimiento como la fluidez de este. Por lo tanto, desarrollar y evaluar un sistema sólido, fácil de usar y estético que proporcione comodidad al usuario durante las pruebas y garantice la precisión en la recopilación de datos, incrementara la usabilidad del producto.

## Figura 2

*Sistema de captura de movimiento alámbrico: unidad de control y cables*



*Nota.* Desarrollado por el grupo de investigación en bioingeniería. UAN.

La mejora del sistema propone el uso de la técnica de impresión en 3D para crear un diseño adecuado y riguroso, que tenga en cuenta las características electrónicas de los sensores y otros componentes del sistema. Esta técnica se considera efectiva, ya que permite producir piezas fáciles de ensamblar y económicas, lo que a su vez facilita probar diferentes conceptos de diseño hasta encontrar el más adecuado. Adicionalmente, la investigación busca determinar los materiales más apropiados para la impresión de los objetos, teniendo en cuenta variables mecánicas como resistencia al impacto, durabilidad, baja densidad, entre otras. Una de las principales distinciones entre los anteriores proyectos ejecutados y el proyecto sugerido radica en la evaluación de la usabilidad que se llevara a cabo para dicho diseño. Además de la minuciosidad en el proceso de diseño, ya que, para llegar a una fase de pre comercialización, el producto debe cumplir con múltiples requisitos en términos de ergonomía, estética, funcionalidad y modularidad. Considerando estos argumentos, es crucial determinar y evaluar la usabilidad de un nuevo diseño propuesto para el sistema de captura de movimiento basado en unidades de medida inercial, para

desarrollar un sistema que presente una calidad óptima tanto a nivel de diseño del producto como de su funcionalidad. Es así como surge la siguiente pregunta de investigación:

*¿Cuál es el nivel de usabilidad del sistema de captura de movimiento basado en unidades de medida inercial del grupo Bioingeniería y como se podrían integrar estos resultados en la mejora del diseño del producto?*

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo general***

Evaluar la usabilidad de las carcasas y soportes diseñados para un sistema inalámbrico de análisis de movimiento basado en unidades de medida inercial (IMU), durante la instrumentación en cinco sujetos de prueba.

### ***1.3.2 Objetivos específicos***

- Identificar los requisitos del diseño que posibiliten una mejor adaptación de las carcasas y soportes en las diferentes partes del cuerpo.
- Diseñar un modelo 3D de las carcasas y soportes utilizando software de diseño asistido por computador CAD.
- Construcción y análisis mecánico de las carcasas utilizando herramientas de simulación de software para su futura impresión.
- Cuantificar la usabilidad del sistema diseñado mediante pruebas y técnicas de interrogación y observación a los usuarios para obtener datos cualitativos sobre la facilidad de uso.
- Realizar una comparación entre la funcionalidad de las carcasas y soportes entre el modelo a desarrollar y el modelo existente.

## **1.4 Justificación**

Aunque el análisis de usabilidad es una práctica aplicable en muchos productos, en la investigación no se evidencian numerosas referencias para el análisis de objetos físicos, ya que la mayoría de las investigaciones se enfocan en la evaluación de usabilidad para software y páginas web. Por lo cual, son escasos los estudios disponibles que se refieren a la evaluación de la usabilidad mediante el uso de diseños CAD e impresión 3D [10], [11].

Por otro lado, el diseño y manufactura de dispositivos para aplicaciones biomédicas cobra mayor relevancia como opción laboral para los ingenieros biomédicos, así que técnicas como la impresión 3D permiten abordar este campo, ya que se pueden crear objetos de gran detalle en un solo paso superponiendo capas del material elegido. Con estas características, es posible elegir esta técnica para el desarrollo del diseño e impresión de las carcasas, puesto que el sistema de análisis de movimiento inalámbrico pretende integrar factores humanos importantes como ergonomía, facilidad de empleo, eficacia, eficiencia, satisfacción, calidad del producto, entre otros.

Por su facilidad de imprimir prácticamente cualquier diseño, es posible obtener productos cómodamente accesibles, atractivos, utilizables por una amplia variedad de personas, independiente de sus habilidades o capacidades, intuitivo y de evidente funcionamiento, lo que permite mejorar el nivel de usabilidad del sistema [12]. Otra ventaja de la técnica de impresión 3D es que posibilita originar prototipos sin invertir en una amplia variedad de materiales, por lo que se pueden construir y evaluar varios modelos hasta conseguir el prototipo final idóneo. Esto aprovechando las herramientas y recursos disponibles en la universidad.

Por lo tanto, la implementación de usabilidad en el diseño beneficiaría a usuarios y diseñadores [13], y afecta a todo el proceso, desde los costos de producción, hasta la estética y calidad del producto, la selección de materiales y las herramientas empleadas en su fabricación y comercialización.

## **1.5 Alcance**

La realización de este proyecto busca mejorar e incrementar las herramientas con las que cuenta la Universidad Antonio Nariño en el campo de biomecánica y rehabilitación, con el objetivo de realizar un diseño novedoso, atractivo y útil para un sistema de análisis de movimiento inalámbrico que permitan el estudio de movimiento en las diferentes extremidades del cuerpo. Se busca garantizar que el sistema cumpla con los estándares establecidos para la usabilidad de un producto, asegurando que el sistema sea accesible, fácil de usar y eficiente para todos los usuarios.

Este proyecto se divide en dos aspectos esenciales. En primer lugar, se busca desarrollar un diseño para las carcasas y soportes del sistema inalámbrico, que permita proteger los componentes encargados de adquirir la información. Las carcasas deberán contener principalmente un sensor de orientación UM7-LT, una placa MKR WiFi 1010 y una batería LiPo de 3.7 V y 500 mA; mientras que los soportes deben cumplir con los requisitos de ser flexibles, resistentes, cómodos, adaptarse a los cambios de volumen de los músculos al momento de realizar el movimiento, no desplazarse, no deformarse y no generar presión excesiva en los puntos de ubicación. Para cumplir con lo anterior, es necesario efectuar un análisis de organización de los diversos componentes electrónicos, determinar las medidas del sistema a diseñar y establecer una

base que permita fijar el tamaño del modelo en 3D, considerando los requisitos ergonómicos para la posterior impresión de las piezas y la adecuada fijación de los soportes.

En segundo lugar, y como objetivo principal de este trabajo, se llevará a cabo una evaluación de la comodidad y satisfacción de los usuarios al interactuar con el sistema. El propósito de este análisis es detectar los posibles retos en la interacción de los usuarios con las carcasas y soportes que puedan generar un impacto negativo en la experiencia general del usuario. Al evaluar el diseño del sistema por medio de encuestas, se analizará la estabilidad de los sensores durante la realización de diversos movimientos. Los resultados que se obtengan permitirán establecer el grado de usabilidad, resistencia y facilidad de uso con los que cuenta el diseño propuesto, crucial para garantizar una experiencia positiva y satisfactoria para los usuarios. Es importante destacar que para este trabajo no está contemplado el desarrollo de la electrónica, programación de los microcontroladores y sensores, ni el desarrollo de aplicaciones o software, correspondientes a la implementación del sistema de captura de inercial inalámbrico.

## Capítulo 2. Marco teórico

### 2.1 Usabilidad

#### 2.1.1 Antecedentes (*Historia*)

Durante los primeros años de la década de 1970, el ingeniero de IBM, Harlan Crowder fue una de las primeras personas en plantear la idea de la facilidad de uso en el campo de la tecnología, acuñando el término “user-friendly” (amigable para el usuario) describiendo la incapacidad de los sistemas informáticos para comunicarse y ser útiles a los usuarios. Posteriormente, otros fabricantes como Xerox, Apple y Microsoft adoptaron el término y lo utilizaron en sus campañas para impulsar la venta de ordenadores personalizados. A inicios de los años 80 el término “user-friendly” comenzó a ser cada vez más subjetivo y poco riguroso. Al no tenerse claro el significado exacto de que una tecnología sea “amigable para el usuario” se generó como consecuencia el concepto de la usabilidad en el ámbito de la ergonomía de software, haciendo referencia a la facilidad de uso del producto.

Sin embargo, para los años 90 existieron diferentes enfoques para entender que era la usabilidad y como medirla. Autores como Shackel; Wixon & Wilson; Shneiderman y el mayormente conocido Jacob Nielsen, definieron la usabilidad a partir de diferentes criterios de medición. Estos enfoques incluyen la perspectiva orientada al producto, donde se analiza que características del producto lo hacen fácil de usar y que mide la usabilidad de acuerdo con las propiedades ergonómicas del producto; la perspectiva orientada al usuario, que se centra en los aspectos del usuario que determinan la facilidad de uso, como el esfuerzo mental que la persona realiza al ejecutar una tarea y las actitudes del usuario; la perspectiva orientada a la ejecución, que examina como se usa un producto con medidas objetivas del resultado de la facilidad de uso del objeto en la ejecución de una tarea; y la perspectiva orientada al contexto de uso, que reconoce que un mismo producto puede ser más fácil de usar en algunas condiciones que en otras [14]. La diversidad de perspectivas limitaba la discusión de los expertos y obstaculizaba el trabajo de los profesionales en el ámbito de la usabilidad. Por eso, los esfuerzos se enfocaron en conciliar las orientaciones y llegar a un consenso sobre una definición formal de usabilidad que pudiera servir de referencia [15]. La evaluación de la usabilidad ayuda a garantizar que el producto cumpla con las necesidades de los usuarios y proporcione una experiencia satisfactoria y eficiente.

### ***2.1.2 Definición usabilidad.***

De acuerdo con la norma internacional ISO 9241-210:2019, la usabilidad se define como “Grado en el que un sistema, producto o servicio puede ser usado por usuarios específicos para conseguir metas específicas con eficacia, eficiencia y satisfacción en un contexto de uso específico” [16]. Esto se refiere a la facilidad con la que las personas pueden utilizar una herramienta, producto o sistema para alcanzar un objetivo, sin importar el nivel de habilidad o conocimientos técnicos con los que cuente el usuario; donde no solo se enfoca en la funcionalidad, sino también en la estética visual, el contexto de uso y la capacidad del producto para transmitir información clara y concisa [15]. La definición de usabilidad no solo hace referencia a el atributo de calidad del producto, sino también a la metodología de diseño y su evaluación asociada [3]. Lo que permite hablar de la usabilidad como el concepto que engloba un conjunto de procesos y metodologías que garantizan empíricamente el cumplimiento de la funcionalidad, utilidad y uso necesarios para el producto.

### ***2.1.3 Características de usabilidad.***

Algunas características para que un producto, sistema o servicio sea utilizable, se definen a partir de los siguientes conceptos [4]:

**La eficacia** se refiere a la manera en la que el producto se ajusta a las expectativas de los usuarios y a la facilidad con la que pueden utilizarlo para lograr sus objetivos. Por lo general, esta medida se evalúa cuantitativamente mediante la tasa de error. La prueba de usabilidad para determinar la eficacia es necesario relacionarla con un porcentaje del total de usuarios.

**La eficiencia** es la velocidad con la que el objetivo de usuario se puede lograr de forma precisa y completa. Suele medirse en tiempo y es una medida de la rapidez con la que se puede realizar una tarea.

**La satisfacción** se refiere a las percepciones, sentimientos y opiniones del usuario sobre el producto, usualmente recopilados por a través de preguntas escritas y verbales. Es más probable que los usuarios se desempeñen mejor con un producto que cumpla sus necesidades que con uno que no. En general, se les solicita a los usuarios que evalúen y clasifiquen los productos que prueban, lo que ayuda a revelar la causas y razones de los problemas que pueden surgir.

**La capacidad de aprendizaje** es un componente de la eficacia y se refiere a la habilidad del usuario para utilizar el sistema luego de haber recibido un corto entrenamiento. También se refiere a la capacidad de los usuarios para recordar el uso del sistema o volver a aprenderlo después de periodos de inactividad.

**La accesibilidad** nos habla de tener acceso a los productos necesarios para lograr un objetivo. Sin embargo, también puede referirse a la capacidad de que el producto sea utilizable por personas con discapacidades o que se encuentren en contextos especiales. Esto permite aclarar y simplificar el diseño para personas que enfrentan limitaciones temporales (lesiones) o situacionales (malas condiciones, luz insuficiente).

#### ***2.1.4 Pruebas de usabilidad***

Las pruebas de usabilidad ayudan a evaluar la facilidad de uso y la satisfacción de los usuarios al interactuar con el producto, permitiendo identificar problemas que pueden afectar la experiencia del usuario [14]. El término prueba de usabilidad hace referencia al proceso que implica la participación de personas como sujetos de prueba, representativos de la prueba objetivo, con el fin de evaluar el grado en el que un producto o servicio cumple con las características específicas de usabilidad. Las pruebas de usabilidad son una herramienta de investigación con raíces en la metodología experimental clásica. Existen diversas pruebas que se pueden realizar, desde experimentos clásicos con muestras grandes y diseños complejos, hasta estudios cualitativos informales con un solo participante.

Algunos elementos básicos de las pruebas de usabilidad son [4]:

- Desarrollo de preguntas de investigación u objetivos de prueba.
- Uso de una muestra representativa de usuarios finales que pueden o no ser elegidos al azar.
- Representación del entorno de trabajo real.
- Observación de usuarios finales que usan o revisan una representación del producto.
- Entrevistas y sondeos controlados de los participantes por parte del moderador de la prueba.
- Colección de medidas cuantitativas y cualitativas de rendimiento y preferencias.
- Recomendación de mejoras al diseño del producto

#### ***2.1.5 Tipos de pruebas de usabilidad***

Se encuentran cuatro diferentes tipos de prueba que nos permiten analizar la usabilidad de un producto [4].

**Estudio exploratorio o formativo** se lleva a cabo en las primeras etapas del ciclo de desarrollo de un producto, cuando aún se encuentra en las fases preliminares de definición y diseño. En este punto del ciclo de desarrollo ya se deberían haber definido el perfil del usuario y el modelo de uso del producto. Este estudio busca examinar la eficacia de los conceptos de diseños preliminares, aquí los diseñadores se beneficiarían al saber desde un principio si el usuario capta

intuitivamente los elementos fundamentales y distintivos del producto. Estas pruebas suelen requerir una interacción extensa entre el participante y el moderador de la prueba para determinar la efectividad de los conceptos de diseño iniciales. Por lo general, este estudio suele ser informal y se vale de la colaboración entre el participante y el moderador para explorar el proceso del pensamiento del usuario (participante). Mientras exploran el producto juntos, el moderador realiza una entrevista casi continua o alienta al participante a pensar en voz alta para identificar la impresión del usuario. En esta prueba es posible pedirles a los participantes sus ideas sobre cómo mejorar las áreas confusas del diseño. En las pruebas posteriores, donde se enfatiza más en medir el rendimiento del usuario mediante la recolección de datos cuantitativos, en las exploratorias se busca comprender por qué el usuario se desempeña mediante la recolección de datos cualitativos. La prueba exploratoria hace énfasis en la discusión, el análisis de conceptos y procesos de pensamiento, lo que ayuda a dar forma al diseño final.

**Evaluación o prueba sumativa**, también conocida como prueba de recopilación de información o de evidencia, es una de las pruebas de usabilidad más comunes que se realizan. Es probablemente la más simple y directa de diseñar y ejecutar para alguien que es nuevo en el campo de la usabilidad. Se lleva a cabo al inicio o a la mitad del ciclo de desarrollo del producto, después de que se haya establecido el diseño o la organización fundamental del producto. Su propósito es extender los resultados de la prueba exploratoria mediante la evaluación de la usabilidad de operaciones y aspectos específicos del producto. En vez de explorar la impresión del participante del producto, el objetivo es ver que tan bien el usuario puede realizar tareas realistas completas y detectar deficiencias específicas de usabilidad en el producto. Su metodología se sitúa entre la exploración informal de la prueba exploratoria y la medición más rigurosa de las pruebas de validación. En la prueba de evaluación el usuario siempre ejecuta tareas específicas, en vez de comentar su impresión del producto o sistema, el moderador interactuará menos con el participante, ya que se pone menos énfasis en los procesos de pensamiento y en los comportamientos reales, recolectando medidas cuantitativas.

**La prueba de validación o de verificación** se hace al final del ciclo de desarrollo del producto, y pretende medir la usabilidad en comparación con puntos de referencia establecidos o, en caso de verificación, conformar que los problemas descubiertos anteriormente se solucionaron y que no se hayan introducido nuevos problemas. La prueba de validación suele hacerse más cerca del lanzamiento del producto, a diferencia de las pruebas descritas anteriormente. Su finalidad es evaluar porque el producto se compara con un estándar de usabilidad establecido, ya sea un estándar de rendimiento relacionado con el proyecto, un estándar interno de la empresa o incluso el estándar de rendimiento del competidor, asegurando que el producto cumpla con dicho estándar antes de su lanzamiento y, si no, determinar las razones por las que no lo cumple, asegurar que los problemas de usabilidad encontrados en pruebas previas se abordaron y corrigieron adecuadamente. Las pruebas de validación se llevan a cabo de forma similar que las pruebas de evaluación, pero con tres excepciones principales. Antes de la prueba se establecen o identifican



puntos de referencia o estándares para las tareas de prueba. Estos pueden ser medidas específicas de tiempo o errores, o simplemente solucionar los problemas encontrados en pruebas exploratorias anteriores. A los participantes se les asignan tareas para realizar sin o con muy poca interacción con un moderador de la prueba, y probablemente no se les pide que expresen sus pensamientos en voz alta. El enfoque principal es la recopilación de datos cuantitativos. Una prueba de validación necesita enfatizar más en la rigurosidad y consistencia experimental, debido a que se están haciendo juicios cuantitativos significativos sobre el producto.

**Las pruebas de comparación** pueden utilizarse junto con cualquiera de las pruebas mencionadas anteriormente. Su objetivo es comparar dos o más diseños, como dos diseños de producto distintos. La prueba de comparación se emplea comúnmente para determinar que diseño es más fácil de usar o aprender, o para entender mejor las ventajas y desventajas de las diferentes propuestas de diseño. Su metodología consiste en comparar dos o más diseños diferentes uno del otro. Se recopilarán datos de rendimiento y preferencias para cada opción y se compararán los resultados. La prueba de comparación se puede realizar informalmente como una prueba exploratoria, o se puede hacer de manera rigurosa y controlada como un experimento clásico, con participantes que actúan como grupo de control y otro experimental.

#### ***2.1.6 Métodos de evaluación de usabilidad***

La clasificación de los métodos de evaluación de usabilidad se divide de acuerdo con diferentes criterios, tales como el grado de implicación del usuario, los escenarios de tarea, el uso de reglas o el objetivo de evolución. Los métodos mencionados a continuación son algunos de los más citados [17].

- **Evaluación Heurística:** Permite analizar la comodidad de la interfaz o del producto con principios reconocidos de usabilidad (como los 10 principios de Nielsen sobre heurísticas de usabilidad o las 8 reglas de oro de Ben Shneiderman [3]) a través de la inspección de evaluadores expertos. Se puede utilizar a lo largo de todo el proceso de desarrollo, y en cada etapa se pueden considerar diferentes enfoques y artefactos para aplicar el método. Generalmente, esta evaluación se lleva a cabo en un laboratorio y depende mayormente en la subjetividad del experto, obteniendo una medida de usabilidad cualitativa. Los criterios de los expertos incluyen tanto los resultados como las recomendaciones del análisis del artefacto. Se suelen usar pocos recursos y tiempo en la realización de esta evaluación.
- **Recorrido pluralista:** Este proceso, involucra tanto a desarrolladores como a expertos y usuarios. Se trabaja con prototipos y se solicita a los usuarios que realicen ciertas tareas mientras se registran todas las interacciones. Posteriormente, se discuten los problemas y decisiones tomadas durante el proceso. Aquí se combinan tres perspectivas distintas del sistema: experto (lo que se debe), usuarios

(lo que se quiere) y desarrolladores (lo que se puede). El método tiene una mayor fortaleza en las primeras etapas de desarrollo, ya que tiene un impacto significativo en los cambios propuestos y ayuda a establecer un marco de trabajo para futuros modelos de mayor nivel. Por lo general, se lleva a cabo en un entorno de laboratorio y es subjetivo para los participantes con una medición cualitativa de usabilidad. El comportamiento los usuarios no se ve alterado por la presencia de un observador, ya que los usuarios pueden realizar sus observaciones y sacar sus propias conclusiones, sin embargo, en el proceso de debate es posible que el usuario pueda sentirse intimidado al estar frente a un equipo de desarrollo y un grupo de expertos. En este método se hace una mediana inversión de recursos, tiempo y organización.

