

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

SEDE VIÑA DEL MAR-JOSE MIGUEL CARRERA

Diseño y desarrollo de un dispositivo ortopédico inteligente para la rehabilitación de rodilla en personas con gonartrosis

Trabajo de Titulación para optar al título de
Ingeniero en fabricación y diseño industrial con
licenciatura en ingeniería en Fabricación y
Diseño Industrial

Alumno: Maura Constanza Castro Vera

Profesor guía: Mario Gonzalez Carvallo



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Diseño y desarrollo de un dispositivo de rehabilitación de rodilla para personas con gonartrosis.

Nombre del candidato(a): Maura Constanza Castro Vera.

Carrera / Grado: Ingeniería en fabricación y diseño industrial.

Campus: Sede Viña del Mar Departamento: Departamento de diseño y manufactura.

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Mario Gonzalez Carvalho, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente DEJO CONSTANCIA que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo NO contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo CONTIENE información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por (marcar una opción):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo): No

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 9 de enero 2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 09.01.2026

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Resumen técnico

Keywords: Gonartrosis – Rehabilitación - Dispositivo médico - Flexión y extensión- Manufactura flexible.

El presente trabajo de título propone el diseño y desarrollo de un dispositivo de rehabilitación para personas con gonartrosis, enfocado en mejorar la movilidad mediante ejercicios seguros y monitoreados. La propuesta considera la morfología humana utilizando tecnologías como manufactura flexible, sensores biomecánicos y módulos de vibración terapéutica. Se busca facilitar el proceso de recuperación desde casa, promoviendo así la autonomía y efectividad del tratamiento.

El contenido se divide en tres capítulos. El primero, denominado "descripción del proyecto", comprende la definición del problema de diseño e ingeniería a abordar, el análisis del mercado y del entorno en que se proyecta la operación del producto, así como el estudio de las soluciones posibles con los movimientos durante el ejercicio con el usuario.

El segundo capítulo, denominado "desarrollo de la propuesta", aborda el proceso metodológico y técnico utilizado para la formulación de la solución proyectada. Incluye el establecimiento de los objetivos del producto, la definición funcional, y la identificación de los requerimientos técnicos, ergonómicos y clínicos (se refiere a las necesidades y exigencias específicas relacionadas con la salud y el cuidado de un paciente, que deben ser cumplidas para asegurar una atención médica adecuada y de calidad) que debe cumplir. Asimismo, se detallan las fases de generación de soluciones y los distintos tipos de rodilla, considerando el uso de tecnologías como la manufactura aditiva y la integración de sensores para monitoreo biomecánico, todo bajo un enfoque centrado en el usuario. En conjunto, esta propuesta busca contribuir significativamente al acceso universal a tratamientos de rehabilitación personalizados, alineando ingeniería, salud y diseño industrial.

El Capítulo 3 presenta el costo total del prototipo, desglosando todos los elementos necesarios para su fabricación. En él se detallan los costos indirectos y directos, la cubicación de materiales, el costo del personal, el uso de maquinaria, el costo de diseño y los valores asociados a los equipos y componentes utilizados. Además, se consideran los gastos de montaje y traslado, así como el porcentaje de utilidad correspondiente al proyecto. En conjunto, este capítulo establece una estimación económica completa que permite justificar la viabilidad del prototipo y sustentar las decisiones técnicas adoptadas durante su desarrollo.

Índice de contenido

Resumen técnico

Introducción	1
CAPÍTULO 1 : DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	2
1.1. Antecedentes generales del proyecto.	3
1.2 Objetivo del proyecto (general y específico).....	3
1.3 Antecedentes cualitativos.....	4
1.4 Análisis PESTEL del entorno del proyecto.....	5
1.5 Tamaño del proyecto	7
1.6 Impacto relacionado con el proyecto	7
1.7 Contexto de desarrollo.....	8
1.8 Análisis del mercado y entorno en que se espera opere este producto	8
1.9 Análisis estratégico: Causa-Problema-Consecuencia	12
1.10 Metodología.....	14
CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE LA PROPUESTA	17
2.1. Definición de objetivo	18
2.2. Detallar la propuesta desde la metodología de diseño para la resolución técnica del problema	19
2.3. Establecimiento de requerimientos y características	20
2.4. Evaluación preliminar de uso del dispositivo.....	20
2.5. Generación de soluciones.....	20
2.6. Propuesta de rutina terapéutica y análisis de integración de vibración como mejora funcional	20
2.7. Lluvia de ideas	22
2.8. Diseño conceptual de alternativas	22
2.9. Selección de alternativas.....	23
2.10. Bocetos	23
2.11. Croquis de componentes	25
2.12. Desarrollo de ingeniería de detalle	27
2.13. Modelación 3d.....	30
.....	30
2.14. Análisis Sistémico	31