- **Grupo de discusión dirigido:** Suele reunir entre 6 a 9 usuarios con el fin de discutir aspectos relacionados con el sistema o producto. El moderador (con énfasis en factores humanos) es responsable de preparar la lista de aspectos a discutir y recopilar la información necesaria durante la discusión. Esto permite capturar las reacciones espontáneas del usuario y las ideas que evolucionan durante el proceso activo del grupo. Las apreciaciones surgen a través del debate, basado en los sentimientos o pensamientos personales de cada participante, lo que permite recopilar opiniones, experiencias o apreciaciones del sistema. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los datos obtenidos tienden a ser poco confiables y difíciles de analizar debido a que no son estructurados, como estas ideas son generadas en debate, pueden verse alteradas por la presencia del moderador. En cuanto al costo, requiere una inversión media de recursos.
- **Entrevistas:** Consiste en realizar una serie de preguntas en el cual el usuario debe responder a un revisor. El revisor adapta la entrevista de forma en que obtenga el mayor beneficio en cada sesión. Las preguntas comprenden aspectos como su experiencia con el producto, actitud e impresiones. Estas entrevistas se pueden llevar a cabo en un laboratorio o en un entorno real, obteniendo apreciaciones del usuario y datos cualitativos del sistema. Generalmente, se efectúa una baja inversión de recursos.
- **Cuestionarios:** En este método, el usuario encuestado responde a preguntas cerradas y predefinidas sin interacción directa con el entrevistador. Aunque son menos flexibles que una entrevista, este método tiene la ventaja de poder alcanzar un mayor número de usuarios y generar informes estadísticos con mayor facilidad. La prueba se puede llevar a cabo en un entorno real o laboratorio controlado. Estos estudios suelen brindar información subjetiva y objetiva, aunque los cuestionarios sean diligenciados de forma subjetiva, una muestra suficientemente grande permite tener una visión objetiva del producto. La inversión de recursos es baja,

especialmente si se aprovechan los recursos tecnológicos. El Sistema de Evaluación de Usabilidad Estándar, también conocido como SUS, es uno de los cuestionarios estandarizados más conocidos que facilita la medición de cómo los usuarios perciben la usabilidad de un sistema [18].

- **Encuestas:** Esta técnica permite la recopilación de información, datos y comentarios de un tema en específico. Por medio de una lista de preguntas presentada a los participantes, se estima conocer su experiencia con el producto. Las encuestas pueden realizarse en formularios en línea, por teléfono, por correo o de forma presencial. Suele utilizarse en campos como la investigación del mercado, la evaluación de productos o servicios, la opinión pública, entre otros. Es importante definir con claridad los objetivos de la encuesta, seleccionar una muestra representativa de los potenciales consumidores, elaborar preguntas claras y relevantes, además de tener en cuenta la privacidad y confidencialidad de los participantes. Luego, es necesario analizar los resultados para generar conclusiones y tomar decisiones basadas en la información obtenida. Este método permite obtener información cuantitativa y cualitativa sobre diversos aspectos de interés [19].
- **Pensado en voz alta:** En esta prueba se solicita a los usuarios que comuniquen en voz alta sus pensamientos, sentimientos u opiniones mientras interactúan con el sistema, beneficiando la recolección de una amplia variedad de actividades cognitivas. Son pruebas que se pueden realizar fácilmente en un entorno controlado o en un escenario real, permitiendo adquirir información de manera concisa y brindar una retroalimentación detallada. Esto permite comprender el modelo mental de la tarea y proporciona datos sobre la terminología utilizada, las funcionalidades deseadas, y las necesidades en la documentación. Gracias a la necesidad de realizar un diseño de la prueba, que no constituye un proceso natural para el usuario, se requiere una considerable inversión de recursos.
- **Interacción constructiva:** Este procedimiento es una variante de la prueba pensar en voz alta, en la cual en lugar de tener un solo usuario haciendo la prueba del sistema, se involucran dos usuarios de forma conjunta. La ventaja principal radica en que es mucho más natural, ya que las personas tienden a verbalizar cuando intentan resolver un problema en conjunto y también hacen más comentarios. Sin embargo, la desventaja es que los usuarios pueden tener diferentes estrategias de aprendizaje, esto implica que se genere una interferencia entre las opiniones de los participantes, lo cual dificulta la capacidad de comprender el modelo mental de la tarea. Estas pruebas se suelen realizar en laboratorios, por lo cual los recursos involucrados para la ejecución y análisis del método suelen ser altos.

- **Método del conductor:** Este método se enfoca entre los usuarios inexpertos y tiene como objetivo descubrir sus necesidades de información, lo que permite ofrecer un mejor entrenamiento y documentación, así como posibles mejoras en la interfaz que reducen la necesidad de hacer preguntas. Esta prueba es ejecutada en un laboratorio, y contiene un alto grado de intromisión, ya que el comportamiento de algunos usuarios se ve alterado por la presencia del conductor.
- **Estudio de campo:** Este método se centra en los elementos concretos del entorno en el que se ejecuta el sistema a evaluar. Para ello, se seleccionan perfiles de usuarios reales, se diseñan entrevistas y se organizan sesiones de observación directa del entorno de trabajo. Durante estas sesiones, se registra información visual como fotos y archivos de trabajo. El resultado final de este método es la representación del modelo mental del usuario en relación con la tarea y los artefactos tangibles involucrados en la interacción. Esta información resulta muy útil durante las etapas de definición del sistema.

### ***2.1.7 La usabilidad y el diseño de producto***

El diseño de producto es un proceso de imaginar [20], crear y perfeccionar productos que resuelven problemas o necesidades de los usuarios [21]. A través de la planificación, desarrollo y creación de ofertas comerciales que satisfagan una demanda específica.

El diseño del producto implica la conceptualización, diseño, prototipado, pruebas y refinamiento de la pieza hasta que esté lista para su comercialización y uso por parte de los usuarios. El objetivo principal del diseño de producto es originar soluciones innovadoras y atractivas que mejoren la experiencia del usuario y generen valor tanto para los consumidores como para las empresas.

## **2.2 Sistemas de captura de movimiento**

Los sistemas de captura de movimiento son un conjunto de técnicas, que por medio de la tecnología se registran y reproducen los movimientos de una persona en un entorno virtual. Estos sistemas tienen aplicaciones en campos como la industria del cine, los videojuegos, la animación, la investigación médica y otros sectores donde se requiere capturar y analizar el movimiento humano de manera precisa [22].

### ***2.2.1 Tipos de sistemas de captura de movimiento***

Existen diferentes tipos de tecnología para la captura del movimiento. Sistemas del tipo electromecánicos, electromagnéticos, ópticos e inerciales hacen parte de una amplia variedad de opciones para registrar los diferentes movimientos del cuerpo. Cada uno de estos sistemas presenta

ventajas y desventajas que influyen en su idoneidad y que llevan a ser seleccionados en función de las necesidades específicas de cada caso [23]. Por ejemplo, los sistemas electromecánicos son conocidos por su precisión en la medición, mientras que los sistemas ópticos ofrecen una alta velocidad de captura.

### Figura 3

*Tipos de sistemas de captura de movimiento*



*Nota.* Tomado de: [22]

Los sistemas de captura de movimiento basados en unidades de medida inercial IMU (Sensores inerciales) son pequeños dispositivos electrónicos dotados de un acelerómetro, un giroscopio y un magnetoscopio, los cuales proporcionan información sobre la aceleración, velocidad angular y orientación del objeto o persona. Entre las diversas aplicaciones de estos sistemas encontramos navegación de aviones, robótica, realidad virtual, la captura de movimiento, el control de movimiento de vehículos, entre otros [24].

Aunque existen diferentes sistemas de captura de movimiento disponibles en el mercado, con diferentes tecnologías, la mayoría de estos sistemas resultan costosos debido al alto valor del software y el nivel de precisión de los componentes, dificultando su adquisición para muchos usuarios. Una de las soluciones a este problema involucra desarrollar métodos más económicos que permitan crear sistemas más accesibles.

## 2.3 Impresión 3D

La impresión 3D es un proceso de fabricación aditiva, para la construcción de objetos tridimensionales. Para el proceso de impresión, es necesario contar con un diseño preliminar digital en 3D. Estos diseños son realizados por medio de sistemas de Diseño Asistido por Ordenador (CAD), los cuales permiten la creación, edición, análisis y visualización de modelos en tres dimensiones [25]. Las ventajas de esta técnica son bastante llamativas para el diseño de productos, por lo cual se suele emplear en la construcción de prototipos, destacando la facilidad del proceso de impresión, la versatilidad de los parámetros al momento de imprimir, la calidad y acabado de los objetos, además del costo asequible de los materiales comúnmente empleados en el proceso.

### 2.3.1 Tipos de impresoras 3D

La diversidad entre las tecnologías empleadas por cada máquina para llevar a cabo la impresión facilita la categorización de los distintos tipos de impresoras. Es así como se pueden catalogar en tipos de técnicas para la impresión 3D. A continuación, se describirán las tres técnicas consideradas más relevantes: Sinterización selectiva por láser (SLS), Estereolitografía (SLA) y deposición de material fundido (FMD) [26].

**Sinterización selectiva por láser (SLS):** Este proceso hace uso de un láser de alta potencia para fusionar y solidificar capas sucesivas de polvo. Este polvo es el material del que estará compuesta la pieza, suele emplearse mayormente el plástico, aunque también se hace empleo de materiales como cerámicas, nylon, cristal, poliestireno, entre otros. Esta tecnología consigue una alta precisión en la fabricación de las piezas, además de una disminución significativa en el tiempo de impresión. Al lograr imprimir objetos con geometrías complejas y estructuras internas huecas, suele ser empleada para la fabricación de prototipos o piezas funcionales. Aun así, su elevado costo de adquisición y mantenimiento dificultan su obtención.

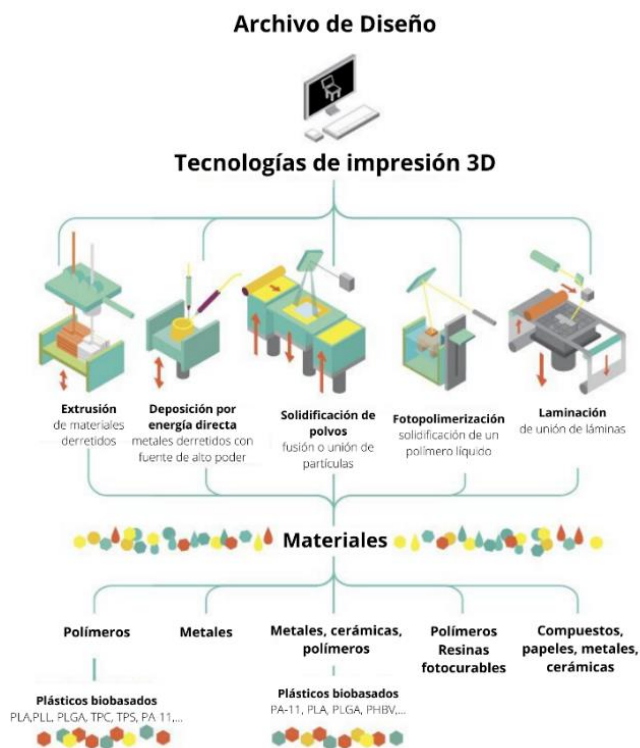
**Estereolitografía (SLA):** Esta tecnología utiliza resinas fotosensibles para crear un objeto. Un láser ultravioleta apuntará a un cubo de resina, dibujará el diseño capa por capa, la base en la que descansa la pieza se desplazará de arriba hacia abajo para que la luz ejerza nuevamente la acción de corte durante el nuevo baño hasta tener el objeto en sí [27]. Este método permite obtener piezas de alta calidad, duras y resistentes. Estas piezas suelen ser empleadas para la creación de moldes y prototipos.

**Deposición de material fundido (FMD):** Esta técnica mediante la fusión y extrusión de un filamento termoplástico permite construir objetos tridimensionales capa por capa. El material en estado sólido se funde y es expulsado por la boquilla en minúsculos hilos que se solidifican capa a capa de acuerdo con la forma del diseño. Estas impresoras usan termoplásticos como el acrilato butadieno estireno (ABS), el ácido poliláctico (PLA), el Nylon, entre otros. Esta técnica permite la construcción de prototipos a bajo costo, fabricación de piezas sencillas. Entre sus

ventajas se encuentra su facilidad de operar, su velocidad de impresión, amplia selección de materiales, además de su precisión, fiabilidad y repetibilidad.

#### Figura 4

*Tipos de tecnología de impresión y materiales*



*Nota.* Tomado de: [28]

### 2.3.2 Materiales

Los materiales empleados comúnmente en la impresión 3D varían en su composición y en sus propiedades físicas de acuerdo con la técnica utilizada. En la impresión 3D, se emplean diversos polímeros para crear objetos. Un polímero es una macromolécula compuesta por cadenas de unidades repetitivas conocidas como monómeros [29].

En la tabla 1, se encuentran algunos ejemplos de los polímeros más comunes empleados en las técnicas de impresión: Sinterización selectiva por láser (SLS), Estereolitografía (SLA) y Deposición de material fundido (FMD).

Mientras que en la figura 5, se presenta una tabla que resume algunas de las propiedades de los materiales más utilizados en las tres técnicas de impresión previamente mencionadas. Cada escala de color representa el nivel o grado de la propiedad que tiene el material en cuestión.

**Tabla 1**

*Materiales comunes en impresión 3D*

<b>Técnica</b>	<b>Material</b>	<b>Descripción</b>
<b>SLS</b>	Nylon (poliamida)	Material altamente empleado debido a su resistencia a la tracción y a la abrasión. Además de su buena flexibilidad y tenacidad. El nylon tiene aplicaciones en piezas de ingeniería y prototipos funcionales.
	Polipropileno (PP)	Este material es conocido por su baja densidad y resistencia química, lo que facilita su uso en elementos que resistan a la corrosión, tales como componentes químicos y envases.
	Policarbonato (PC)	El PC es resistente al impacto y es capaz de soportar temperaturas relativamente altas, por lo cual se emplea en piezas que deban resistir altas temperaturas y componentes de resistencia a impactos.
<b>SLA</b>	Resina Acrílica	Estas resinas ofrecen una alta calidad superficial y detalles finos. Son adecuadas para aplicaciones en las que se requiere precisión y detalle. Suele emplearse en modelos dentales y joyería.
	Resina Epoxi	Este material es duradero y resistente, lo que permite crear piezas que estarán sometidas a estrés mecánico o aplicaciones médicas.
<b>FMD</b>	ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)	Este material es conocido por su durabilidad y resistencia a los impactos. Suele aparecer como una de las primeras opciones para la impresión de prototipos y tiene amplias aplicaciones en el campo de la ingeniería. No obstante, se debe tener en cuenta que este material es susceptible a la deformación por calor.
	PLA (Ácido Poliláctico)	Este material es fácil de imprimir, además de ser biodegradable. Las piezas impresas con este material son resistentes, flexibles y de baja inflamabilidad, lo que lo hace adecuado para aplicaciones educativas. Las piezas pueden soportar rayos UV, son inodoras y fáciles de manipular.
	PETG (Tereftalato de Polietileno Glicol)	Este material está formado por una mezcla de PET y glicol que combina la resistencia del PET con la facilidad de impresión del PLA. Es adecuado para aplicaciones que requieren durabilidad y resistencia química.

*Nota.* Elaboración propia.



**Figura 5**  
*Propiedades de algunos materiales para impresión 3D*

### TABLA DE PROPIEDADES

TÉCNICA	MATERIAL	RESISTENCIA	FLEXIBILIDAD	DURABILIDAD	RESISTENCIA A LA TEMPERATURA	RESISTENTE A IMPACTOS
SLC	NYLON	● ● ●	● ● ●	● ● ●	212° C*	✓
	PP	● ● ●	● ● ●	● ● ●	107° C*	—
	PC	● ● ●	● ● ●	● ● ●	110° C	✓
SLA	RESINA ACRÍLICA	● ● ●	● ● ●	● ● ●	50 - 80° C	—
	RESINA EPOXI	● ● ●	● ● ●	● ● ●	50 - 80° C	✓
FMD	ABS	● ● ●	● ● ●	● ● ●	105° C	✓
	PLA	● ● ●	● ● ●	● ● ●	60° C	—
	PETG	● ● ●	● ● ●	● ● ●	85° C	—

\*Temperatura de reblandecimiento

*Nota.* Adaptado de: [30]

#### 2.4 Método de elementos finitos

El método de elementos finitos (FEM por sus siglas en inglés Finite Element Method) es una técnica numérica para la resolución de problemas de mecánica de sólidos. Se suele utilizar para resolver problemas en los que es necesario dividir un objeto o estructura en pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Cada elemento se somete a un análisis para determinar su comportamiento en respuesta a las cargas y restricciones impuestas. En el campo de la ingeniería permite analizar estructuras, sólidos, fluidos y procesos como la transferencia de calor [31].

Un **elemento** en el método de elementos finitos es una porción pequeña de una estructura o sistema. Estos elementos pueden ser de diferentes formas, como triángulos, cuadriláteros o tetraedro. Su figura se determina de acuerdo con el tipo de problema que se esté resolviendo. Al dividir la estructura en partes más pequeñas se aproxima el comportamiento del sistema en cada región.

Los **nodos** (para este contexto) son puntos o vértices en donde los elementos se conectan entre sí. Cada nodo puede tener una ubicación específica en un sistema y se utiliza para definir la geometría y la conectividad entre los demás elementos finitos.

Las restricciones o limitaciones de frontera impuestas en los bordes de una figura son conocidas como **condiciones de frontera**. Estas condiciones, especifican cómo se comporta el

sistema en sus límites. También puede incluir restricciones de desplazamiento, fuerzas aplicadas cualquier otro tipo de restricción que requiera el problema para su representación.

El método de elementos finitos suele emplearse para la resolución de problemas de análisis estructural para determinar tensiones, deformaciones y el comportamiento de materiales. Se pueden crear simulaciones de transferencia de calor y análisis de temperaturas en sistemas térmicos. Permite hacer análisis electromagnéticos para evaluar campos eléctricos y magnéticos en dispositivos eléctricos y electrónicos [32].

#### ***2.4.1 Tipos de análisis***

Es posible incorporar diversos algoritmos o funciones que influyen en el comportamiento del sistema, lo que puede generar una respuesta lineal o no lineal. Los sistemas lineales suelen ser menos complicados y generalmente no consideran deformaciones permanentes. Por otro lado, los sistemas no lineales toman en consideración las deformaciones y en algunos casos pueden evaluar si se producirá una fractura en el material [33].

Los análisis más comunes que emplean el método son:

**Análisis estático:** Se usa cuando la pieza no estará sometida a acciones dependientes del tiempo, es decir se evalúa la reacción de fuerzas o cargas que actúan sobre la estructura sin movimiento.

**Análisis vibracional:** En este proceso se evalúa la pieza estructura sometida a vibraciones aleatorias, impactos o choques. Estas acciones, pueden actuar en la frecuencia natural de la estructura, causando resonancia y su posible fallo.

**Análisis de fatiga:** Este permite a los diseñadores predecir la vida útil del material o estructura. Predice el efecto de los ciclos de carga sobre la pieza. Esto permite identificar aquellas áreas donde es más probable que se presente una grieta.

## Capítulo 3. Diseño Metodológico

La ejecución del presente trabajo de grado se dividió en cuatro fases, las cuales serán descritas a continuación.

### 3.1 Fase 1: Especificaciones del diseño

Primeramente, se identificó cuáles y cuantos componentes electrónicos formarían parte de cada una de las carcasas.

#### Figura 6

*Prototipo electrónico*



*Nota.* Desarrollado por el grupo de investigación en bioingeniería. UAN.

Los componentes que se incluyeron dentro de las carcasas fueron:

1. Un sensor de orientación UM7-LT
2. Una placa MRK WIFI 1010
3. Una batería LiPo de 3.7 V
4. Un led RGB
5. Un interruptor
6. Un pulsador
7. Cables conectores

Posteriormente, se procedió a identificar las dimensiones de cada uno de los componentes que formarían parte del circuito, con el propósito de determinar el tamaño general de las carcasas y soportes. La mayoría de estas medidas se encontraron directamente en los respectivos datasheets de los componentes. No obstante, en caso de la placa wifi, fue necesario medir la altura del componente, ya que esta información no se encontraba disponible en el datasheet, especialmente la altura de los puertos de conexión. La recopilación de las medidas de los componentes se puede apreciar en la tabla que se encuentra a continuación.

**Tabla 2**

*Medidas de los componentes*

<b>Medidas de los componentes</b>			
<b>Componente</b>	<b>Largo (mm)</b>	<b>Ancho (mm)</b>	<b>Alto (mm)</b>
Sensor de orientación UM7-LT	26.92	25.90	6.43
Placa MRK WIFI 1010	61.50	25.00	8.42 ± 0.136 *
Batería LiPo de 3.7 V	50.00	34.00	6.00
Led RGB	5.00	5.80	8.70
Interruptor	8.50	3.50	12.00
Pulsador	6.00	6.00	4.00

\*Valor promedio y margen de error de 5 medidas tomadas

*Nota.* Elaboración propia.

Con las medidas recolectadas, el siguiente paso consistió en definir la organización de los componentes dentro de las carcasas. Adicionalmente, se debía garantizar que las piezas dentro de la carcasa no se movieran o experimentaran deslizamientos, priorizando al sensor de orientación, ya que cualquier movimiento indeseado podría distorsionar los datos de la medición. Por lo tanto, se determinó que la tarjeta wifi como el sensor debía contar con soportes que aseguraran su fijación.

Por otra parte, de acuerdo con la investigación realizada en el primer capítulo de este trabajo, se seleccionaron las pruebas que se utilizarían en la evaluación del diseño. Como el objetivo principal de este proyecto es crear un diseño fácil de usar, cómodo, eficiente, accesible y satisfactorio para los usuarios, se emplearon pruebas sumativas. Estas pruebas permiten recopilar información durante el desarrollo del diseño. Los datos cualitativos se obtuvieron por medio de un cuestionario que incluía preguntas con opciones de respuesta en una escala Likert [34]. Lo que facilitó identificar las opiniones y actitudes de los usuarios frente al sistema inalámbrico. Adicionalmente, al final del proceso de desarrollo del sistema se ejecutaron pruebas de validación por medio de encuestas, para identificar el grado de aceptación y satisfacción del sistema de análisis de movimiento inalámbrico en la población objetivo.

### 3.2 Fase 2: Diseño mecánico e impresión 3D

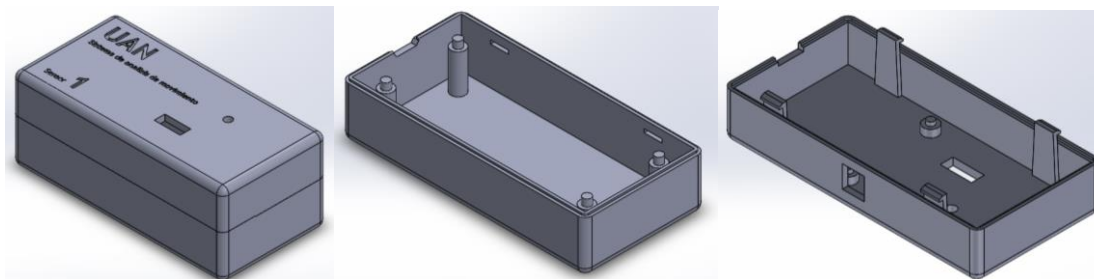
Para el diseño de las carcasas, se optó por emplear el software de diseño asistido por computadora (CAD) SolidWorks. Este programa es utilizado en la industria para producir modelos 3D, ensamblajes y dibujos técnicos. Facilita el diseño de productos y ofrece una amplia gama de herramientas para el proceso de diseño y desarrollo de productos. [35].

SolidWorks se caracteriza por ser una interfaz intuitiva, permitiendo originar diseños de manera rápida y eficiente, así como la generación automática de planos detallados y documentación técnica precisa. Además, es compatible con una amplia gama de formatos de archivo, facilitando la colaboración con otros programas. Cuenta con una extensa biblioteca de componentes como tornillos, tuercas, rodamientos, entre otros, que contribuyen a realizar modelos más realistas. El software también ofrece simulaciones avanzadas que permite evaluar el rendimiento y el comportamiento de los diseños antes de su impresión, lo cual permite reducir costos y tiempos de desarrollo [36].

Estas características que destacan el software facilitaron su elección para llevar a cabo los diseños. Con las respectivas medidas de cada uno de los componentes, se elaboró un primer diseño en el programa. Este diseño presentaba dos piezas que conforman una carcasa. En su parte frontal se encontraba un led indicador de estado del sensor y un interruptor que permite encender o apagar el dispositivo. El sistema cuenta con un botón de reinicio para la conexión entre el sensor y el software, activado por medio de un pulsador, ubicado en una de las caras laterales del dispositivo. Para asegurar la fijación de la placa wifi, se diseñaron cuatro soportes dentro de la pieza denominada “Base de la carcasa”, apartando el espacio necesario para alojar la batería. Por otro lado, para el sensor de orientación, se diseñaron tres soportes que coincidían con los agujeros de la tarjeta, en la pieza denominada “Tapa de la carcasa” para garantizar su fijación.

#### Figura 7

*Primer diseño: Vista isométrica de carcasa completa, base y tapa.*



*Nota.* Elaboración propia.

La Universidad Antonio Nariño dispone de tecnología especializada para llevar a cabo la impresión de las piezas requeridas. En la sede Bogotá, se tiene acceso a impresoras 3D que utilizan la técnica de deposición de material fundido (FMD) para la fabricación de los diseños. De acuerdo con la teoría explicada en este documento en el capítulo dos, los materiales más comunes empleados en la impresión 3D por este método son el PLA, el ABS y PETG. Por lo que, para la selección del material se tuvieron en cuenta las propiedades de los tres materiales mencionados anteriormente.

Entre los objetivos de usabilidad del sistema se destaca, que este debe tener un alto grado de resistencia, con una alta durabilidad, atractivo, portable, además de ser cómodo y fácil de interactuar para el usuario. Aquellos materiales que reúnen estas características y además son altamente recomendados para la construcción de prototipos, son el PLA y el ABS. Las propiedades físicas y mecánicas de estos elementos posibilitan la creación de piezas rígidas. Adicionalmente, su proceso de fabricación sencillo aumenta la velocidad de impresión para cada diseño, permitiendo crear piezas en un periodo de tiempo corto (Entre 3 a 10 h dependiendo de la rigurosidad del diseño). El PLA es un material rígido que tiene acabados más pulidos, ideal para piezas que requieren una apariencia más estética, mientras que el ABS es conocido por su durabilidad y alta resistencia a impactos. Siguiendo las propiedades de resistencia a impactos del ABS, se tomó la decisión de imprimir la primera carcasa con este material.

### **Figura 8**



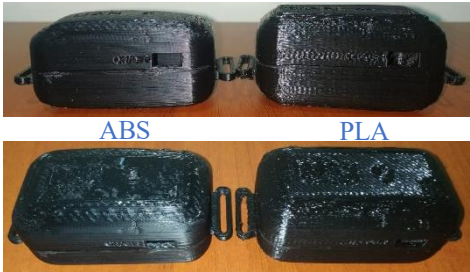
*Impresión 3D del primer diseño en ABS*





*Nota.* Elaboración propia.

Para este primer diseño se observaron algunos aspectos a mejorar, los cuales incluían el cierre de las carcasas, el tamaño, los orificios de algunos componentes, las dimensiones de los mosquetones, además de la altura de esta, puesto que la carcasa no se podía cerrar completamente, exponiendo los componentes. Con este diseño de base, se realizaron las respectivas modificaciones a las piezas para corregir y mejorar el diseño, las mejoras realizadas en cada uno de los intentos están detalladas en la tabla 3.

**Tabla 3***Diseño iterativo de la carcasa*

Diseño	Impresión 3D (Foto)	Ventajas	Aspectos por mejorar
2		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cierre de la carcasa</li> <li>• Redistribución en la ubicación de los componentes (Interruptor y pulsador en los costados)</li> <li>• Incremento en la altura de las piezas</li> <li>• Redondeo de bordes mejorando su estética</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fijación adecuada del sensor de orientación</li> <li>• Dimensiones inadecuadas en los mosquetones para el cierre de la carcasa</li> <li>• Altura de los soportes en la base y tapa de la carcasa</li> <li>• Observar si el diseño impreso en PLA tiene mejor detalle</li> <li>• Requiere de mayor cuidado en su proceso de impresión</li> </ul>
3		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buena sujeción de la batería y placa Wifi</li> <li>• Dimensiones adecuadas para encajar el pulsador, interruptor y led</li> <li>• Mayor facilidad de impresión</li> <li>• Brillo en la carcasa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejorar la sujeción del sensor</li> <li>• La dureza de los mosquetones ya que se quiebran con facilidad y tienen menos detalle en la impresión</li> <li>• En el diseño, sus acabados fueron menos detallados</li> <li>• Agregar nervios para los soportes de la base y tapa para evitar que se rompan con facilidad</li> </ul>
4		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se imprime el mismo diseño en PLA y ABS para observar la diferencia entre sus acabados.</li> <li>• Soportes con nervio para reforzar la resistencia de estos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fijación óptima del sensor de orientación</li> <li>• Modificar o eliminar los mosquetones</li> <li>• Aumentar las dimensiones de los soportes que</li> </ul>

Diseño	Impresión 3D (Foto)	Ventajas	Aspectos por mejorar
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se incluyen los soportes para las bandas de sujeción del sistema</li> </ul>	<p>permitirán ajustar el sistema en el cuerpo.</p>
5		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eliminación de los mosquetones</li> <li>• Se considera que el ABS es el material que brinda más detalles en la impresión de las piezas</li> <li>• Fijación del sensor y placa Wifi por medio de tornillos en los soportes diseñados</li> <li>• Aumento de las dimensiones de los soportes para la sujeción del sensor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se recomienda lijar algunos extremos de la pieza para perfeccionar su acabado.</li> </ul>

Nota. Elaboración propia.

El proceso de diseño iterativo de las piezas condujo a una carcasa que mejora la interacción del usuario con los componentes del dispositivo, ofreciendo resistencia a impactos y la capacidad de soportar condiciones severas. Además, una vez definido el diseño de las carcasas, el paso a seguir consistió en determinar cómo se fijarían las carcasas al cuerpo humano durante el movimiento.

Los sistemas comerciales de análisis de movimiento utilizan bandas para la sujeción de los sensores. Entre estas razones de uso se encuentran:

- 1. Sujeción precisa:** El uso de bandas permiten una fijación precisa de los sensores en ubicaciones específicas del cuerpo, como articulaciones, músculos o extremidades.
- 2. Estabilidad:** Las bandas ayudan a mantener los sensores en su lugar, evitando que se desplacen o se caigan durante el movimiento, esto garantiza captura de movimiento continua y sin interrupciones.
- 3. Evitar interferencias:** Las bandas también ayudan a minimizar interferencias externas, como la luz ambiental o las vibraciones, que podrían afectar la precisión de los datos al momento de realizar el movimiento.



4. **Comodidad:** Las bandas permiten a los sujetos de prueba moverse con mayor libertad, sin interferir en el movimiento natural y sin experimentar molestias significativas.
5. **Alineación:** Las bandas pueden ayudar a los sensores estar alineados correctamente respecto a las articulaciones.
6. **Portabilidad:** Los sistemas de análisis de movimiento que hacen empleo de bandas son generalmente portátiles y no requieren de un soporte complejo. Lo que permite su uso fuera de laboratorios.

Conforme a lo anterior, para el sistema de análisis de movimiento desarrollado en este trabajo, se optó por implementar el uso de bandas como sistema de fijación de los sensores en el cuerpo. Esto incrementa la versatilidad del sistema, permitiendo su uso en complejiones corporales diferentes, además de ser empleado por usuarios femeninos y masculinos.

### 3.3 Fase 3: Simulación de elementos finitos

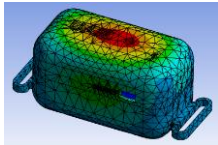
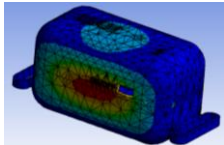
La simulación de elementos finitos en diseños de elementos 3D se realiza con el propósito de analizar y evaluar el comportamiento mecánico y estructural de la pieza, bajo diferentes condiciones de carga, además de ser un paso fundamental en el diseño del producto. Estas simulaciones permiten validar el diseño, verificado su nivel de seguridad y si cumple con la resistencia y rigidez requerida. La simulación también puede ayudar a identificar áreas de alta tensión o puntos de deformación del modelo; evalúa como responde el diseño a diferentes condiciones de exposición, como tensiones, temperaturas, vibraciones, cargas estáticas, entre otros; y a apreciar como el diseño responde a impactos.

Las simulaciones fueron ejecutadas en el software conocido como ANSYS, este programa es reconocido en el campo de la ingeniería por su amplia gama de análisis avanzado. Ofrece una gran variedad de herramientas y opciones para realizar análisis estructurales, de fluidos, electromagnéticos y térmicos. Este software suele emplearse en proyectos que requieren análisis más detallados y especializados. Además, su plataforma personalizable, la hace altamente llamativa para los usuarios, ya que permite adaptar y personalizar el proceso de trabajo de acuerdo con sus preferencias o necesidades. Sus herramientas de generación de mallas permiten la representación precisa de geometrías complejas y por ser ampliamente utilizada en la industria cuenta con una gran comunidad de usuarios y soporte técnico que promueve el acceso a recursos, tutoriales y soluciones a problemas comunes [37].

Sin embargo, para usar este programa es necesario adquirir una licencia. No obstante, en su sitio web oficial se ofrece una versión estudiantil que, aunque tiene limitaciones en comparación con la versión completa del software, permite un análisis adecuado de las piezas diseñadas en este trabajo. Por lo tanto, las simulaciones se llevaron a cabo con el objetivo de verificar la rigidez y la

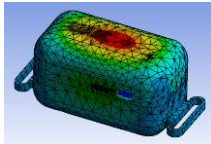
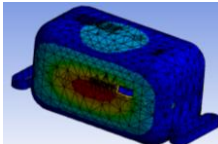
durabilidad del diseño en los materiales PLA y ABS. Se emplearon los métodos de tracción y compresión de las piezas con niveles de tensión aleatorios de 120, 500 y 1000 N (12, 51 y 102 kg, respectivamente). Durante las simulaciones se evaluó la deformación total y el estrés equivalente en dos de las caras de la pieza, consideradas como aquellas que estarán más expuestas. Las tablas 4-7 reúnen la información adquirida en las simulaciones estáticas. Es importante mencionar que, para llevar a cabo la simulación del material PLA, se requirió configurar sus propiedades. Estas propiedades se obtuvieron de la biblioteca online MatWeb [38].

**Tabla 4***Simulación tracción para ABS*

<b>N. de elementos</b>		10580					
<b>N. de nodos</b>		20313					
		<b>Longitudinal</b>			<b>Transversal</b>		
							
<b>Fuerza</b>		<b>120 N</b>	<b>500 N</b>	<b>1000 N</b>	<b>120 N</b>	<b>500 N</b>	<b>1000 N</b>
<b>Estrés equivalente (Pa)</b>	<i>Min.</i>	150,94	628,91	1257,8	326,75	1361,4	2722,9
	<i>Max.</i>	2,6036e6	1,0848e7	2,1696e7	1,18e7	4,9167e7	9,8335e7
	<i>Prom.</i>	4,9117e5	2,0465e6	4,0931e6	9,0167e5	3,757e6	7,5139e6
<b>Deformación (m)</b>	<i>Max.</i>	7,4771e-5	0,00031155	0,00062309	0,0003106	0,0012942	0,0025884
	<i>Prom.</i>	2,7622e-5	1,1509e-4	2,3018e-4	5,3646e-5	2,2352e-4	4,4705e-4

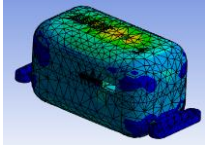
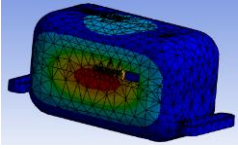
*Nota.* Elaboración propia.

**Tabla 5***Simulación compresión de ABS*

<b>N. de elementos</b>		10580					
<b>N. de nodos</b>		20313					
		<b>Longitudinal</b>			<b>Transversal</b>		
							
<b>Fuerza</b>		<b>120 N</b>	<b>500 N</b>	<b>1000 N</b>	<b>120 N</b>	<b>500 N</b>	<b>1000 N</b>
<b>Estrés equivalente (Pa)</b>	<i>Min.</i>	2,6036e6	628,91	1257,8	326,75	1361,4	2722,9
	<i>Max.</i>	150,94	1,0848e7	2,1696e7	1,18e7	4,9167e7	9,8335e7
	<i>Prom.</i>	4,9117e5	2,0465e6	4,0931e6	9,0167e5	3,757e6	7,5139e6
<b>Deformación (m)</b>	<i>Max.</i>	7,4771e-5	0,00031155	0,00062309	0,0003106	0,0012942	0,0025884
	<i>Prom.</i>	2,7622e-5	1,1509e-4	2,3018e-4	5,3646e-5	2,2352e-4	4,4705e-4

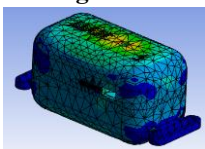
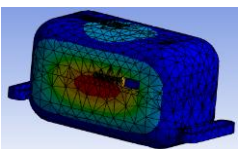
*Nota.* Elaboración propia.

**Tabla 6**  
*Simulación tracción PLA*

<b>N. de elementos</b>		10580					
<b>N. de nodos</b>		20313					
		<b>Longitudinal</b>			<b>Transversal</b>		
							
<b>Fuerza</b>		<b>120 N</b>	<b>500 N</b>	<b>1000 N</b>	<b>120 N</b>	<b>500 N</b>	<b>1000 N</b>
<b>Estrés equivalente (Pa)</b>	<i>Min.</i>	158,59	660,81	1321,6	217,36	905,66	1811,3
	<i>Max.</i>	2,5971e6	1,0821e7	2,1642e7	1,205e7	5,0206e7	1,0041e8
	<i>Prom.</i>	4,962e5	2,0675e6	4,135e6	9,0982e5	3,7909e6	7,5819e6
<b>Deformación (m)</b>	<i>Max.</i>	3,6492e-5	1,5205e-4	3,041e-4	1,5267e-4	6,3613e-4	1,2723e-3
	<i>Prom.</i>	1,3483e-5	5,6178e-5	1,1236e-4	2,6342e-5	1,0976e-4	2,1952e-4

*Nota.* Elaboración propia.

**Tabla 7**  
*Simulación compresión PLA*

<b>N. de elementos</b>		10580					
<b>N. de nodos</b>		20313					
		<b>Longitudinal</b>			<b>Transversal</b>		
							
<b>Fuerza</b>		<b>120 N</b>	<b>500 N</b>	<b>1000 N</b>	<b>120 N</b>	<b>500 N</b>	<b>1000 N</b>
<b>Estrés equivalente (Pa)</b>	<i>Min.</i>	158,59	660,81	1321,6	217,36	905,66	1811,3
	<i>Max.</i>	2,5971e6	1,0821e7	2,1642e7	1,205e7	5,0206e7	1,0041e8
	<i>Prom.</i>	4,962e5	2,0675e6	4,135e6	9,0982e5	3,7909e6	7,5819e6
<b>Deformación (m)</b>	<i>Max.</i>	3,6492e-5	1,5205e-4	3,041e-4	1,5267e-4	6,3613e-4	1,2723e-3
	<i>Prom.</i>	1,3483e-5	5,6178e-5	1,1236e-4	2,6342e-5	1,0976e-4	2,1952e-4

*Nota.* Elaboración propia.

### 3.4 Fase 4: Evaluación de usabilidad del sistema

Para llevar a cabo este proyecto de manera efectiva, es esencial diseñar un experimento que sea capaz de detectar cambios en la experiencia del usuario y que permita medir variables claves relacionadas con el uso del dispositivo. Por lo tanto, en este trabajo se propone un diseño de experimento “cuasiexperimental” con características exploratorias y descriptivas, utilizando un enfoque mixto. En la evaluación de la usabilidad de este dispositivo, se eligió un conjunto de

participantes compuesto por los estudiantes de cuarto a noveno semestre de ingeniería biomédica, dado que son los usuarios directos que interactuarán con el sistema. Este grupo abarcó tanto a hombres como mujeres, con edades que oscilan entre los 18 y 25 años. Se llevaron a cabo dos pruebas, una de satisfacción y otra de validación en las cuales participaron un total de 16 personas (6 y 10 personas, respectivamente).