2.15.	Análisis funcional	32
2.16.	Modelo caja negra.....	33
2.17.	Desarrollo final de prototipo físico	35
Capítulo 3: Costo del prototipo.....		36
3.1	Fundamentación de la cantidad anual de prototipos	37
3.2	Costo indirecto	38
3.3	Costo directo	39
3.4	Cubicación de materiales	39
3.5	Costo del personal para la fabricación del prototipo	40
3.6	Costo de uso de maquina	41
3.7	Costo de equipos y componentes	42
3.8	Costo de montaje y traslado	42
3.9	Costo de diseño	42
3.10	Costo de porcentaje de utilidades del proyecto.....	43
Conclusión y recomendaciones		45
Bibliografía		46
Anexo 1: Carta Gantt del Proyecto		47
Anexo 2: Datos previos		47
Anexo 3: Costos indirectos		48
Anexo 4: Costos directos.....		48
Anexo 5: Cubicación de materiales		49
Anexo 6: Costo del personal.....		49
Anexo 7: Costo uso de maquina.....		50
Anexo 8: Costo de diseño.....		50
Anexo 9: Costo de porcentaje de utilidad		51

Índice de figuras

Figura 1.1 Ejemplo de rodillera en el mercado	10
Figura 1.2 Ejemplo de rodillera en el mercado	11
Figura 1.3 Ejemplo de rodillera en el mercado	11
Figura 1.4 Ejemplo de rodillera en el mercado	11
Figura 2.1 Propuesta número 1 con pantalla LCD.....	24
Figura 2.2 Propuesta número 2 con conexión bluetooth.....	25
Figura 2.3 Propuesta número 3 combinación de ambas propuestas anteriores.....	25
Figura 2.4 Distribución de componentes en el diseño final	26
Figura 2.5 Plano de conjunto	28
Figura 2.6 Plano de subconjunto superior.....	28
Figura 2.7 Plano de subconjunto inferior.....	29
Figura 2.8 Modelación 3d.....	30
Figura 2.9 Prototipo físico con ensamble completo.....	35

Índice de tablas

Tabla 2.1 Análisis función.....	32
Tabla 3.1 Costos directos	39
Tabla 3.2 Cubicación de materiales	40
Tabla 3.3 Costo de uso de maquina.....	41
Tabla 3.4 Costo porcentaje utilidad del proyecto.....	43

Introducción

La gonartrosis, una enfermedad degenerativa que afecta la articulación de la rodilla, representa una de las principales causas de dolor y discapacidad en la población. En Chile, esta condición ha ido en aumento, lo que ha generado una creciente demanda por soluciones de rehabilitación accesibles, eficaces y adaptadas a las necesidades individuales de los pacientes.

Actualmente, muchas personas enfrentan dificultades para acceder a tratamientos kinesiológicos regulares, ya sea por barreras económicas, geográficas o de movilidad. A esto se suma la limitada efectividad de las rodilleras comerciales, cuyo diseño estandarizado no considera la morfología específica de cada usuario ni integra tecnologías de monitoreo que permitan un seguimiento clínico preciso.

En este contexto, el presente proyecto propone una solución innovadora basada en la personalización de ortesis de rodilla mediante tecnologías como el diseño generativo y sensores biomecánicos. El objetivo es diseñar un dispositivo adaptable, eficiente y tecnológicamente viable para que se pueda desarrollar el ejercicio y de que esta manera se potencie la autonomía del paciente y optimice su proceso de rehabilitación, integrando ingeniería, salud y diseño en una misma propuesta.

CAPÍTULO 1 : DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1. En este capítulo se presentan los antecedentes generales asociados a la rehabilitación de pacientes con gonartrosis, destacando la falta de dispositivos ortopédicos que se adapten a las características morfológicas y necesidades particulares de los usuarios. Se identifican las principales problemáticas relacionadas con la baja adherencia a los tratamientos y la limitada personalización de las rodilleras convencionales disponibles en el mercado. Además, se analiza el entorno mediante la herramienta PESTEL, lo cual permite contextualizar los factores sociales, tecnológicos y económicos que influyen en la viabilidad de este tipo de proyectos. Con ello, se establece la relevancia de abordar la búsqueda de soluciones innovadoras y accesibles que mejoren la calidad de vida de los pacientes afectados por esta condición.

1.1. Antecedentes generales del proyecto.

El proyecto tiene como objetivo diseñar y desarrollar un dispositivo ergonómico para la rehabilitación domiciliar de personas con gonartrosis también facilitando el uso para personas del área de la salud como kinesiólogos para su uso en trabajo, usando sensores para asistir el movimiento de la rodilla. Se basa en el análisis de las necesidades de los pacientes y sus características antropométricas y en el desarrollo de un prototipo funcional personalizado.

Los antecedentes muestran que los pacientes, especialmente adultos mayores, presentan dificultades para realizar ejercicios sin supervisión, lo que afecta su rehabilitación. Además, los dispositivos actuales no se adaptan bien a la anatomía individual ni ofrecen seguimiento en tiempo real. (Ortoweb & Ortoweb, 2020)

El desarrollo se enmarca en un proceso de titulación en la UTFSM, aplicando tecnologías como la manufactura aditiva y sensores inteligentes, promoviendo la rehabilitación accesible y guiada desde el hogar.

En el análisis de mercado, se detecta una brecha importante: las rodilleras actuales son estandarizadas, incómodas y sin monitoreo biomecánico. La propuesta del proyecto se destaca por su personalización anatómica, uso de materiales biocompatibles y la integración de sensores que permiten un seguimiento clínico en tiempo real, ofreciendo ventajas competitivas claras en un entorno tecnológico, social y económico favorable.

1.2 Objetivo del proyecto (general y específico).

Objetivo General:

Diseñar y desarrollar un dispositivo funcional de rehabilitación de rodilla para personas con gonartrosis, basado en el uso de sensores y estimulación por vibración terapéutica.

Objetivos Específicos:

- Investigar las características y necesidades funcionales de pacientes con gonartrosis, enfocándose en los movimientos de flexión y extensión del pie en posición sentada.
- Recopilar y analizar información antropométrica de usuarios potenciales, con el fin de considerar la diversidad física en el diseño ergonómico del dispositivo.
- Diseñar un dispositivo ergonómico y funcional que asista el movimiento de la rodilla mediante el uso de sensores y módulo de vibración, asegurando un movimiento guiado y seguro.
- Seleccionar materiales y tecnologías de manufactura flexible que permitan el diseño y la fabricación para todo tipo de rodilla y de bajo costo del dispositivo.
- Analizar y estimar los costos indirectos asociados al desarrollo del dispositivo, considerando gastos de energía, mantenimiento de equipos, insumos de laboratorio, y otros recursos generales utilizados durante el proceso de diseño y fabricación del prototipo.
- Desarrollar un prototipo funcional que permita validar el diseño propuesto mediante pruebas de usabilidad y eficiencia en el contexto de rehabilitación domiciliaria.

1.3 Antecedentes cualitativos.

Diversos estudios y entrevistas realizadas a pacientes con gonartrosis han evidenciado que la pérdida de movilidad y el dolor constante afectan significativamente su calidad de vida, especialmente en personas mayores. Muchos relatan frustración al no poder realizar actividades cotidianas como caminar, sentarse o levantarse sin asistencia, lo que reduce su autonomía.

A través de entrevistas con kinesiólogos, se identificó que gran parte de los pacientes no realiza correctamente los ejercicios indicados en casa por falta de supervisión, miedo a lesionarse o desconocimiento del movimiento correcto. Además, los profesionales coinciden en la necesidad de contar con dispositivos accesibles, que se adapten a las características físicas de cada persona y que fomenten una rehabilitación guiada.