La investigación cuasiexperimental es un tipo de diseño de estudio en el campo de la investigación científica que comparte características tanto de los estudios experimentales como de los estudios observacionales. En este tipo de investigación, los encargados no asignan aleatoriamente a los participantes a diferentes grupos, como se haría en un experimento controlado, si no que se intenta controlar y manipular una variable independiente para observar sus efectos en una variable dependiente [39], [40]. Por lo tanto, al realizar un rediseño del sistema para convertirlo en inalámbrico (variable independiente) se intenta definir el grado de usabilidad para un sistema de análisis de movimiento con las características anteriormente mencionadas (variable dependiente).

El enfoque exploratorio se adopta ya que se está evaluando la usabilidad del dispositivo en un entorno controlado sin la necesidad de probar una hipótesis específica. El objetivo es explorar como las diferentes características del dispositivo influyen en la experiencia y percepción del usuario. En cuanto a los elementos descriptivos, se están recopilando datos detallados sobre las variables dependientes relacionadas con la experiencia de uso, buscando describir la naturaleza de la usabilidad tanto cuantitativa como cualitativamente. Este experimento también puede considerarse de formato mixto, ya que implica la recopilación de datos tanto cuantitativos (mediciones objetivas como el tiempo de tarea y la tasa de error) como cualitativos (mediciones subjetivas como la satisfacción del usuario a través de encuestas).

Para comparar el sistema de análisis de movimiento alámbrico y el sistema de movimiento inalámbrico desarrollado, inicialmente se evaluó la funcionalidad de las carcasas y soportes mecánicos durante una actividad correspondiente a marcha a diferentes velocidades. El análisis se realizó con la ubicación de un sensor en aquellos puntos o segmentos en los que se identificó se presenta mayor desplazamiento: La zona lumbar y el muslo.

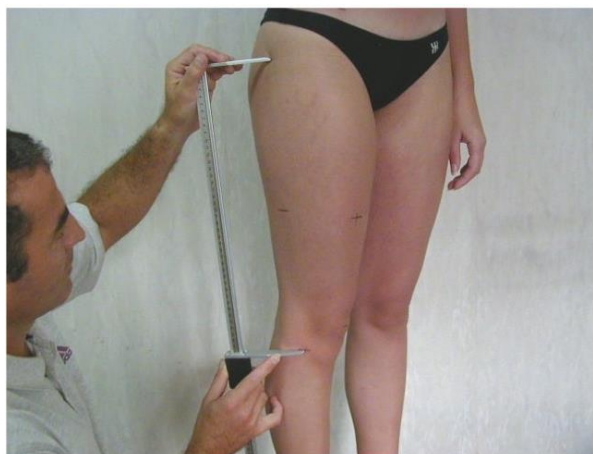
La ubicación del sensor en la región lumbar para el análisis de movimiento es común, ya que esta zona se encuentra el centro de gravedad del cuerpo humano. Al ubicar el sensor en esta área, es posible detectar cambios en la inclinación y el movimiento de la pelvis, permitiendo un análisis postural y de equilibrio en el sujeto. También, este punto es posible registrar los datos de las tres dimensiones sobre el movimiento del tronco del cuerpo, lo que permite un análisis de la marcha en conjunto con las extremidades inferiores.

Esta ubicación del sensor favorece a la comodidad del usuario, ya que no interfiere de forma significativa en su capacidad de caminar. Por otra parte, situar los sensores en el muslo para el análisis de movimiento posibilita rastrear la actividad muscular de las piernas durante la marcha. Esta información es relevante para el análisis de la fuerza y el patrón de activación muscular, siendo útil en los campos de rehabilitación y de análisis biomecánico.

La primera prueba consistió en medir la extremidad inferior desde la cadera hasta la rodilla (muslo) en cada uno de los participantes, de acuerdo con su longitud, el sensor debía ser ubicado a la mitad de esta.

### Figura 9

*Longitud Trocantérea – Tibial lateral*



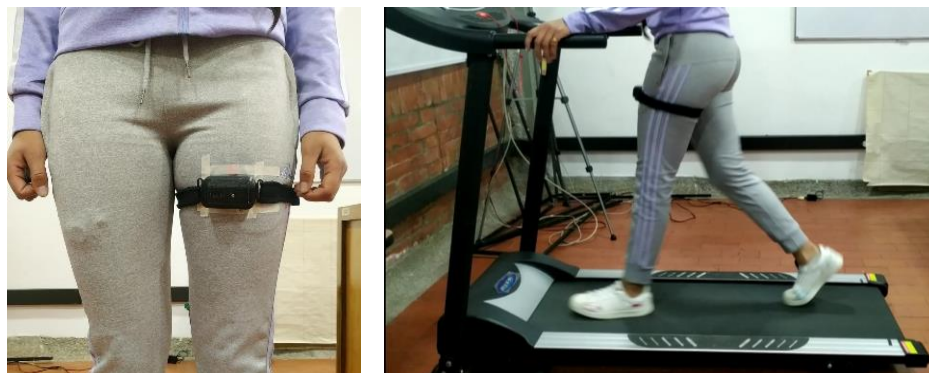
*Nota.* Tomado de: [41]

En primer lugar, se delinea el contorno de la carcasa en la piel o en los pantalones del sujeto. Posteriormente se le solicita a el participante que caminara en la maquina caminadora manteniendo velocidades constantes. Los niveles de velocidad establecidos fueron 4,82 km/h (3 mph), 6,44 km/h (4mph) y 8.05km/h (5mph), realizando el ejercicio por un minuto en cada velocidad.

Este protocolo de evaluación se basó en la investigación liderada por Salvador Colma y su grupo, quienes señalan que las velocidades de marcha normales pueden variar considerablemente según la edad, condición física y otros factores individuales. Para adultos sanos se clasifican las velocidades típicas de marcha en tres categorías: lenta (0 a 4 km/h), normal o moderada (4 a 6 km/h) y rápida (6 a 9 km/h). Este enfoque permite evaluar cómo responde el sistema de análisis de movimiento a diferentes velocidades de marcha [42]. Al concluir cada minuto, se procedió a tomar medidas para verificar si había ocurrido algún desplazamiento en el sensor desde su posición inicial.

### Figura 10

*Pruebas del sistema con el sensor ubicado en el muslo*



*Nota.* Elaboración propia.

La segunda prueba consistió en posicionar el sensor en la zona lumbar del sujeto de prueba. Para capturar el movimiento, se colocó una cámara en la parte de trasera del sujeto, a una distancia aproximadamente de 1,5 metros. La caminata del sujeto fue registrada en video con una resolución de 1920x1080 pixeles a una velocidad de 30 cuadros por segundo, lo que permitió un análisis posterior. En esta fase de la prueba, se colocó un marcador sobre el sensor y otro marcador fijado en el sistema de soporte.

A continuación, se le solicitó al participante que caminara de acuerdo con el proceso descrito anteriormente, mientras se capturaba el movimiento en video. El objetivo era verificar la existencia o no de desplazamiento del sistema, se empleó el programa Kinovea con el propósito de analizar los datos obtenidos.

### Figura 11

*Pruebas del sistema con el sensor ubicado en la zona lumbar. Vel. 4,82 km/h*



*Nota.* Elaboración propia.

De acuerdo con lo anterior, se diseñaron dos pruebas de usabilidad de acuerdo con los tipos de pruebas seleccionadas en la primera fase de este proyecto, la metodología elegida para recopilar información sobre el nivel de usabilidad del sistema desarrollado fueron las encuestas. En esta etapa, se llevaron a cabo dos tipos de encuestas:

- 1. Encuesta de satisfacción del usuario:** Esta encuesta se diseñó con el propósito de evaluar el nivel de satisfacción de los usuarios al interactuar con el sistema. Su objetivo fue recopilar opiniones y percepciones sobre la comodidad, la facilidad de uso, la eficiencia y la accesibilidad del sistema. La experiencia de los usuarios se evaluó mediante preguntas que medían su nivel de acuerdo o desacuerdo. Las preguntas realizadas se pueden encontrar en el anexo 3.
- 2. Encuesta de validación del sistema:** La segunda encuesta se centró en validar el sistema de análisis de movimiento inalámbrico. Los participantes respondieron preguntas específicas que permitían identificar si el sistema cumplía con los objetivos y requisitos establecidos previamente. Los usuarios debían usar simultáneamente el sistema alámbrico y el sistema actual para comparar su nivel de usabilidad. Las preguntas formuladas se encuentran en el anexo 4.

## Capítulo 4. Resultados y Discusión

Siguiendo la metodología previamente establecida, en este capítulo se presentan los resultados obtenidos a lo largo de las actividades que se llevaron a cabo en las cuatro fases propuestas.

### 4.1 Fase 1: Especificaciones del diseño

Las dimensiones del diseño de la carcasa seleccionada para el sistema de análisis inalámbrico son las siguientes: 69 mm de largo, 38,5 mm de ancho y 40 mm de alto. Para un detalle más completo sobre el diseño, los planos se pueden consultar el anexo 1 y 2.

La organización de los componentes se estructuró de acuerdo con las piezas (tapa y base) del sensor. En la base de la carcasa, se ubicaron la batería Lipo y la placa Wifi. Esta última se aseguró a los soportes diseñados mediante el uso de tornillos y tuercas, aseguran su estabilidad y fijación adecuada. Por otro lado, en la tapa de la carcasa, se alojaron el sensor de orientación, que se fijó a los soportes siguiendo el mismo proceso que la placa, el led RGB, situado en la cara frontal de la pieza. Además, en los costados de la carcasa, se colocaron el botón de reset y el interruptor para encender y apagar el dispositivo. Asimismo, se dejó una abertura en uno de los lados de la carcasa para facilitar la recarga del dispositivo.

Por otro lado, el diseño de las encuestas se realizó en Google forms, esta herramienta en línea permite generar cuestionarios, encuestas y formularios de manera fácil y rápida. Esta herramienta permitió recopilar respuestas de forma automatizada y analizar los datos resultantes. Su interfaz intuitiva facilitó la creación y personalización de los cuestionarios de acuerdo con los objetivos de usabilidad del proyecto. Adicionalmente, esta plataforma generó automáticamente informes de los datos recopilados en forma de gráficos y estadísticas [43].

### 4.2 Fase 2: Diseño mecánico e impresión

Para cumplir con los objetivos de usabilidad del sistema, se identificó que el ABS sobresalía entre los materiales comparados al proporcionar mayor durabilidad, comodidad,



resistencia los impactos y facilidad de interacción para el usuario. Además, al usar ABS en la impresión, se lograron mejores acabados de diseño, lo que contribuyó a una mejor estética del producto. Esto permitió la creación de un sistema de bajo costo, que podría ser fácilmente replicable. Las propiedades comparadas están detalladas en la tabla 8.

**Tabla 8**

*Propiedades de los filamentos*

<b>Propiedades</b>	<b>ABS</b>	<b>PLA</b>
Densidad	1.01g/cm <sup>3</sup>	1.24g/cm <sup>3</sup>
Rigidez	5/10	7.5/10
Durabilidad	8/10	4/10
Límite de elasticidad	40MPa	65MPa
Coefficiente de expansión termal	90µm/m-°C	68µm/m-°C
Temperatura del extrusor	220-250°C	190- 220°C
Temperatura máxima antes de que el material comience a deformarse bajo carga	98°C	52°C
Facilidad de impresión	8/10	9/10
Resistencia a impactos	Si	No
Resistente al calor	Si	No
Costo (aprox.)	\$80.000,00 COP	\$80.000,00 COP

*Nota.* Adaptado de: [44]–[46]

Adicionalmente, para el diseño de las bandas se optó por el Neopreno. Este material es un tipo de caucho sintético que se caracteriza por su resistencia a la deformación. También, es ampliamente conocido por su resistencia a los aceites, productos químicos, ozono, temperaturas extremas y no se deforma fácilmente, lo que lo hace flexible y duradero. Este material impermeable suele emplearse en la fabricación de tarajes de buceo, bolsos, dispositivos ortopédicos, entre otros.

**Tabla 9**

*Propiedades del Neopreno*

<b>Propiedades</b>	<b>Polímero de cloropreno</b>
Densidad	1,35 - 1,50 g/cc
Dureza	35-95 (Shore A)
Máxima resistencia a la tracción	28,0 MPa
Alargamiento en rotura	100 - 800%
Temperatura máxima de servicio	100°C
Temperatura mínima de servicio	-30,0 °C

*Nota.* Tomado de: [47]

En el ámbito del deporte, el material es utilizado para crear productos como entrenadores de cintura, cinturones deportivos, fajas y guantes [48]. La selección del polímero de cloropreno (Neopreno) se debe a las ventajas de su uso prendas de vestir. En donde resalta ser un material altamente resistente a impactos por su tolerancia a esfuerzos cortantes (de tensión y compresión) y su capacidad de amortiguamiento. Además, este material es hipoalergénico, ya que no suele causar reacciones alérgicas al estar en contacto con la dermis. No es tóxico y no contamina, fácil de limpiar y evita el desplazamiento de la tela sobre la piel [49].

Con este material se diseñaron cinco correas diferentes: dos para los miembros superiores, dos para los miembros inferiores y una para la cintura.

### **Figura 12**

*Carcasa final y sistema de fijación*



*Nota.* Elaboración propia.

### **4.3 Fase 3: Simulación de elementos finitos**

De acuerdo con las simulaciones realizadas, el diseño de las carcasas se sometió a tres fuerzas distintas aleatorias: 120, 500 Y 1000 N, con el propósito de para evaluar como el material se comporta bajo tensiones de tracción y compresión. Se observó que el comportamiento de los polímeros ABS y PLA es similar. Esto se debe en gran parte a las propiedades intrínsecas de estos materiales. Tanto el ABS como el PLA son conocidos por su alta resistencia a la tracción y compresión, así como su capacidad de soportar cargas considerables sin deformarse o romperse.

En estas pruebas, las fuerzas aplicadas no generaron un estrés mecánico suficiente para sobrepasar el límite de elasticidad de cada polímero. Esto quiere decir que las carcasas fabricadas con estos materiales mantienen su forma bajo estas cargas, aspecto fundamental para garantizar la resistencia y durabilidad del sistema diseñado.

#### 4.4 Fase 4: Evaluación de usabilidad

Según los resultados de las pruebas realizadas, a continuación, se describirán los datos recopilados y los análisis realizados.

##### 4.4.1 Primera prueba

En esta prueba, el objetivo consistía en determinar si el sensor experimentaba desplazamiento al ubicarse en el muslo. Los datos que se recopilaron se presentan en la tabla 10. Según estos datos, en una longitud del muslo que oscila entre 46,39 cm y 54,15 cm, con un punto de referencia en el rango de 25,89 cm a 22,39 cm, para una velocidad de marcha leve, el desplazamiento del sensor vario entre 27,2 cm y 23,34 cm, lo que equivale a un posible deslizamiento de 3,86 cm o menos. Para marcha de intensidad media, el desplazamiento se situó entre 26,93 y 23,37 cm, lo que indica un posible deslizamiento de máximo 3,56 cm. En cuanto a la marcha rápida, la distancia recorrida por el sensor abarco un rango de 27,37 cm a 23.55 cm, lo que representa un posible deslizamiento de 3.82 cm.

Estos resultados sugieren que, para cada velocidad de marcha, el sensor experimento un deslizamiento mínimo que no tuvo un impacto significativo. Se considera que este deslizamiento puede haberse debido al hecho de que las pruebas se llevaron a cabo sobre las prendas de vestir del sujeto de prueba, en lugar de ser directamente sobre la piel. Esto se evidencia en los casos de los sujetos 6 y 8 (detallados en la tabla 10) que ubicaron los sensores directamente sobre la piel, donde no se observaron deslizamientos significativos. Por lo tanto, se recomienda utilizar los soportes del sistema directamente sobre la piel para obtener mediciones precisas con la menor probabilidad de deslizamiento.

**Tabla 10**

*Desplazamiento del sensor ubicado en el muslo*

P.	Longitud del muslo (cm)	Punto de referencia (cm)	Marcha leve 4,82 km/h (3 mph)	Marcha moderada 6,44 km/h (4mph)	Marcha rápida 8.05km/h (5mph)
1	55	27,5	27,8	25,8	27,8
2	51	25,5	25,6	25,7	25,9
3	50	25	25,1	25,3	25,4
4	59	29,5	29,7	29,8	30
5	46	23	23	23,2	23,3
6	46	23	23	23	23,3
7	53	26,5	26,6	26,6	26,8
8	54	27	27	27	27
9	51	25,5	25,7	25,7	25,8
10	44	22	22,3	22,4	22,4
11	44	22	22,2	22,2	22,4
$\bar{x}$	50,27	24,14	25,27	25,15	25,46

P.	Longitud del muslo (cm)	Punto de referencia (cm)	Marcha leve 4,82 km/h (3 mph)	Marcha moderada 6,44 km/h (4mph)	Marcha rápida 8.05km/h (5mph)
<i>DM</i>	±3,88	±1,75	±1,93	±1,78	±1,91

Donde  $\bar{x}$  es valor promedio y *DM* desviación media

*Nota.* Elaboración propia.

#### 4.4.2 Segunda prueba

Para esta prueba se emplearon marcadores, los cuales fueron ubicados sobre el sensor y la correa de fijación de las bandas. Su movimiento fue evaluado por medio del programa de análisis de movimiento óptico Kinovea, el cual permitió determinar el cambio de posición del sensor con respecto al marcador ubicado en el sistema de fijación. Es importante destacar que la biomecánica de la marcha puede variar entre individuos debido a sus diferencias anatómicas en la pelvis, cadera y piernas.

Además, factores como la longitud de las piernas, la fuerza muscular y la flexibilidad influyen de manera única en cada persona. Las mujeres tienden a tener caderas más anchas y una mayor inclinación de la pelvis, lo cual influye en la alineación de las piernas y finalmente en la mecánica de la marcha. La distribución de peso en el cuerpo también puede variar entre hombres y mujeres, lo que afecta en la distribución de las cargas en las articulaciones y los músculos. Por las razones mencionadas anteriormente se decidió analizar la información dividiendo al grupo de participantes entre hombres y mujeres.

Las trayectorias registradas se refieren al camino o “ruta” que sigue una parte del cuerpo, durante un movimiento específico. Este concepto se suele analizar en planos verticales y horizontales para comprender la dirección y forma de movimiento.

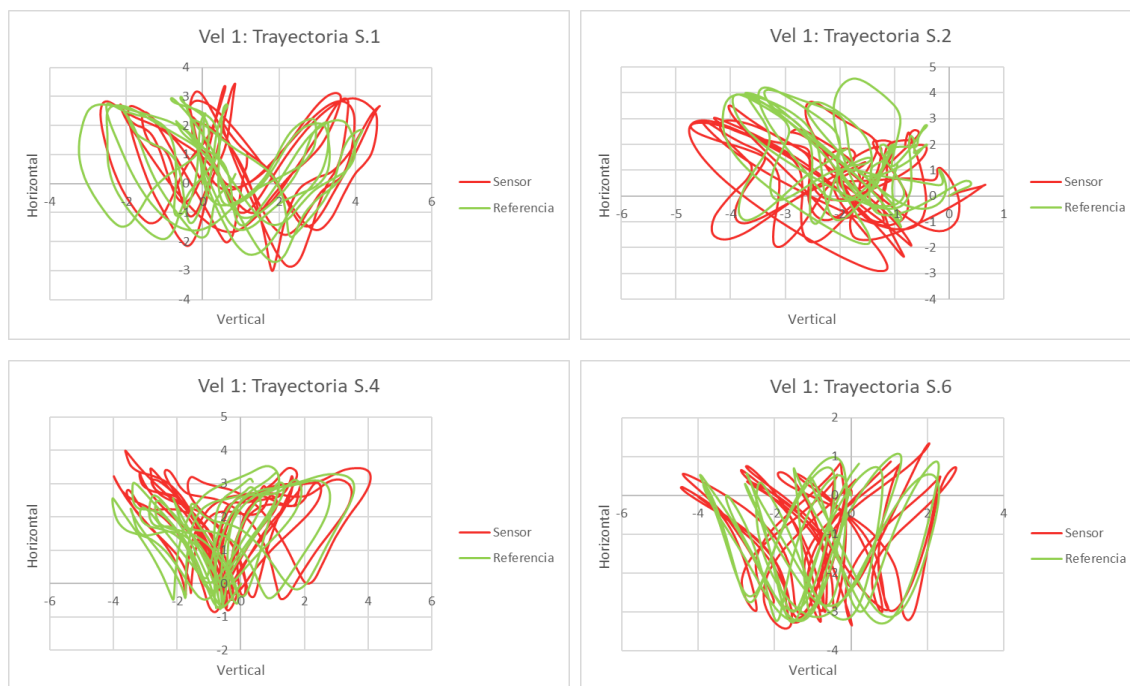
- 1. Trayectoria en planos verticales:** En los planos verticales, se observa el movimiento desde la vista frontal o posterior. La trayectoria de estos planos describe como se desplaza una parte de cuerpo hacia adelante, hacia atrás o hacia los lados.
- 2. Trayectoria en planos horizontales:** En los planos horizontales el movimiento se visualiza desde la vista superior o inferior. La trayectoria de estos planos describe con una parte del cuerpo se desplaza hacia arriba, hacia abajo o en dirección a la rotación.