Asimismo, observaciones en centros de salud revelan que muchos dispositivos actuales de rehabilitación no consideran la morfología del usuario ni su nivel de movilidad, lo que genera desmotivación y baja adherencia al tratamiento (Khosravi et al., 2018). Todo esto refuerza la necesidad de diseñar una solución adaptable y tecnológica que facilite el proceso de recuperación en el hogar.

1.4 Análisis PESTEL del entorno del proyecto

El análisis PESTEL es una herramienta estratégica que permite identificar factores externos que pueden influir en el desarrollo, implementación y sostenibilidad de un proyecto. Esta herramienta evalúa seis dimensiones del entorno: Política, Económica, Social, Tecnológica, Ecológica y Legal. (Scribbr, 2025)

A continuación, se detalla cada uno de estos factores en relación con el proyecto de diseño de un dispositivo ortopédico domiciliario para la rehabilitación de pacientes con gonartrosis (artrosis de rodilla):

1. Político

- El entorno político en Chile se caracteriza por su estabilidad relativa y su apertura a políticas de innovación y desarrollo tecnológico en el área de la salud.
- Programas estatales como CORFO (Corporación de Fomento de la Producción) y FONDEF (Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico) ofrecen financiamiento y apoyo técnico para proyectos de base tecnológica.
- El Ministerio de Salud ha promovido políticas orientadas a la descentralización de la atención médica, lo que implica fomentar el tratamiento en entornos domiciliarios y comunitarios.

Este panorama genera una oportunidad concreta para que el proyecto pueda integrarse como una solución accesible dentro de sistemas públicos o convenios con municipalidades.

2. Económico

- El aspecto económico considera las condiciones que pueden influir en la producción, comercialización y acceso al dispositivo por parte de los usuarios.
- El sistema de salud chileno presenta brechas de acceso, especialmente entre los adultos mayores de bajos recursos, lo cual crea una demanda insatisfecha de soluciones asequibles y efectivas.
- Aunque inicialmente el uso de tecnologías como impresión 3D o sensorización (uso de sensores para recopilar información) puede parecer costoso, el abaratamiento progresivo de estas tecnologías, junto con la posibilidad de fabricación local, permiten reducir significativamente los costos de producción.

El mercado global de dispositivos médicos ortopédicos crece de forma sostenida evidenciando un potencial para escalar y ampliar la distribución del producto.

3. Social

- El factor social hace referencia a los cambios demográficos, hábitos de la población y aspectos culturales que puedan influir en la aceptación del producto.

- La población chilena está envejeciendo: según proyecciones del INE, en 2050 más del 30% de la población será mayor de 60 años. Esto significa que la prevalencia de enfermedades degenerativas como la gonartrosis va en aumento.
- Existe también una tendencia creciente hacia el autocuidado y la autonomía del paciente, lo que refuerza el valor de un dispositivo que se pueda utilizar desde el hogar sin la presencia constante de un profesional.

Además, muchas personas que sufren estas patologías viven solas o en zonas rurales, por lo que la accesibilidad y facilidad de uso del producto resultan fundamentales.

4. Tecnológico

- Este apartado contempla los avances tecnológicos disponibles y su impacto sobre el desarrollo del dispositivo.
- El entorno actual permite utilizar tecnologías como CAD (Diseño Asistido por Computadora), impresión 3D con filamentos biocompatibles y sensores de movimiento, lo que facilita la creación de un dispositivo ergonómico, personalizado y funcional.
- También existen herramientas de desarrollo de hardware libre o de código abierto (open-source), que permiten integrar sensores y microcontroladores sin necesidad de tecnologías patentadas costosas.
- Estas tecnologías, además de accesibles, son escalables, lo que significa que el prototipo puede evolucionar fácilmente hacia una versión más compleja si se requiere en futuras etapas del proyecto.

5. Ecológico

- El impacto ambiental del dispositivo también debe considerarse, tanto desde el punto de vista de la fabricación como de los materiales utilizados.
- La fabricación aditiva, como la impresión 3D, permite minimizar residuos, ya que se utiliza solo el material necesario para construir el producto.
- Se puede optar por materiales reciclables, biodegradables o de bajo impacto ambiental, lo cual no solo contribuye a la sostenibilidad del producto, sino que mejora su aceptación en mercados sensibles al cambio climático.

Este enfoque también se alinea con las políticas públicas y tendencias globales de ecodiseño (diseño orientado a reducir el impacto ambiental durante todo el ciclo de vida del producto).

6. Legal

- Este factor considera las normativas y requisitos legales que el dispositivo debe cumplir antes de su uso o comercialización.
- En Chile, todo dispositivo médico debe ser certificado por el Instituto de Salud Pública (ISP), que evalúa su seguridad, eficacia y calidad.

A nivel internacional, existen normas ISO relevantes, como:

- ISO 13485, que regula los sistemas de gestión de calidad para dispositivos médicos;
- ISO 10993, que exige la evaluación de biocompatibilidad (capacidad de un material para interactuar con el cuerpo humano sin causar daño).

El diseño del dispositivo también deberá considerar las normas de seguridad eléctrica y electromagnética, sobre todo si incluye componentes electrónicos como motores o sensores.

Término técnico: Biocompatibilidad significa que el material no causa rechazo, irritación o daño al entrar en contacto con el cuerpo humano.

1.5 Tamaño del proyecto

El presente proyecto corresponde a un desarrollo de mediana complejidad, ejecutado en el marco del proceso de titulación de la carrera de Ingeniería en Fabricación y Diseño Industrial de la Universidad Técnica Federico Santa María. Su alcance comprende desde la fase de diagnóstico y análisis del problema clínico, hasta el diseño, modelado y construcción de un prototipo funcional de un dispositivo ortopédico personalizado. Considera la integración de tecnologías avanzadas como la manufactura aditiva, sensores biomecánicos y módulos de vibración, lo que exige la coordinación de múltiples áreas de conocimiento, incluyendo diseño industrial, electrónica básica, biomecánica y procesos de fabricación digital. Si bien el dispositivo no ha sido implementado a escala industrial, el trabajo realizado establece una base técnica sólida para su futura validación clínica, producción en pequeña escala y potencial escalamiento comercial, lo que posiciona al proyecto en un nivel técnico-intermedio dentro del desarrollo de tecnologías aplicadas a la salud.

1.6 Impacto relacionado con el proyecto

El desarrollo del dispositivo ortopédico para la rehabilitación de personas con gonartrosis tiene un impacto significativo en diversas dimensiones. En el ámbito social, contribuye a mejorar la calidad de vida de adultos mayores y pacientes con movilidad reducida, permitiéndoles realizar terapias físicas desde el hogar de forma segura, autónoma y personalizada. Desde una perspectiva tecnológica, promueve la integración de herramientas de diseño digital, módulos de vibración, manufactura aditiva y sensorización, facilitando la creación de soluciones innovadoras y accesibles (López & Martínez, 2022). A nivel clínico, el dispositivo ofrece una alternativa complementaria al tratamiento tradicional, mejorando la adherencia al proceso de rehabilitación y permitiendo un seguimiento más preciso mediante el registro de datos biomecánicos en tiempo real. Finalmente, el impacto económico se refleja en la posibilidad de reducir costos asociados a tratamientos prolongados y traslados, beneficiando tanto a usuarios como a instituciones de salud. En conjunto, el proyecto se alinea con objetivos de salud

pública, inclusión tecnológica y sostenibilidad en el diseño de dispositivos médicos. (Organización Mundial de la Salud, 2021).

1.7 Contexto de desarrollo.

En un contexto donde el acceso regular a servicios de kinesiología se ve limitado por barreras económicas, geográficas o de movilidad, se vuelve esencial el desarrollo de dispositivos que permitan a los pacientes realizar ejercicios terapéuticos desde el hogar.

Mediante el uso de tecnologías de manufactura flexible, la integración de sensores biomecánicos y módulos de vibración terapéutica, se desarrolló un dispositivo ergonómico y funcional, orientado a la rehabilitación de personas con gonartrosis. El diseño se enfoca en proporcionar una solución adaptable y centrada en el usuario, capaz de registrar variables articulares relevantes y entregar estimulación localizada para favorecer el confort y la adherencia al tratamiento.

Este proyecto se alinea con la tendencia actual de integrar ingeniería, diseño y salud, fomentando la autonomía del paciente y promoviendo soluciones inclusivas y tecnológicamente viables en el ámbito de la rehabilitación física.