Esto proporciona información valiosa para evaluar la función biomecánica normal y también es crucial en la detección y corrección de patrones de movimientos anormales o lesiones.

Las trayectorias generadas entre el marcador y el sistema de análisis inalámbrico se pueden observar en las figuras 13 a 18.

**Figura 13**

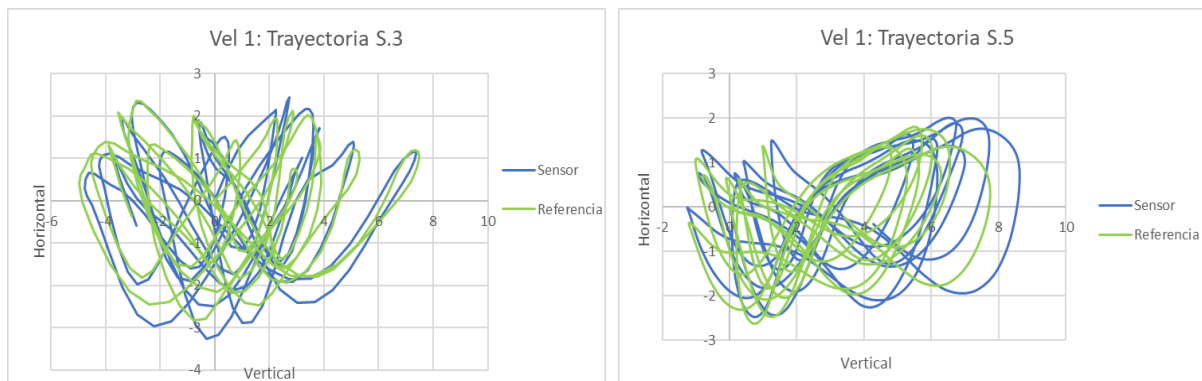
*Trayectoria de desplazamiento en mujeres. Velocidad de marcha: 4,82 km/h (3 mph)*



*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 14**

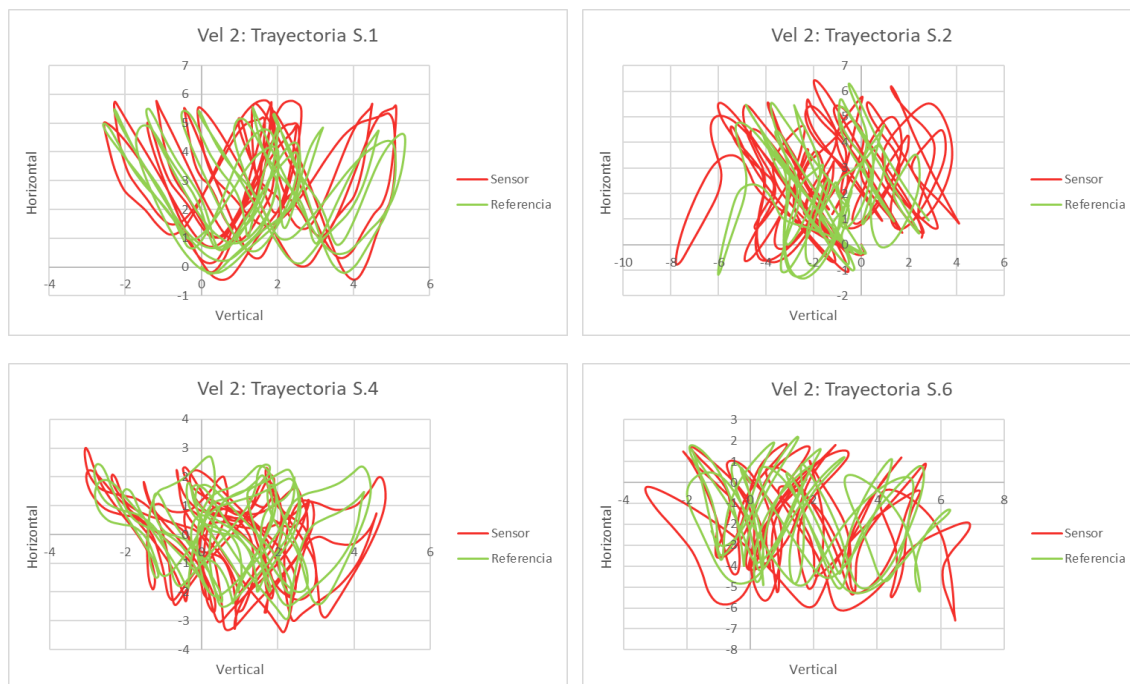
*Trayectoria de desplazamiento en hombres. Velocidad de marcha: 4,82 km/h (3 mph)*



*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 15**

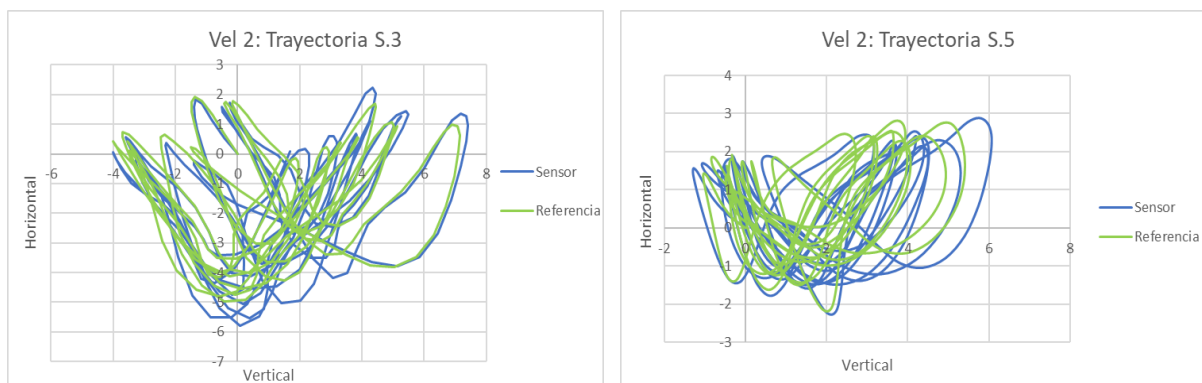
*Trayectoria de desplazamiento en mujeres. Velocidad de marcha: 6,44 km/h (4mph)*



*Nota. Elaboración propia.*

**Figura 16**

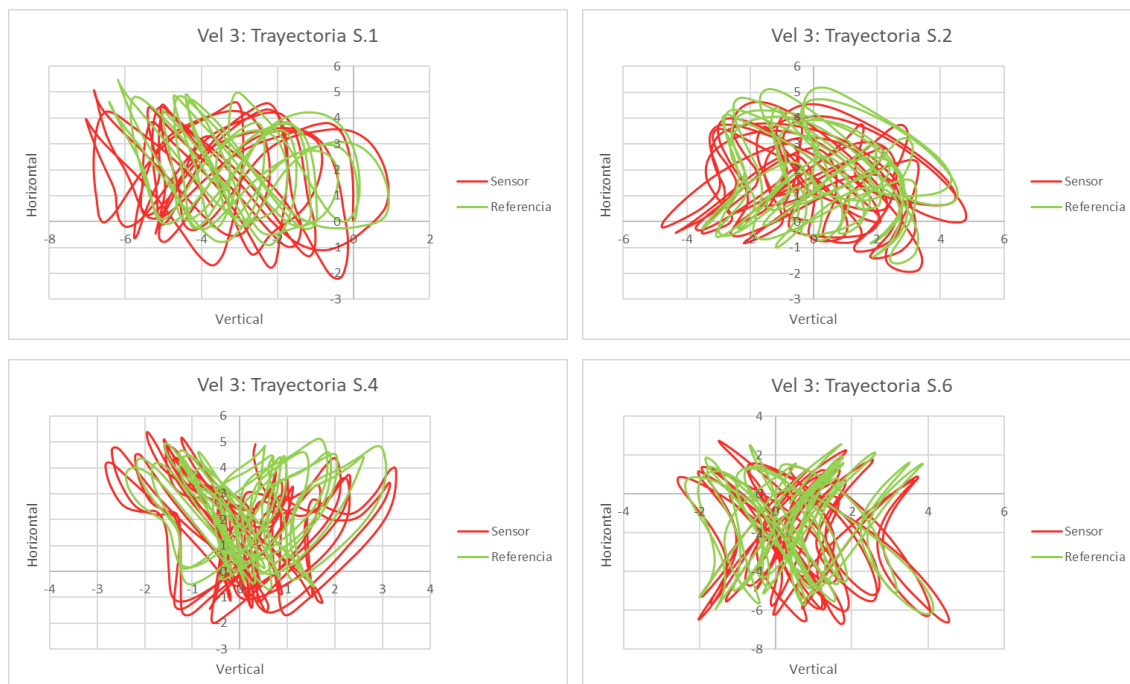
*Trayectoria de desplazamiento en hombres. Velocidad de marcha: 6,44 km/h (4mph)*



*Nota. Elaboración propia.*

**Figura 17**

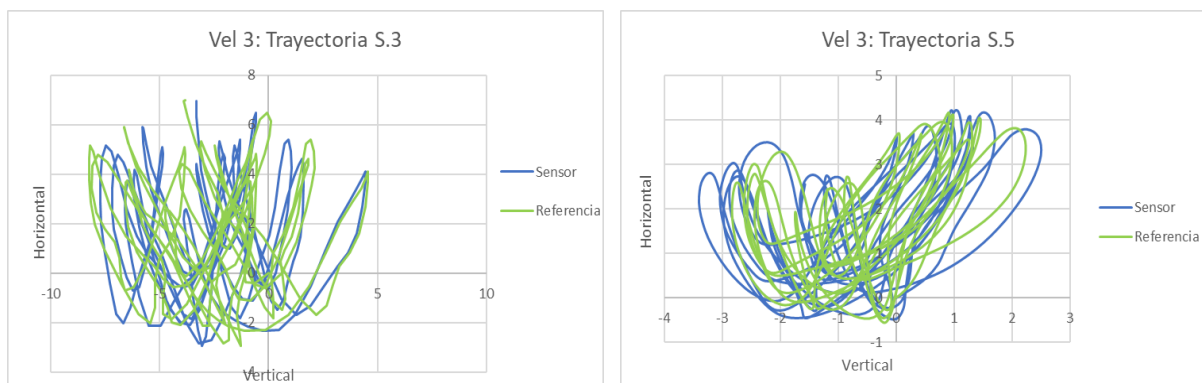
*Trayectoria de desplazamiento en mujeres. Velocidad de marcha: 8.05km/h (5mph)*



*Nota. Elaboración propia.*

**Figura 18**

*Trayectoria de desplazamiento en hombres. Velocidad de marcha: 8.05km/h (5mph)*



*Nota. Elaboración propia*

### 4.4.3 Encuesta de satisfacción

En el marco de un análisis de usabilidad para este dispositivo, se destaca que este tipo de experimento no demanda muestras extensas de usuarios; de hecho, una muestra de 5 a 10 participantes resulta más que suficiente, siempre y cuando los participantes sean representativos del grupo objetivo del dispositivo. Luego de la interacción de los usuarios con el sistema diseñado, sus opiniones y percepciones sobre la comodidad, la facilidad de uso, la eficiencia y la accesibilidad del sistema se presentan en las figuras 19-23. Esta encuesta fue diligenciada por 6 de los participantes.

**Figura 19**  
*Encuesta de satisfacción - Parte 1*



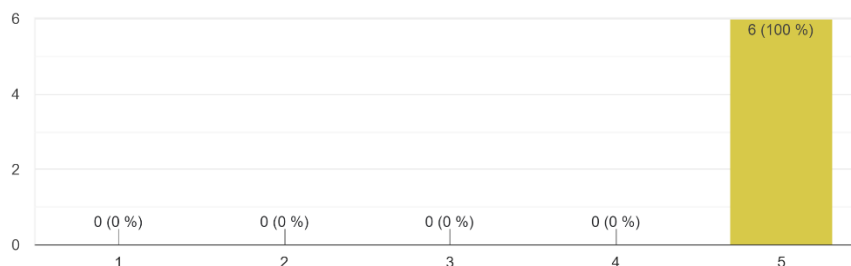
*Nota.* Elaboración propia.



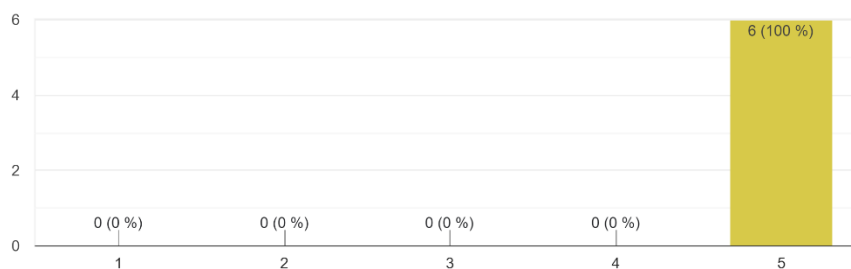
## Figura 20

### Encuesta de satisfacción - Parte 2

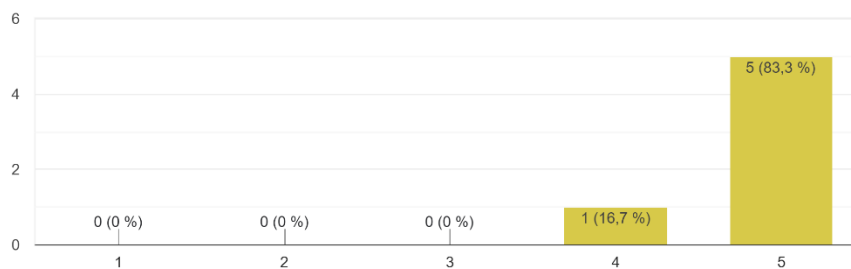
Me siento bastante cómodo con la colocación de los sensores en el cuerpo. Donde 1 es Totalmente en desacuerdo, 2 En desacuerdo, 3 Ni d...acuerdo, 4 De acuerdo, 5 Totalmente de acuerdo.  
6 respuestas



La fijación de los sensores NO interfiere con la libertad de mi movimiento. Donde 1 es Totalmente en desacuerdo, 2 En desacuerdo, 3 Ni de acuerdo, ...sacuerdo, 4 De acuerdo, 5 Totalmente de acuerdo.  
6 respuestas



Considero que la fijación de los sensores es segura durante la actividad. Donde 1 es Totalmente en desacuerdo, 2 En desacuerdo, 3 Ni de acuerdo, ...sacuerdo, 4 De acuerdo, 5 Totalmente de acuerdo.  
6 respuestas

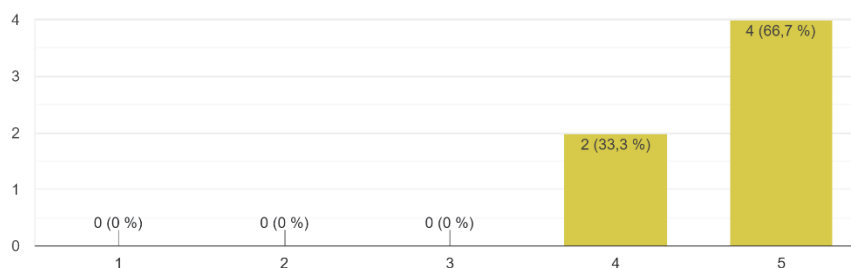


*Nota.* Elaboración propia

**Figura 21**  
Encuesta de satisfacción - Parte 3

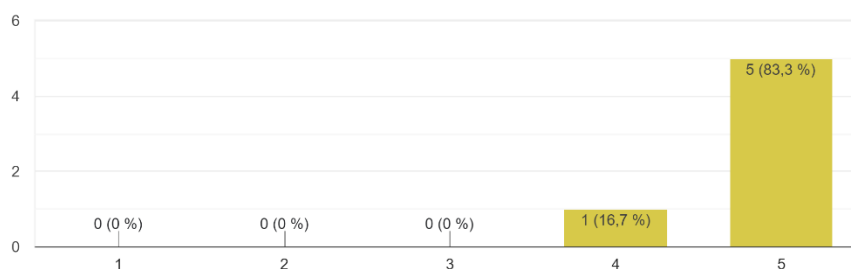
Siento que los sensores se mantienen en su lugar de manera cómoda mientras camino. Donde 1 es Totalmente en desacuerdo, 2 En desacuerdo, 3 N...acuerdo, 4 De acuerdo, 5 Totalmente de acuerdo.

6 respuestas



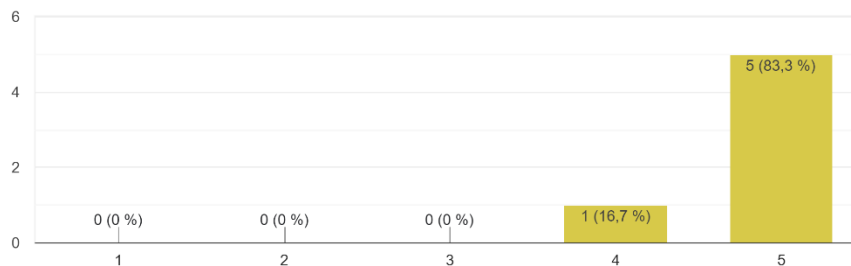
Considero que el sistema de fijación de los sensores es adecuado. Donde 1 es Totalmente en desacuerdo, 2 En desacuerdo, 3 Ni de acuerdo, ni e...sacuerdo, 4 De acuerdo, 5 Totalmente de acuerdo.

6 respuestas



Hallar las funciones de encendido y reinicio en el sensor fue una tarea sencilla para mí. Donde 1 es Totalmente en desacuerdo, 2 En desacuerdo, 3 N...acuerdo, 4 De acuerdo, 5 Totalmente de acuerdo.

6 respuestas

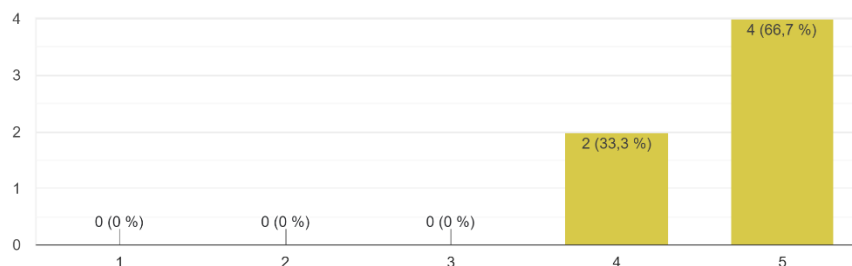


*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 22**  
*Encuesta de satisfacción - Parte 4*

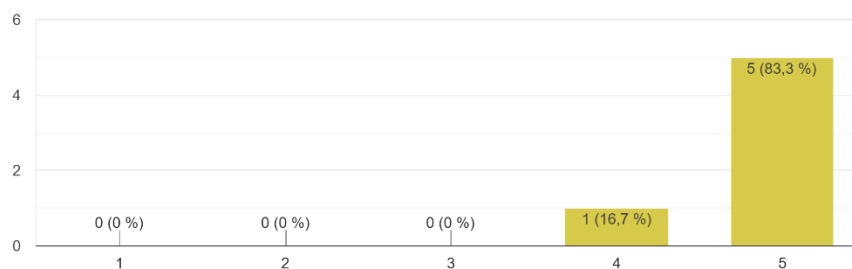
Considero que encender los sensores resulta sencillo. Donde 1 es Totalmente en desacuerdo, 2 En desacuerdo, 3 Ni de acuerdo, ni en desacuerdo, 4 De acuerdo, 5 Totalmente de acuerdo.