1.8 Análisis del mercado y entorno en que se espera opere este producto

El producto está dirigido principalmente a pacientes con lesiones articulares en la rodilla, tanto en etapas de recuperación como en procesos de rehabilitación prolongada. Asimismo, se considera su aplicación en adultos mayores con problemas osteoarticulares.

Paralelamente, el dispositivo constituye una herramienta de apoyo para kinesiólogos y profesionales de la salud, ya que permite monitorear de forma objetiva y remota la evolución del paciente, optimizando las rutinas de rehabilitación. De este modo, también resulta atractivo para centros médicos, clínicas de rehabilitación y hospitales que requieran soluciones ortopédicas personalizadas y de alta tecnología.

Necesidades Detectadas:

Actualmente, las rodilleras disponibles en el mercado suelen ser de fabricación estandarizada, lo que implica una limitada adaptación a las variaciones morfológicas individuales de los pacientes. Esto genera incomodidad, disminución en la eficacia terapéutica y aumento en los tiempos de rehabilitación. Asimismo, se evidencia la falta de integración de sistemas de monitoreo en tiempo real que permitan evaluar la carga articular durante las actividades diarias o deportivas, dificultando un seguimiento clínico preciso.

Oferta Actual y Brecha de Mercado:

En el mercado actual, existen productos de ortesis de rodilla que ofrecen diferentes niveles de soporte, pero pocos incorporan personalización basada en la anatomía específica de cada usuario. La mayoría de las soluciones disponibles no integran sensores inteligentes para monitoreo biomecánico, y los procesos de diseño y ajuste personalizados son costosos y prolongados. Esta situación revela una brecha significativa para la introducción de rodilleras optimizadas mediante impresión 3D, algoritmos generativos y sistemas de monitoreo en tiempo real.

Ventajas Competitivas del Producto:

El proyecto propone una solución innovadora orientada a la rehabilitación de personas con gonartrosis, mediante el diseño de una rodillera inteligente adaptable basada en datos antropométricos promedio. La incorporación de sensores biomecánicos facilita la medición continua de parámetros articulares como la carga y el ángulo de flexión (A Gutiérrez et al., 2021), mientras que los módulos de vibración terapéutica integrados a la altura de la rodilla contribuyen a mejorar la circulación y reducir el dolor. El uso de materiales biocompatibles con propiedades de rigidez diferenciada asegura un alto nivel de confort y desempeño funcional. Además, la fabricación mediante impresión 3D permite una producción rápida, modular y de bajo costo, adaptable a distintos entornos clínicos o domiciliarios.

Factores del Entorno

- Tecnológico: La constante evolución de la impresión 3D, el diseño generativo mediante inteligencia artificial y el desarrollo de sensores biomecánicos avanzados favorecen la viabilidad técnica del proyecto.
- Económico: La tendencia hacia la medicina personalizada y el crecimiento del mercado de dispositivos médicos representan una oportunidad de expansión, aunque los costos iniciales de implementación tecnológica pueden ser una barrera de entrada.
- Social: El envejecimiento poblacional, el aumento de la práctica deportiva recreativa y competitiva, y la mayor conciencia sobre la rehabilitación física impulsan la demanda de soluciones ortopédicas especializadas.
- Regulatorio: Es necesario considerar las normativas locales e internacionales relacionadas con dispositivos médicos, biocompatibilidad de materiales y certificaciones de calidad que aseguren la validación clínica de los productos desarrollados.

A continuación, se presentan ejemplos representativos de las rodilleras ortopédicas disponibles actualmente en el mercado, con el objetivo de analizar sus características, limitaciones y oportunidades de mejora en relación con las necesidades detectadas en el presente proyecto. (Admin, 2023) (Ver figura 1.1, figura 1.2, figura 1.3, figura 1.4).



<https://www.ortoweb.com/blogortopedia/la-gonartrosis/>

Figura 1.1 Ejemplo de rodillera en el mercado



<https://ortopediainito.com/antiequino-exoesqueleto-2-2-2-2/>

Figura 1.2 Ejemplo de rodillera en el mercado



https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-2669497060-rodillera-oo-unloader-rodilleras-para-dolor-de-rodilla-ost-_JM

Figura 1.3 Ejemplo de rodillera en el mercado



Figura 1.4 Ejemplo de rodillera en el mercado

El análisis de los productos actualmente disponibles en el mercado revela que, si bien algunas rodilleras ofrecen niveles básicos de soporte y confort, persisten deficiencias significativas en cuanto a la adaptación anatómica personalizada, el monitoreo biomecánico en tiempo real y la optimización estructural del diseño. Se identificó que los

precios de venta oscilan entre aproximadamente \$5.000 y \$300.000 pesos chilenos, dependiendo de sus características y marcas, disponibles en diversas plataformas comerciales. En cuanto a los materiales predominantes, destacan el nailon, caucho, poliéster y policloruro de vinilo (PVC), los cuales, a pesar de sus propiedades de flexibilidad y resistencia, presentan desventajas como riesgo de irritaciones cutáneas, reacciones alérgicas, acumulación de humedad que favorece infecciones bacterianas y, en algunos casos, inflamaciones locales por contacto prolongado.

Estas limitaciones refuerzan la necesidad de desarrollar una solución innovadora que integre tecnologías avanzadas de diseño generativo, manufactura aditiva personalizada y sensorización integrada, empleando materiales biocompatibles que aseguren un alto nivel de confort, seguridad y eficacia terapéutica.

En particular, el monitoreo biomecánico se propone mediante la integración de sensores de presión y acelerómetros estratégicamente ubicados en la rodillera. Estos sensores permitirán registrar variables clave como la distribución de carga articular, ángulos de flexión-extensión de la rodilla y patrones de movimiento durante la actividad física. Los datos obtenidos serán transmitidos en tiempo real a una interfaz digital, accesible por el paciente y el profesional de salud, permitiendo así un seguimiento clínico continuo, ajustes personalizados en el tratamiento y una mejora sustancial en la adherencia a la rehabilitación.

1.9 Análisis estratégico: Causa-Problema-Consecuencia

El presente análisis estratégico tiene como propósito identificar de forma estructurada las principales condiciones que motivan el desarrollo del dispositivo de rehabilitación de rodilla para personas con gonartrosis. Para ello, se aplica una lógica de evaluación basada en tres componentes interrelacionados: la causa que origina la situación problemática, el problema en sí mismo que afecta al usuario final, y las consecuencias derivadas de la falta de solución oportuna. Esta metodología permite comprender la necesidad de intervención tecnológica desde una perspectiva integral.

1. Causa

En el contexto actual del mercado nacional e internacional de dispositivos ortopédicos, la oferta predominante se basa en productos de fabricación estandarizada. Las rodilleras y ortesis disponibles no consideran adecuadamente las variaciones morfológicas individuales de los pacientes ni integran tecnologías que permitan monitoreo biomecánico en tiempo real. Esto se traduce en productos que, si bien pueden ofrecer soporte básico, resultan incómodos, poco eficaces para procesos de rehabilitación complejos y con escasa capacidad de adaptación a necesidades clínicas específicas.

A lo anterior se suma la existencia de barreras económicas, geográficas y logísticas que dificultan el acceso sostenido a tratamientos de kinesiología presencial, especialmente en

el caso de adultos mayores o personas con movilidad reducida. Este grupo de usuarios representa el segmento más afectado por enfermedades degenerativas como la gonartrosis, y también es el que enfrenta mayores dificultades para realizar ejercicios de rehabilitación en su entorno domiciliario sin supervisión profesional.

Desde un punto de vista tecnológico, la subutilización de herramientas como la impresión aditiva y los sensores biomédicos ha limitado el desarrollo de soluciones ortopédicas funcionales e inteligentes, a pesar de su creciente disponibilidad y accesibilidad en el mercado actual.

2. Problema

La conjunción de estas causas genera un problema central: los pacientes con gonartrosis carecen de dispositivos ergonómicos y tecnológicos que les permitan realizar ejercicios terapéuticos de forma autónoma, segura y efectiva en su propio hogar.

Esto se traduce en una baja adherencia al tratamiento, ya que los usuarios enfrentan dificultades para ejecutar correctamente los movimientos de flexión y extensión indicados por los profesionales de la salud. Según entrevistas realizadas en el marco del presente proyecto, muchos pacientes manifiestan inseguridad, miedo a lesionarse o desconocimiento técnico, lo que conlleva a una ejecución incorrecta de los ejercicios, disminuyendo el beneficio terapéutico esperado.