6 respuestas



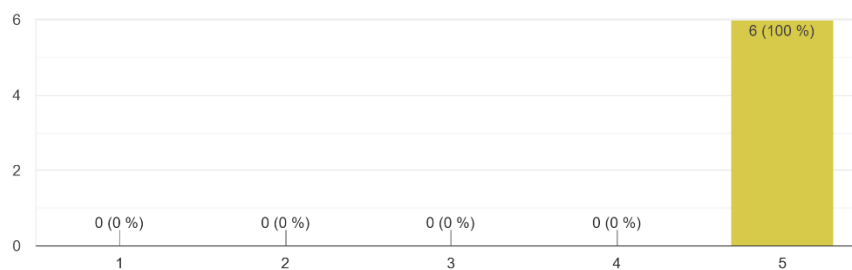
Creo que la facilidad de uso del sistema es: Donde 1 es muy difícil, 2 difícil, 3 normal, 4 fácil, 5 muy fácil

6 respuestas



Me siento muy satisfecho con la experiencia general de uso del sistema. Donde 1 es Totalmente en desacuerdo, 2 En desacuerdo, 3 Ni de acuerdo, ...sacuerdo, 4 De acuerdo, 5 Totalmente de acuerdo.

6 respuestas

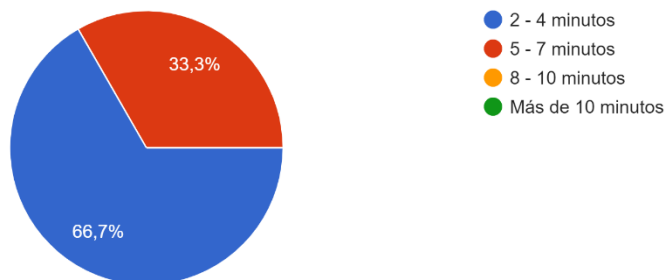


*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 23***Encuesta de satisfacción - Parte 5*

Para finalizar, ¿cuánto tiempo le llevo ubicar los sensores?

6 respuestas



*Nota.* Elaboración propia.

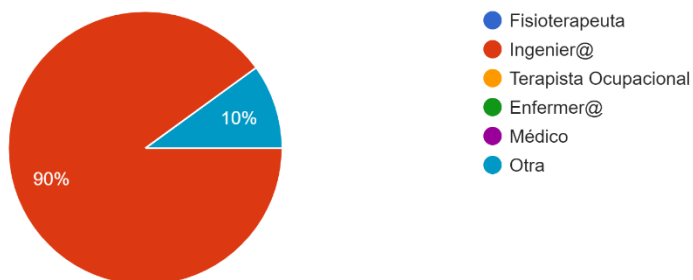
**4.4.4 Encuesta de validación**

Al comparar el sistema de análisis de movimiento alámbrico con el inalámbrico, se recopilaban las respuestas a preguntas específicas hechas a los usuarios con el fin de evaluar si el sistema cumplía con los objetivos y requisitos establecidos, esta prueba fue realizada por 10 participantes diferentes a los de la encuesta anterior. Sus respuestas se encuentran recopiladas en las figuras 24–31.

**Figura 24***Encuesta de validación - Parte 1*

¿Cuál es su ocupación o profesión?

10 respuestas

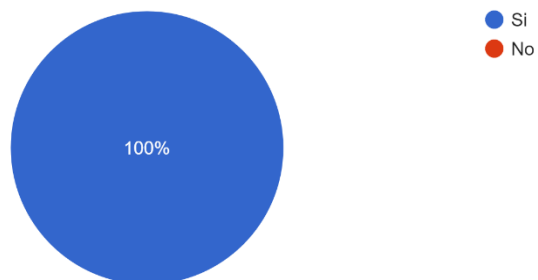


*Nota.* Elaboración propia

**Figura 25***Encuesta de validación - Parte 2*

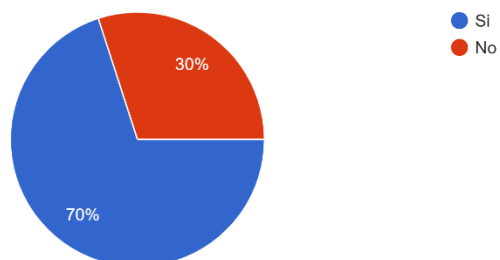
¿Confirma que está de acuerdo en participar de forma voluntaria en esta encuesta?

10 respuestas



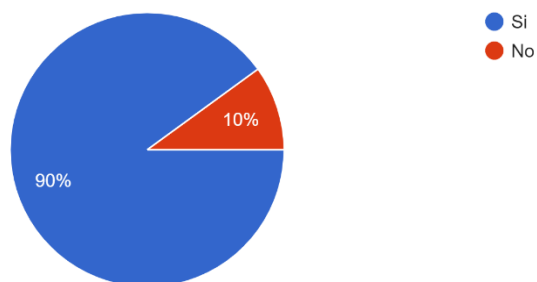
Tiene experiencia previa con sistema de captura de movimiento que usan Unidades de Medida Inercial (IMU)?

10 respuestas



¿Puede ubicar los sensores con éxito?

10 respuestas

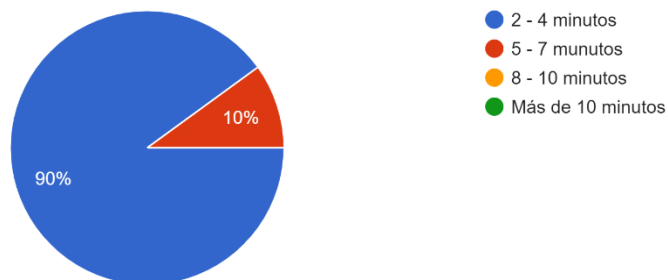


*Nota.* Elaboración propia

**Figura 26***Encuesta de validación - Parte 3*

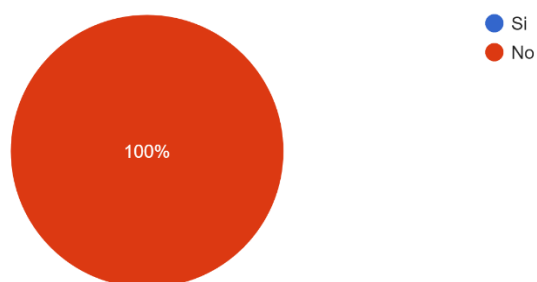
¿Cuánto tiempo le llevo ubicar los sensores?

10 respuestas



¿Cometió errores durante la ubicación de los sensores?

10 respuestas



**¿Puede mencionar al menos 3 causas de errores?**

0 respuestas

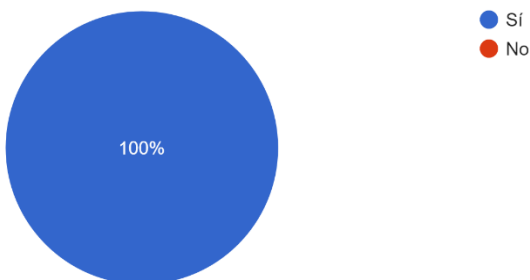
Aún no hay respuestas para esta pregunta.

*Nota.* Elaboración propia

**Figura 27**  
Encuesta de validación - Parte 4

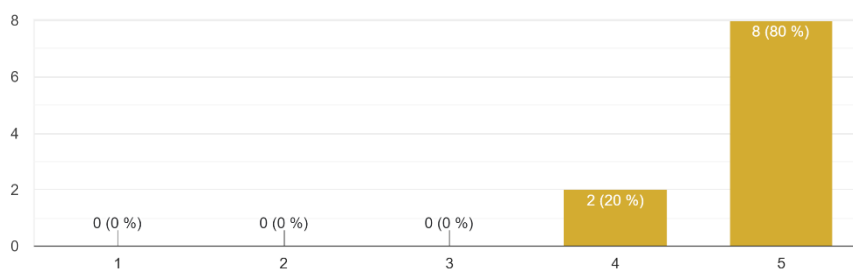
¿Encontró con facilidad como encender el dispositivo?

10 respuestas



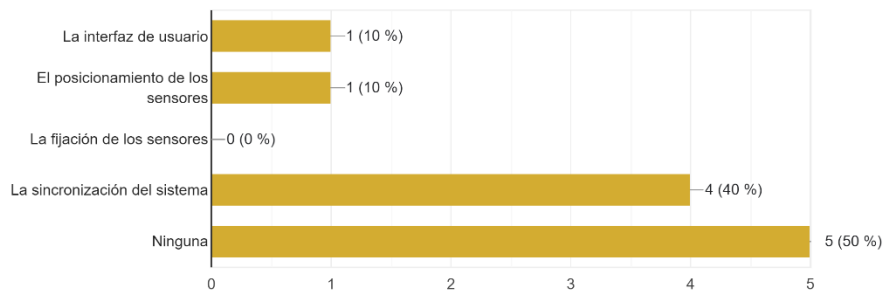
¿De 1 a 5 cómo calificaría la facilidad de uso del sistema? Donde 1 es muy difícil, 2 difícil, 3 normal, 4 fácil, 5 muy fácil

10 respuestas



¿Qué partes del sistema le resultaron más difíciles o confusas de usar? (Puede elegir varias opciones)

10 respuestas



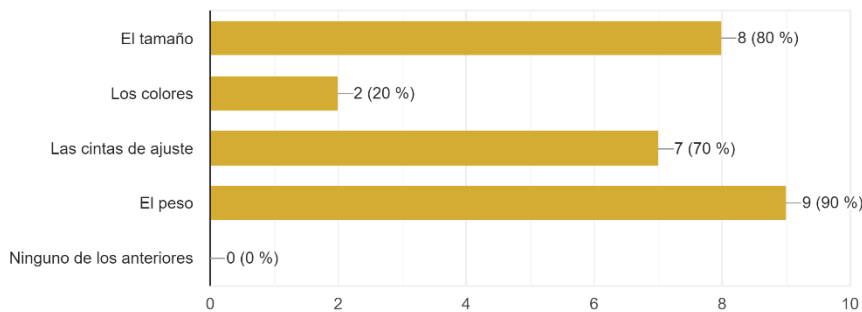
*Nota.* Elaboración propia

## Figura 28

### Encuesta de validación - Parte 5

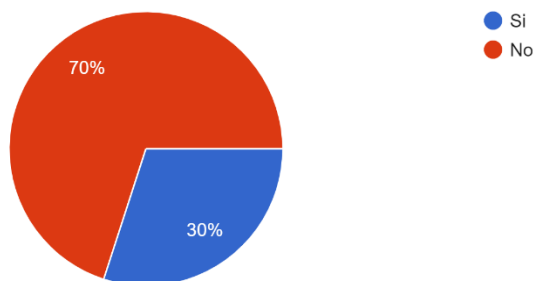
¿Qué aspectos del diseño le gustaron más? (Puede elegir varias opciones)

10 respuestas



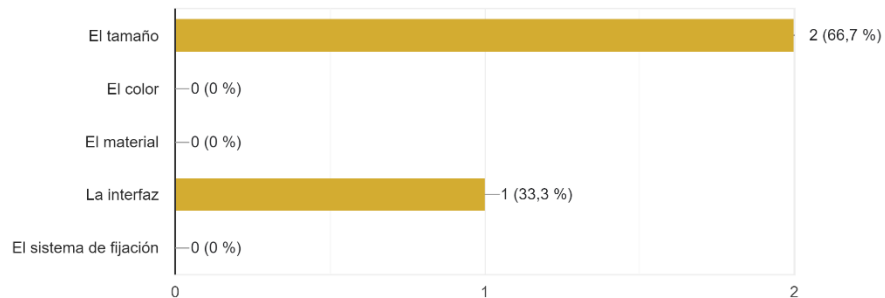
¿Considera que el sistema actual requiere cambios o mejoras en su diseño?

10 respuestas



¿Cuáles cambios o mejoras cree que deben realizarse al sistema?

3 respuestas



Nota. Elaboración propia.

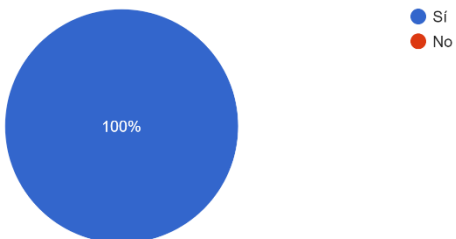


## Figura 29

### Encuesta de validación - Parte 6

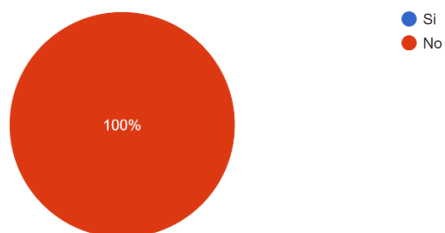
¿Encontró intuitivo el uso del sistema?

10 respuestas



¿Hubo algún momento en el que se sintió perdido o confundido en el uso del sistema?

10 respuestas



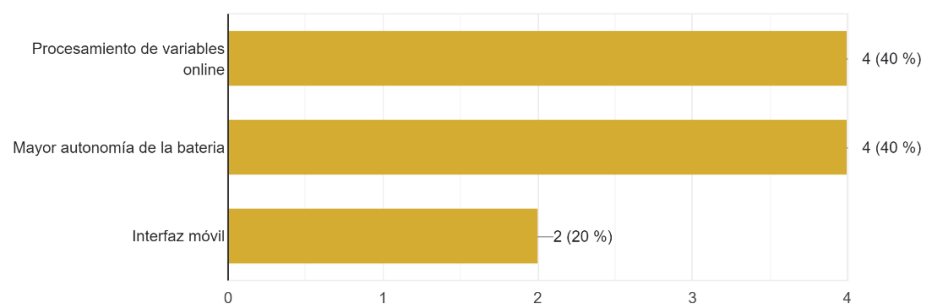
¿Cuáles fueron las causas para sentirse perdido o confundido?

0 respuestas

Aún no hay respuestas para esta pregunta.

¿Le gustaría ver alguna función adicional en el sistema?

10 respuestas



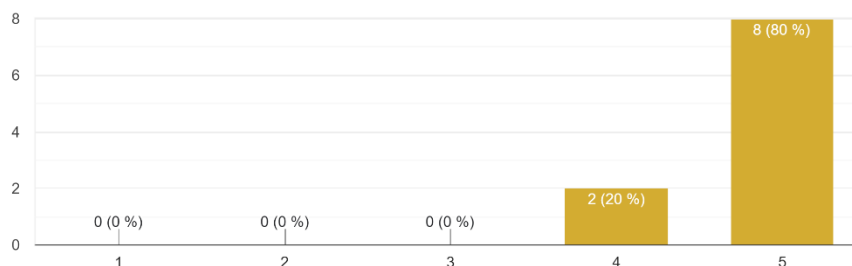
Nota. Elaboración propia

### Figura 30

#### Encuesta de validación - Parte 7

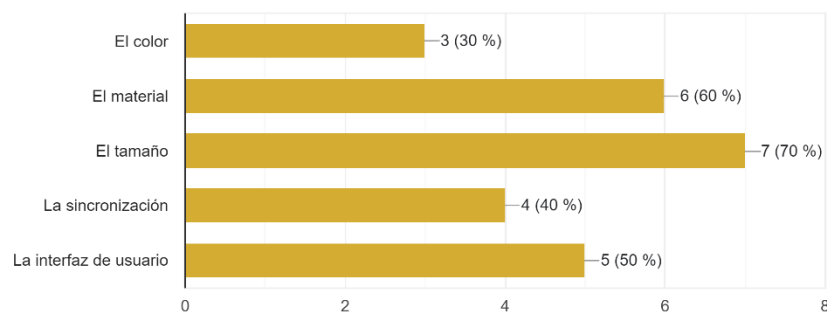
Del 1 al 5 ¿Qué tan satisfecho se sintió con la experiencia general de uso del sistema? Donde 1 es muy inconforme, 2 inconforme, 3 normal, 4 satisfecho, 5 muy satisfecho

10 respuestas



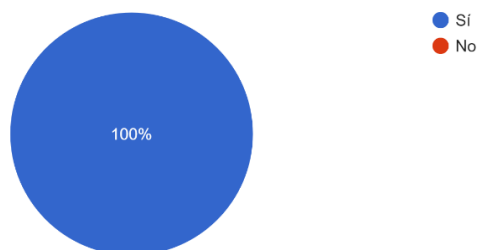
¿Qué aspectos del sistema le resultaron más atractivos o llamativos visualmente?

10 respuestas



¿Considera que el sistema es adecuado para usuarios con diferentes niveles de experiencia tecnológica?

10 respuestas



*Nota.* Elaboración propia.

## Figura 31

### Encuesta de validación - Parte 8

#### Explique brevemente su respuesta anterior

10 respuestas

Porque desde la manera que se implementó hasta su manera de utilizar permite obtener una serie de datos muy factible	
Si, puesto que al tener simplemente 2 botones hace más sencillo su uso y su entendimiento con que boten corresponde a reiniciar y prender. A comparación de otros modelos los cuales poseen más botones que pueden llegar a ser confusos	
Si, puesto que facilita su uso y mayor entendimiento del objetivo deseado	
El sistema es intuitivo y los pasos a seguir a la hora de utilizarlo se entienden.	
Es un sistema sencillo e intuitivo que permite que el usuario sin necesidad de experiencia previa usando estos sistemas pueda entender hacer uso del mismo	
Considero que el sistema es adecuado en cuanto a su interpretación y el uso de sensores es más cómodo y es ligero	
Su tamaño reducido ayuda a que sea más intuitivo para todas las personas	
	Es un sistema sencillo que no requiere de información fundamental adicional a la que indique el profesional
	Si porque el dispositivo es fácil de usar y su interfaz
	El sistema muestra mayor confort a los sensores con conexión alambria anteriormente desarrollado.

*Nota.* Elaboración propia

## 4.5 Discusión

### 4.5.1 Diseño e impresión de las carcasas

En primer lugar, la impresión 3D por la técnica de modelado fundido es una de las formas de fabricación de piezas más utilizada hoy en día, se ha convertido en una herramienta valiosa en diversos campos incluyendo la investigación universitaria. A pesar de permitir prototipos personalizados, esta técnica también presenta desafíos y limitaciones. En la tabla a continuación, se describen los beneficios y aspectos por mejorar relacionados con el diseño de las piezas.

**Tabla 11**

*Ventajas y desventajas de impresión 3D por FMD*

Beneficio	Limitaciones
La adaptabilidad de las piezas fabricadas las hace altamente funcionales. Se ha concebido un diseño único que es, fácilmente replicable.	La calidad de la superficie de las piezas impresas puede no ser tan alta como la obtenida con otros métodos de fabricación. Esto puede estar influenciado por factores como la calidad del filamento utilizado, la configuración de la impresora y la precisión del diseño.
Las carcasas fabricadas abordaron de manera eficaz los requisitos planteados en el proyecto, al ofrecer un sistema más compacto y portátil, lo que permite su uso en entornos de laboratorio como en exteriores.	Después de realizar una prueba a escala con las propiedades del ABS y del PLA, con un diseño de manilla para la fijación de las carcasas, se observó que era difícil crear una sujeción que se adaptara a los

Beneficio	Limitaciones
<p>La impresión rápida aceleró el proceso de desarrollo y prototipado. En cuestión de horas, las piezas fabricadas permitieron identificar aquellos detalles que requerían mejoras. Con el diseño final, es posible producir fácilmente la cantidad de carcasas necesarias, ya sea para expandir el sistema con más sensores o para reemplazar los existentes.</p>	<p>diferentes músculos. Por lo tanto, se optó por usar otro método para la sujeción del sistema.</p> <p>Inconvenientes en la impresión como los descritos a continuación generaron alteraciones en el diseño de algunas piezas, que finalmente se descartaron.</p> <p><b>Wrapping (deformación):</b> Producido cuando las capas inferiores de la pieza se enfrían más rápido que las capas superiores, generando que en las esquinas de la pieza se levantaran y curvaran hacia arriba</p> <p><b>Adhesión a la cama de impresión:</b> La dificultad de adhesión de la pieza a la cama de impresión, generó en algunos casos la deformación de estas, incluso al haber utilizado cinta Kapton y pegamento en barra para su fijación.</p>
<p>El acceso a impresoras 3D en la universidad, permitió aprovechar los recursos de esta.</p>	<p>En ocasiones es necesario realizar un post procesamiento adicional, como lijar y pulir las piezas impresas, lo cual consume tiempo.</p>

*Nota.* Elaboración propia.

#### 4.5.2 Simulación de elementos finitos

La simulación de elementos finitos desempeña un papel fundamental en la evaluación del comportamiento de las estructuras de las carcasas fabricadas con los materiales PLA y ABS. Los resultados de las simulaciones mostraron que, para las cargas y tensiones aplicadas, estos materiales mostraron un comportamiento notablemente similar. De acuerdo con la literatura, si bien es complicado ofrecer cifras precisas (debido a las variaciones en las propiedades del filamento según la marca y la calidad del material) se estima que la resistencia del ABS podría superar en un 10 – 20% a la del PLA [50].

Los datos obtenidos en las simulaciones de elementos finitos proporcionaron información sobre cómo estos polímeros reaccionan bajo diferentes condiciones de carga, fundamental para garantizar la durabilidad y resistencia del sistema en su aplicación práctica. Incluso, con una carga máxima de 1000N, se observó que ambos materiales sufrieron deformaciones mínimas en la cara longitudinal: PLA ( $1,1236 \times 10^{-4}$  m) y ABS ( $2,3018 \times 10^{-4}$  m); y no experimentaron roturas significativas, resaltando su capacidad de soportar cargas considerables sin comprometer su integridad estructural.

Con los parámetros de impresión utilizados (velocidad de impresión rápida, densidad del relleno, entre otras) se sugiere que el material seleccionado para la impresión de las carcasas sea el ABS, debido a que presenta acabados superficiales aparentemente más lisos, conservando las geometrías internas del modelo, evitando el wrapping en las esquinas de la base de impresión. Además de su amplia disponibilidad generalizada en el mercado y su alta capacidad de resistencia.

### 4.5.3 Método de fijación

La elección del método de fijación del sistema de análisis de movimiento inalámbrico entre la piel y la ropa puede variar en función de varios factores, los cuales se detallan en la tabla 12.

**Tabla 12**

*Ventajas y desventajas de la Fijación de sistemas IMU entre la ropa y la piel.*

	Ventajas	Desventajas
Ropa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor comodidad para el usuario, ya que se coloca sobre la ropa y no directamente sobre la piel.</li> <li>• Proporciona flexibilidad en términos de colocación y ajuste, ya que se puede sujetar a diferentes prendas según las necesidades</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede haber un mayor riesgo de movimiento o desplazamiento, especialmente si la ropa no está ajustada o si el usuario está realizando actividades intensas.</li> </ul>
Piel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proporciona un contacto directo con la piel, lo que puede mejorar la posición de las lecturas, especialmente en actividades que requieren una detección más fina de movimientos</li> <li>• Menos probabilidad de desplazamientos ya que se adhiere directamente a la piel.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede resultar incomodo para algunos usuarios, especialmente si se usa durante periodos prolongados</li> <li>• La colocación precisa puede ser más crítica, ya que la piel tiene áreas sensibles y puede existir variabilidad en la anatomía de diferentes usuarios.</li> </ul>

*Nota.* Elaboración propia.

Es esencial destacar que, para sistemas de este tipo, las condiciones óptimas de uso sugieren su colocación directa sobre la piel de los sujetos de prueba. Aunque es posible ubicarlos sobre la ropa, se debe asegurar un mínimo de perturbaciones y deslizamientos, lo cual se logra mediante las correas de fijación. No obstante, es importante señalar que la fuerza aplicada al asegurar las correas puede influir en la libertad de movimiento de los usuarios, transformando el movimiento natural en uno inducido o condicionado.

En un estudio liderado por Damien Hoareau y su equipo, se exploraron las diferencias en la fijación de sistemas IMU entre la piel y ropa. El propósito de esta investigación fue comparar la colocación de sensores en la piel y en la tela para evaluar las posturas y movimientos de la parte superior de los brazos y el tronco, utilizando los sensores en la piel como referencia.

Durante el análisis de los resultados, se observó que la colocación de sensores sobre la ropa introdujo cierta variabilidad en la posición y orientación de los dispositivos, lo cual plantea desafíos al intentar cuantificar la significancia de las diferencias observadas entre ambas condiciones de fijación. Además, se discutió como la adaptación de los sensores a diferentes tipos de tela y la anatomía individual de los usuarios puede generar variaciones, lo que aumenta la

dificultad para estandarizar la colocación de sensores sobre la ropa y complica la comparación significativa de resultados entre estudios.

Para finalizar, se resaltó que la variabilidad introducida por la colocación de sensores sobre la ropa dificulta la cuantificación de la significancia de las diferencias observadas entre los dos métodos de fijación. Asimismo, se subraya la necesidad de investigar posibles algoritmos de compensación de errores con el propósito de mitigar esta limitación [51].

#### ***4.5.4 Hallazgos de usabilidad***

En este contexto, es fundamental destacar que el análisis de usabilidad de este proyecto se centra en la mejora del diseño del nuevo sistema. Estos resultados serán muy valiosos para la construcción de un diseño mejorado que podría materializarse en futuros trabajos.

Durante la primera prueba de satisfacción, enfocada en evaluar el diseño y fabricación del sistema, el 100% de los participantes percibió que el proceso de ajuste de los sensores en el cuerpo es rápido, eficiente, sencillo de ubicar y cómodo al momento de colocarlo. Además, destacaron que el sistema no interfirió con su libertad de movimiento, expresando un alto nivel de satisfacción con la experiencia de uso general del sistema. Según la percepción de los participantes, el 66,7% sintió que los sensores se mantenían en su lugar de manera cómoda durante la actividad de caminata y el 83,3 % considero que la fijación de los sensores es totalmente adecuada.

Estos resultados indican que, para este grupo de personas, el sistema de análisis inalámbrico cumple con los requisitos establecidos en el proyecto. Ya que, se buscaba entre otras cosas, la facilidad de uso, la capacidad de los usuarios para ubicar el sistema por sí mismos, la comodidad al emplear el dispositivo y la no interferencia en sus movimientos. Aunque el sistema se percibe como intuitivo, en algunas ocasiones fue necesario proporcionar instrucciones a los participantes sobre como ajustar las correas al sensor y luego a la parte del cuerpo en la que se iba a ubicar.

En la encuesta de validación, diseñada para evaluar la experiencia de los usuarios con el sistema, se evidencio una percepción muy positiva. Todos los participantes coincidieron en que el uso del sistema fue intuitivo, logrando ubicar con facilidad el sistema en el cuerpo. Además, destacaron que no experimentaron sensación de pérdida o confusión durante su utilización, considerando que el sistema es adecuado para usuarios con diferentes niveles de experiencia tecnológica.

Resulta notable que el 90% de los participantes lograron ubicar con éxito los sensores por sí mismos en un corto periodo de tiempo, específicamente de 2 a 4 min. Además, el 80% califico el uso del sistema como muy fácil. Entre los aspectos de diseño, los participantes expresaron preferencia por el peso, el tamaño y las correas de ajuste.

Si bien la experiencia general fue positiva, los usuarios compartieron sugerencias y preferencias para el sistema. Se destacó la necesidad de mejorar el tamaño de las carcasas y la interfaz de análisis de datos, aún en desarrollo. Además, el 40% de los usuarios mostró interés en un procesamiento en tiempo real de estas variables, mientras que otro 40% expresó preferencia por una mayor autonomía de la batería, mientras que el 20% preferiría una aplicación móvil. Estos comentarios proveen valiosas perspectivas para futuras mejoras y desarrollos del sistema.

## Capítulo 5. Conclusiones

### 5.1 Conclusiones

Con el objetivo de evaluar la usabilidad de las carcasas y soportes del sistema de captura de movimiento inalámbrico, se llevaron a cabo pruebas con dieciséis participantes. Mediante evaluaciones de satisfacción y validación, se recopiló información valiosa que reflejó la percepción de los participantes sobre el sistema, al mismo tiempo que se identificaron posibles áreas de mejora para implementar en futuras iteraciones. La mayoría de los encuestados expresó que las carcasas cumplían con los requisitos de proteger los componentes, ser resistentes al impacto, portátiles, visualmente atractivas, cómodas y fáciles de usar.

En cuanto al diseño de las carcasas, se logró desarrollar una estructura capaz de albergar todos los componentes necesarios para su funcionamiento. Además, se seleccionó el material para la impresión de las carcasas considerando los materiales más comúnmente empleados en la técnica de impresión 3D conocida como Modelado por Deposición Fundida (FDM). El material ABS destacó, por un lado, por proporcionar acabados de alta calidad durante el proceso de fabricación, mejorando la estética del diseño y por el otro, por mantener la integridad estructural de las carcasas durante las simulaciones con el método de elementos finitos frente a fuerzas externas aleatorias simuladas de 120, 500 y 1000 N (Aproximadamente 12,23, 50,97 y 101,94 kgf).

Por otro lado, las bandas utilizadas para sujetar los sensores se caracterizaron por su alta flexibilidad, permitiendo una ubicación precisa en varias áreas del cuerpo. La elección del neopreno como material para estas bandas resultó acertada debido a su resistencia a la deformación, asegurando un rendimiento duradero en aplicaciones de movimiento. Estas bandas se adaptan eficazmente a los cambios en el volumen muscular durante el movimiento, reduciendo la presión sobre la piel y mejorando la comodidad general del sistema en comparación con otros métodos de sujeción, como el uso de elásticos o correas. Adicionalmente, no se evidenciaron lesiones cutáneas por presión o reacciones adversas al material.



**Figura 32**

*Comparación mecánica de los sistemas alámbrico e inalámbrico*



*Nota.* Elaboración propia.

La capacidad de replicación del sistema mediante impresión 3D presenta varias ventajas significativas. En primer lugar, permite la creación de un sistema de análisis de movimiento inalámbrico de bajo costo, convirtiendo nuestro sistema en una opción asequible, beneficiando especialmente entornos con recursos limitados o aplicaciones de bajo presupuesto. Además, a diferencia de los sistemas alámbricos, la ausencia de una unidad principal en el cuerpo proporciona a los usuarios mayor libertad de movimiento, mejorando significativamente la comodidad y experiencia de uso y disminuyendo así el condicionamiento del movimiento.

En segundo lugar, es importante destacar la facilidad de replicación del sistema. La impresión 3D permite crear múltiples copias del diseño con rapidez y precisión. Esto significa que, si es necesario producir varios sistemas de análisis de movimiento para un proyecto o una aplicación específica, el proceso puede llevarse a cabo sin dificultad y sin necesidad de altas inversiones. Esta característica es especialmente relevante en situaciones donde se requiere flexibilidad y adaptabilidad en la producción.

Tomando en consideración lo expuesto, se puede concluir que la ejecución de este trabajo integral de grado fue coherente con los objetivos planteados. Durante la evaluación de la usabilidad de las carcasas y soportes diseñados para el sistema de captura de movimiento inalámbrico basado en unidades de medida inercial (IMU), se llevaron a cabo pruebas con participantes en un entorno controlado mientras ejecutaban movimientos específicos. Este enfoque proporcionó datos relevantes sobre la percepción del sistema, permitiendo la identificación de oportunidades de mejora que pueden ser incluidos a futuras mejoras y refinamientos del sistema.

## 5.2 Recomendaciones

Para la impresión de las carcasas en el material **ABS** se recomienda utilizar la configuración de:

- **Calidad:** Buena
- **Densidad del relleno:** (Media 30%)
- **Tipo de relleno:** Rectilíneo
- **Armazones:** Normal
- **Altura de la capa:** 0,2
- **Velocidad:** Rápida

Además de validar la opción de soportes para la estabilidad de la pieza al momento de la impresión.

Por otro lado, aunque es posible la ubicación de los sensores en las diferentes zonas del cuerpo por sí mismos, se sugiere que en el proceso de colocación del sistema haya una persona que supervise y asista el posicionamiento del sistema, con el fin de evitar caídas o una posición inadecuada

Para obtener mediciones precisas y minimizar el riesgo de desplazamiento, se sugiere ubicar el sistema de soportes directamente sobre la piel del usuario, especialmente al posicionar el sensor en el muslo para garantizar mediciones más exactas y confiables.

Debido a que la mayoría de los componentes electrónicos del sistema de captura de movimiento fueron actualizados en esta versión inalámbrica, aún se presentan algunos inconvenientes de software en la recopilación de datos durante la captura de movimiento. Aunque esta situación no afecta el presente proyecto, es una oportunidad de mejora en la cual continúa trabajando el equipo del grupo de investigación Bioingeniería.

## 5.3 Trabajos futuros

Dado el interés de los usuarios en una interfaz móvil, para trabajos futuros se recomienda el desarrollo de una aplicación que permita el procesamiento y análisis de datos en tiempo real, brindando a los usuarios mayor control y visualización de la información. La aplicación podría almacenar los datos de forma local o enviarlos a alguna plataforma de colección de datos en la nube como ThingSpeak. Además de identificar la información con los datos del usuario: Nombre, peso, edad, longitud de las extremidades, entre otros.

Se podría considerar la implementación de características de seguridad adicionales, como alertas o sistemas de parada de emergencia, especialmente si el trabajo se orienta en aplicaciones donde la seguridad del usuario es crítica, como la rehabilitación o el deporte de alto rendimiento.

Con el sistema también se podrían realizar estudios clínicos más amplios y rigurosos para evaluar la eficacia del sistema en el monitoreo y la evaluación de condiciones médicas específicas como trastornos neuromusculares o lesiones ortopédicas.

También se podrían realizar trabajos que integren sensores IMU con otras tecnologías, como cámaras de seguimiento de video o dispositivos de realidad virtual, para ampliar las capacidades del sistema y permitir aplicaciones más avanzadas como el diseño en videojuegos (serios o no) y animaciones.

## Referencias Bibliográficas

- [1] S. Pursell, “Pruebas de usabilidad: definición, tipos y ejemplos.” Accessed: May 12, 2023. [Online]. Available: <https://blog.hubspot.es/website/pruebas-usabilidad#metricas>
- [2] L. Porta Simó, P. González Díaz, and A. Pueyo i Busquets, “Usabilidad: ¿qué es y cuáles son sus principios?” Accessed: oct. 08, 2023. [Online]. Available: <https://blogs.uoc.edu/informatica/usabilidad-que-es-y-cuales-son-sus-principios/>
- [3] M. Peña Ontiveros, “Análisis de la usabilidad en el proceso de diseño: Propuesta de un índice para evaluar el diseño del producto,” Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Cd. Juárez, 2021. [Online]. Available: [http://erecursos.uacj.mx/bitstream/handle/20.500.11961/6081/02\\_tesis%20-%20MPen%CC%83a.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://erecursos.uacj.mx/bitstream/handle/20.500.11961/6081/02_tesis%20-%20MPen%CC%83a.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [4] J. Rubin and D. Chisnell, *Handbook of Usability Testing*, Second Edition. Indianapolis, 2008. Accessed: Aug. 07, 2023. [Online]. Available: <https://docplayer.net/78863249-Handbook-of-usability-testing.html>
- [5] B. Klaassen *et al.*, “Usability Evaluations of a Wearable Inertial Sensing System and Quality of Movement Metrics for Stroke Survivors by Care Professionals,” *Front Bioeng Biotechnol*, vol. 5, Apr. 2017, doi: 10.3389/FBIOE.2017.00020.
- [6] J. Liang *et al.*, “Usability Study of Mainstream Wearable Fitness Devices: Feature Analysis and System Usability Scale Evaluation.,” *JMIR Mhealth Uhealth*, vol. 6, no. 11, p. e11066, Nov. 2018, doi: 10.2196/11066.
- [7] A. Keogh, R. Argent, A. Anderson, B. Caulfield, and W. Johnston, “Assessing the usability of wearable devices to measure gait and physical activity in chronic conditions: a systematic review,” *J Neuroeng Rehabil*, vol. 18, no. 1, pp. 1–17, Dec. 2021, doi: 10.1186/S12984-021-00931-2/TABLES/6.
- [8] C. L. Domínguez Morales, “Rediseño mecánico, montaje y caracterización metrológica de un sistema inercial de captura de movimientos para aplicaciones biomédicas,” Universidad Antonio Nariño, Bogotá D. C., 2022. doi: 10.1109/TIE.2011.2148671.
- [9] J. S. Molina Acevedo, “Implementación de un Sistema Basado en Sensores Inerciales para la Caracterización Biomecánica de la Marcha Normal y de Pacientes con Amputación del

- Miembro Inferior,” Universidad Antonio Nariño, Bogotá D. C., 2021. Accessed: Mar. 12, 2023. [Online]. Available: <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/5017>
- [10] J. Sopalo Romero, “Diseño orientado a impresión 3D de mano protésica con articulaciones flexibles,” Sep. 2019.
- [11] M. E. Guarín, A. Jonathan, and G. Londoño, “Diseño y mejora de dispositivos de asistencia mecánicos y/o robóticos para personas con discapacidad, por medio de impresión 3D,” 2022, Accessed: May 13, 2023. [Online]. Available: <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/25982>
- [12] Fundación Caser, “¿Qué es el diseño universal?” Accessed: Oct. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.fundacioncaser.org/autonomia/cuidadores-y-promocion-de-la-autonomia/promover-la-autonomia-personal/que-es-el-diseno-universal>
- [13] W. Giraldo Pérez and M. C. Otero Gómez, “La importancia de la innovación en el producto para generar posicionamiento en los jóvenes,” *Revista Facultad de Ciencias Económicas*, vol. 25, no. 2, Sep. 2017, doi: 10.18359/RFCE.3072.
- [14] S. O. Santamaría, “Introducción a la usabilidad y su evaluación,” 2011.
- [15] N. Madrid, “Definición de usabilidad: ¿Qué significa que algo sea usable?” Accessed: May 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.nachomadrid.com/2020/03/definicion-de-usabilidad/>
- [16] ISO 9241-210, *Ergonomía de la interacción hombre-sistema - Parte 210: Diseño centrado en el ser humano para sistemas interactivos*. 2019. Accessed: May 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/77520.html>
- [17] I. D. Claros Gómez, “Lineamientos de Diseño para el Desarrollo de Aplicaciones Usables bajo Entornos Web.” Accessed: Aug. 21, 2023. [Online]. Available: <http://artemisa.unicauca.edu.co/~iclaros/usabilidad/tecnicas.htm>
- [18] M. Pedrosa, “¿La usabilidad puede medirse? Escala SUS y test de usuario.” Accessed: Oct. 09, 2023. [Online]. Available: <https://www.flat101.es/blog/disenio-ux/la-usabilidad-puede-medirse-escala-sus-y-test-de-usuario/>
- [19] M. C. Gómez, “Qué es una encuesta, para qué sirve y qué tipos existen,” *hubspot.es*. Accessed: Oct. 14, 2023. [Online]. Available: <https://blog.hubspot.es/service/que-es-una-encuesta#que>

- [20] A. López, “Qué es el diseño de productos: entiende el concepto y conoce sus etapas.” Accessed: Sep. 06, 2023. [Online]. Available: <https://rockcontent.com/es/blog/disenio-de-productos/>
- [21] C. Ortega, “Diseño de productos: Qué es y cuál es el proceso.” Accessed: Sep. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.questionpro.com/blog/es/disenio-de-productos/>
- [22] M. D. A. Bravo, R. C. F. Rengifo, and R. W. Agredo, “Comparison of two Motion Capture Systems by means of joint Trajectories of human gait,” *Revista Mexicana de Ingeniería Biomedica*, vol. 37, no. 2, pp. 149–160, May 2016, doi: 10.17488/RMIB.37.2.2.
- [23] Adobe, “Captura de movimiento | Introducción a la captura de movimiento.” Accessed: Aug. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.adobe.com/es/creativecloud/animation/discover/motion-capture.html>
- [24] UAV Navigation, “IMU: Qué es una IMU y para qué se utiliza | UAV Navigation.” Accessed: May 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.uavnavigation.com/es/empresa/blog/que-es-un-imu>
- [25] O. A. Jorquera, “Fabricación Digital: Introducción al modelado e impresión 3D,” *Serie diseño y autoedición*, 2017.
- [26] IMPRESORAS3D.COM, “Tipos de impresoras 3D,” IMPRESORAS3D.COM. Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.impresoras3d.com/tipos-de-impresoras-3d/>
- [27] S. Susana, “Guía completa: SLA o impresión 3D por estereolitografía, ¿te explicamos todo!,” 3Dnatives. Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/>
- [28] F. Lillo, D. Freire Fernández, J. C. Araya, C. Fuentealba, M. Tapia, and T. Hansen, “BioPrinter - El mundo de la impresión 3D,” <http://www.fablab.uchile.cl/>. Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <http://www.fablab.uchile.cl/proyectos/438/bioprinter/>
- [29] ZSCHIMMER & SCHWARZ, “¿Qué son los polímeros y cómo se clasifican?” Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.zschimmer-schwarz.es/noticias/que-son-los-polimeros-y-como-se-clasifican/>
- [30] go3dprint.es, “Materiales Más Usados En Impresión 3D,” go3dprint.es. Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://go3dprint.es/materiales-mas-usados-en-impresion-3d/>
- [31] J. A. Alfonso Moreno, “Análisis del efecto de la tensión fuera del plano en la conformabilidad de chapa metálica,” Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad

- de Sevilla, Sevilla, 2014. Accessed: Oct. 22, 2023. [Online]. Available: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/60222>
- [32] A. Ortiz Prado, O. Ruiz Cervantes, and J. A. Ortiz Valera, “MODELADO DE PROCESOS DE MANUFACTURA,” Oct. 2013, Accessed: Oct. 23, 2023. [Online]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/2548>
- [33] Biomecánica, “Introducción al método de los elementos finitos introducción,” 2023.
- [34] A. Muguiru, “Escala de Likert: Qué es y cómo utilizarla en tus encuestas.,” <https://www.questionpro.com/>. Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.questionpro.com/blog/es/que-es-la-escala-de-likert-y-como-utilizarla/>
- [35] ADR Formación, “¿Qué es SolidWorks?,” <https://www.adrformacion.com/>. Accessed: Oct. 17, 2023. [Online]. Available: [https://www.adrformacion.com/knowledge/ingenieria-y-proyectos/\\_que\\_es\\_solidworks\\_.html](https://www.adrformacion.com/knowledge/ingenieria-y-proyectos/_que_es_solidworks_.html)
- [36] Dassault Systèmes, “INTRODUCCIÓN A SOLIDWORKS,” 2015.
- [37] SemcoCAD, “Software de Simulación Ansys,” <https://www.semco.com.pe/>. Accessed: Oct. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.semco.com.pe/ansys-software-de-simulacion/>
- [38] Matweb, “Overview of materials for Polylactic Acid (PLA) Biopolymer.” Accessed: Oct. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ab96a4c0655c4018a8785ac4031b9278&ckck=1>
- [39] A. Parra, “¿Qué es la investigación cuasi experimental?” Accessed: Nov. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.questionpro.com/blog/es/investigacion-cuasi-experimental/>
- [40] L. Ruiz Mitjana, “Investigación cuasi experimental: ¿qué es y cómo está diseñada?” Accessed: Nov. 18, 2023. [Online]. Available: <https://psicologiyamente.com/miscelanea/investigacion-cuasi-experimental>
- [41] Erika, “La antropometría.” Accessed: Oct. 22, 2023. [Online]. Available: <https://antropometriaerika.blogspot.com/2016/07/>
- [42] P. Salvador, F. García, M. Iranzo, P. Pérez-Soriano, and S. Llana, “Evaluación de la presión plantar en cinta rodante y suelo durante la marcha,” *Fisioterapia*, vol. 33, no. 5, pp. 198–202, Sep. 2011, doi: 10.1016/J.FT.2011.06.009.
- [43] Centro de Aprendizaje de Google Workspace, “Qué puedes hacer con Formularios,” <https://support.google.com/>. Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available:

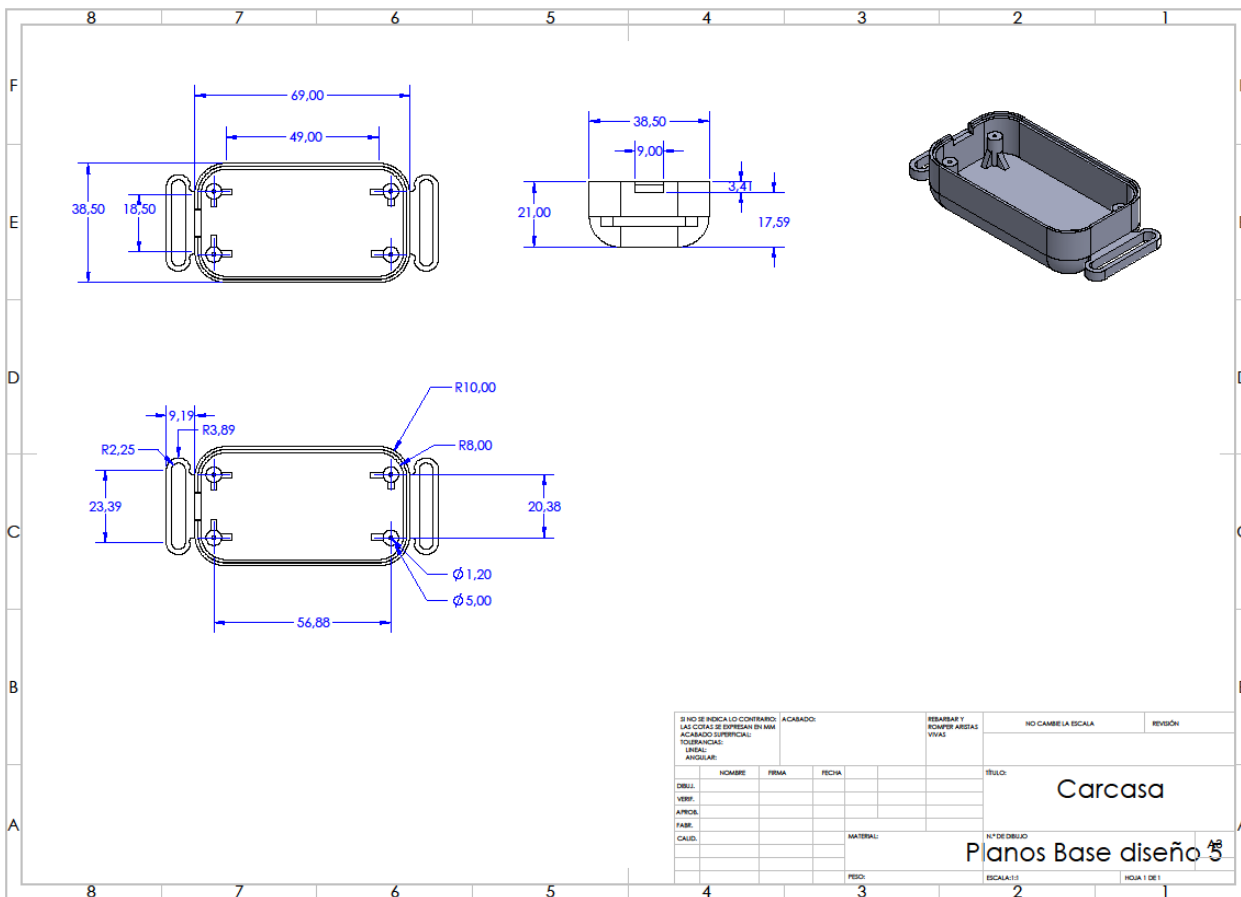
- [https://support.google.com/a/users/answer/9302965?hl=es&ref\\_topic=9296604&sjid=8088497281768192373-NA](https://support.google.com/a/users/answer/9302965?hl=es&ref_topic=9296604&sjid=8088497281768192373-NA)
- [44] SIMPLIFY3D, “Filament Properties Table.” Accessed: Nov. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/properties-table/>
- [45] 4dlab, “Filamento ABS para impresión 3D.” Accessed: Nov. 14, 2023. [Online]. Available: <https://4dlab.co/products/abs>
- [46] 4dlab, “Filamento PLA para impresión 3D.” Accessed: Nov. 14, 2023. [Online]. Available: <https://4dlab.co/products/pla>
- [47] Matweb, “Polychloroprene Rubber (CR).” Accessed: Nov. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=0ffd2bd01cf244adafabdd7d766c98c9>
- [48] Neoprener, “Neoprene Fabric,” <https://neoprener.com/>. Accessed: Oct. 18, 2023. [Online]. Available: <https://neoprener.com/neoprene-sports/neoprene-fabric/>
- [49] Kpnsafety solutions, “¿Qué es el neopreno y para qué sirve?,” [www.kpnsafety.com](http://www.kpnsafety.com). Accessed: Oct. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.kpnsafety.com/que-es-neopreno-para-que-sirve/>
- [50] K. ÖZSOY, A. ERCETİN, and Z. A. ÇEVİK, “Comparison of Mechanical Properties of PLA and ABS Based Structures Produced by Fused Deposition Modelling Additive Manufacturing,” *European Journal of Science and Technology*, Nov. 2021, doi: 10.31590/EJOSAT.983317.
- [51] G. Andreoni *et al.*, “Evaluation of In-Cloth versus On-Skin Sensors for Measuring Trunk and Upper Arm Postures and Movements,” *Sensors 2023, Vol. 23, Page 3969*, vol. 23, no. 8, p. 3969, Apr. 2023, doi: 10.3390/S23083969.



# Anexos

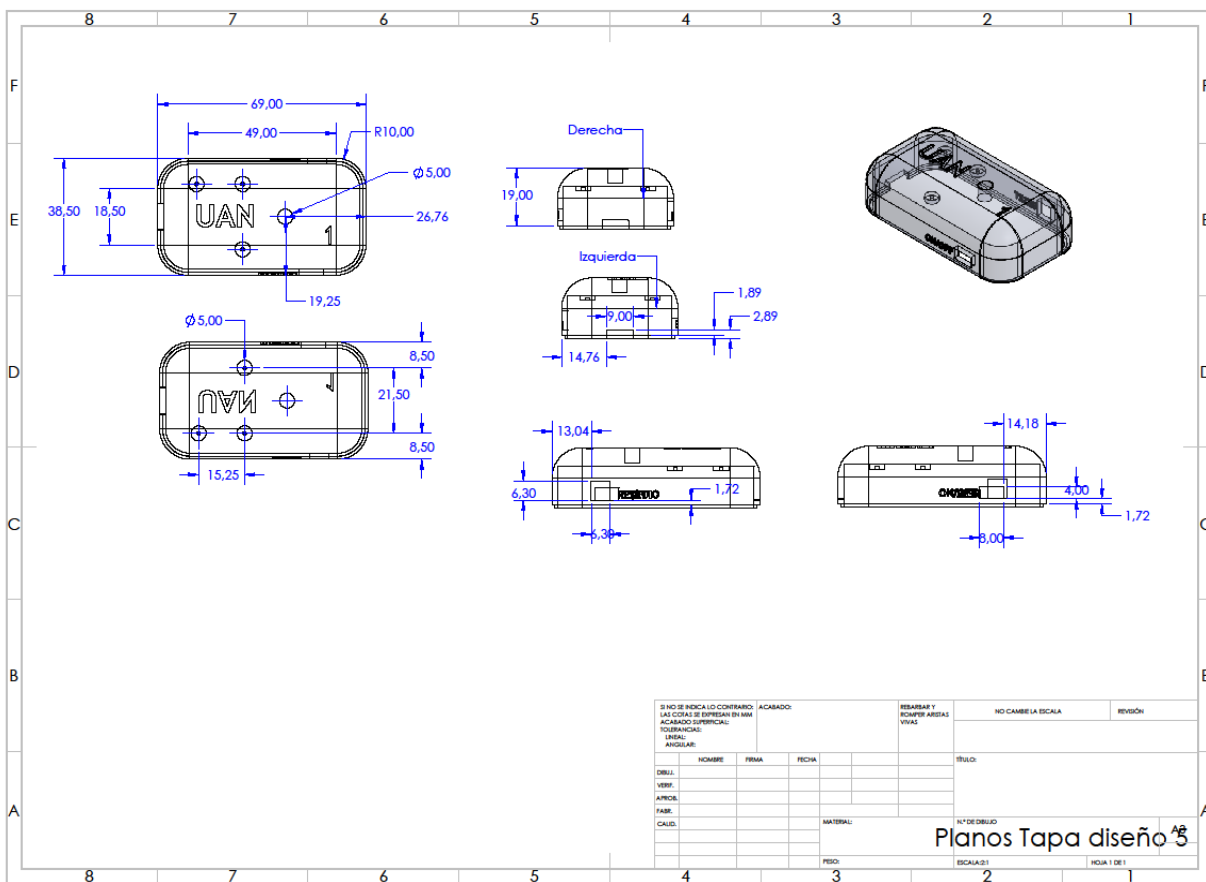
## Anexo 1

Planos “Base” del diseño seleccionado




Anexo 2

Planos "Tapa" del diseño seleccionado




## Anexo 3

### Encuesta de satisfacción del usuario



**Prueba preliminar de usabilidad para un sistema de análisis de movimiento inalámbrico.**

Tu correo se registrará cuando envíes este formulario 

\* Indica que la pregunta es obligatoria

**Sistema de análisis de movimiento**

**Considero que el sistema de fijación de los sensores es sencillo de ubicar.** \*

*Donde 1 es Totalmente en desacuerdo, 2 En desacuerdo, 3 Ni de acuerdo, ni en desacuerdo, 4 De acuerdo, 5 Totalmente de acuerdo.*

1 2 3 4 5

Totalmente en desacuerdo      Totalmente de acuerdo

**Me parece que el proceso de ajuste de los sensores en el cuerpo es rápido y eficiente.** \*

*Donde 1 es Totalmente en desacuerdo, 2 En desacuerdo, 3 Ni de acuerdo, ni en desacuerdo, 4 De acuerdo, 5 Totalmente de acuerdo.*

1 2 3 4 5

Totalmente en desacuerdo      Totalmente de acuerdo

**Me siento bastante cómodo con la colocación de los sensores en el cuerpo.** \*

*Donde 1 es Totalmente en desacuerdo, 2 En desacuerdo, 3 Ni de acuerdo, ni en desacuerdo, 4 De acuerdo, 5 Totalmente de acuerdo.*

1 2 3 4 5

Totalmente en desacuerdo      Totalmente de acuerdo

**La fijación de los sensores NO interfiere con la libertad de mi movimiento.** \*

*Donde 1 es Totalmente en desacuerdo, 2 En desacuerdo, 3 Ni de acuerdo, ni en desacuerdo, 4 De acuerdo, 5 Totalmente de acuerdo.*

1 2 3 4 5

Totalmente en desacuerdo      Totalmente de acuerdo

**Considero que la fijación de los sensores es segura durante la actividad.** \*

*Donde 1 es Totalmente en desacuerdo, 2 En desacuerdo, 3 Ni de acuerdo, ni en desacuerdo, 4 De acuerdo, 5 Totalmente de acuerdo.*

1 2 3 4 5

Totalmente en desacuerdo      Totalmente de acuerdo

**Siento que los sensores se mantienen en su lugar de manera cómoda mientras camino.** \*

*Donde 1 es Totalmente en desacuerdo, 2 En desacuerdo, 3 Ni de acuerdo, ni en desacuerdo, 4 De acuerdo, 5 Totalmente de acuerdo.*

1 2 3 4 5

Totalmente en desacuerdo      Totalmente de acuerdo

**Considero que el sistema de fijación de los sensores es adecuado.** \*

*Donde 1 es Totalmente en desacuerdo, 2 En desacuerdo, 3 Ni de acuerdo, ni en desacuerdo, 4 De acuerdo, 5 Totalmente de acuerdo.*

1 2 3 4 5

Totalmente en desacuerdo      Totalmente de acuerdo

**Hallar las funciones de encendido y reinicio en el sensor fue una tarea sencilla para mí.** \*

*Donde 1 es Totalmente en desacuerdo, 2 En desacuerdo, 3 Ni de acuerdo, ni en desacuerdo, 4 De acuerdo, 5 Totalmente de acuerdo.*

1 2 3 4 5

Totalmente en desacuerdo      Totalmente de acuerdo

**Considero que encender los sensores resulto sencillo.** \*

*Donde 1 es Totalmente en desacuerdo, 2 En desacuerdo, 3 Ni de acuerdo, ni en desacuerdo, 4 De acuerdo, 5 Totalmente de acuerdo.*

1 2 3 4 5

Totalmente en desacuerdo      Totalmente de acuerdo

**Creo que la facilidad de uso del sistema es:** \*

*Donde 1 es muy difícil, 2 difícil, 3 normal, 4 fácil, 5 muy fácil*

1 2 3 4 5

Muy difícil      Muy fácil

**Me siento muy satisfecho con la experiencia general de uso del sistema.** \*

*Donde 1 es Totalmente en desacuerdo, 2 En desacuerdo, 3 Ni de acuerdo, ni en desacuerdo, 4 De acuerdo, 5 Totalmente de acuerdo.*

1 2 3 4 5

Totalmente en desacuerdo      Totalmente de acuerdo

**Para finalizar, ¿cuánto tiempo le llevo ubicar los sensores?** \*

- 2 - 4 minutos  
 5 - 7 minutos  
 8 - 10 minutos  
 Más de 10 minutos

Atrás

Enviar

Borrar formulario

## Anexo 4

### Encuesta de validación del sistema

#### Prueba de experiencia de usuario para carcasas y soportes de un sistema inalámbrico de análisis de movimiento

dgaray37@uan.edu.co [Cambiar de cuenta](#)

Tu correo se registrará cuando envíes este formulario

\* Indica que la pregunta es obligatoria

#### Información Personal

Por favor, llene los campos que se solicitan a continuación.

Nombre \*

Tu respuesta

Nombre \*

Tu respuesta

¿Cuál es su ocupación o profesión? \*

Elige

¿Confirma que está de acuerdo en participar de forma voluntaria en esta encuesta? \*

Sí  
 No

Tiene experiencia previa con sistema de captura de movimiento que usan Unidades de Medida Inercial (IMU)? \*

Sí  
 No

¿Puede ubicar los sensores con éxito? \*

Sí  
 No

¿Cuánto tiempo le llevo ubicar los sensores? \*

2 - 4 minutos  
 5 - 7 minutos  
 8 - 10 minutos  
 Más de 10 minutos

¿Cometió errores durante la ubicación de los sensores? \*

Sí  
 No

#### Sistema de análisis de movimiento

¿Encontró con facilidad como encender el dispositivo? \*

Sí  
 No

¿De 1 a 5 cómo calificaría la facilidad de uso del sistema? \*

Donde 1 es muy difícil, 2 difícil, 3 normal, 4 fácil, 5 muy fácil

Muy difícil                        Muy fácil

¿Qué partes del sistema le resultaron más difíciles o confusas de usar? (Puede elegir varias opciones) \*

La interfaz de usuario  
 El posicionamiento de los sensores  
 La fijación de los sensores  
 La sincronización del sistema  
 Ninguna  
 Otro: \_\_\_\_\_

¿Considera que el sistema actual requiere cambios o mejoras en su diseño? \*

Sí  
 No

**Sistema de análisis de movimiento**

¿Encontró intuitivo el uso del sistema? \*

Sí

No

¿Hubo algún momento en el que se sintió perdido o confundido en el uso del sistema? \*

Sí

No

**Sistema de análisis de movimiento**

¿Le gustaría ver alguna función adicional en el sistema? \*

Procesamiento de variables online

Mayor autonomía de la batería

Interfaz móvil

Otro: \_\_\_\_\_

Del 1 al 5 ¿Qué tan satisfecho se sintió con la experiencia general de uso del sistema? \*

Donde 1 es muy inconforme, 2 inconforme, 3 normal, 4 satisfecho, 5 muy satisfecho

Muy inconforme    1    2    3    4    5    Muy satisfecho

¿Qué aspectos del sistema le resultaron más atractivos o llamativos visualmente? \*

El color

El material

El tamaño

La sincronización

La interfaz de usuario

Otro: \_\_\_\_\_

¿Considera que el sistema es adecuado para usuarios con diferentes niveles de experiencia tecnológica? \*

Sí

No

Explique brevemente su respuesta anterior \*

Tu respuesta \_\_\_\_\_