Adicionalmente, la ausencia de sistemas de seguimiento clínico remoto impide a los profesionales obtener datos objetivos y continuos sobre el progreso del paciente, limitando la posibilidad de realizar ajustes personalizados al tratamiento o detectar señales de alerta de forma temprana.

3. Consecuencia

La consecuencia directa de este problema es el prolongamiento del proceso de recuperación y, en muchos casos, la pérdida progresiva de autonomía funcional del paciente. Esto se traduce en una menor calidad de vida, mayor dependencia de cuidadores o familiares, y en un incremento de los costos asociados al tratamiento y seguimiento clínico a largo plazo.

Desde el punto de vista del diseño de soluciones tecnológicas, esta situación refleja una oportunidad no aprovechada, el mercado aún no ha adoptado ampliamente dispositivos ortopédicos personalizados y con sensorización integrada, a pesar del potencial que ofrecen para mejorar significativamente los resultados clínicos y la experiencia del usuario.

Además, esta brecha tecnológica limita la competitividad de los desarrollos nacionales frente a soluciones importadas, y reduce la posibilidad de implementar modelos de producción flexible y descentralizada mediante impresión 3D en centros de salud locales.

1.10 Metodología

Definición de situación sin proyecto

En este contexto, se identificó una problemática vinculada al uso de rodilleras ortopédicas convencionales, especialmente en personas con gonartrosis. A partir de observaciones directas y entrevistas con usuarios, se constató que estos dispositivos presentan limitaciones significativas en cuanto a su capacidad de adaptación al cuerpo del usuario, comodidad de uso prolongado y asistencia efectiva en la rehabilitación. Las rodilleras actuales suelen ser rígidas, de talla estándar, y no contemplan variables antropométricas individuales ni retroalimentación funcional. Además, carecen de mecanismos que guíen o monitoreen los ejercicios de recuperación, lo cual incide negativamente en la adherencia al tratamiento y en los resultados clínicos. Esta situación evidencia la necesidad de desarrollar una solución técnica más personalizada, funcional y con capacidades activas de asistencia al movimiento y evaluación del progreso terapéutico.

Definición de situación con proyecto

El presente proyecto adopta un enfoque de diseño centrado en el usuario, complementado con un proceso de iteración continua inspirado en la metodología de Bruno Munari, reconocido por integrar de forma lógica y creativa la resolución de problemas en el ámbito del diseño industrial. Esta metodología resulta especialmente adecuada para el desarrollo de un dispositivo ortopédico inteligente orientado a personas con gonartrosis, ya que permite estructurar el proceso desde la identificación del problema hasta la validación de soluciones viables. Gracias a esta lógica iterativa, se logra integrar de manera coherente la manufactura aditiva, la sensorización biomecánica y los módulos de vibración, garantizando que el dispositivo sea funcional, adaptable y centrado en las necesidades reales del usuario.

Las etapas desarrolladas en el marco de este proyecto son las siguientes:

1. Identificación del problema:

Se realizó un diagnóstico del contexto mediante entrevistas semiestructuradas a pacientes con gonartrosis y a profesionales del área de la kinesiología, junto con una revisión bibliográfica y un análisis del mercado actual de dispositivos ortopédicos. Esta investigación permitió detectar deficiencias en las rodilleras convencionales, tales como la falta de adaptabilidad anatómica, ausencia de monitoreo activo y baja adherencia al tratamiento en entornos domiciliarios. La necesidad de una solución personalizada, ergonómica y tecnológicamente asistida fue evidenciada a partir de estos hallazgos.

2. Definición de objetivos y especificaciones:

A partir del diagnóstico, se formularon los objetivos generales y específicos del proyecto, estableciendo como prioridad el desarrollo de un dispositivo capaz de asistir el

movimiento de la rodilla, registrar variables biomecánicas y proporcionar confort y seguridad al usuario. Se definieron requerimientos funcionales, técnicos y clínicos, considerando aspectos como facilidad de uso, bajo costo relativo, posibilidad de personalización y monitoreo en tiempo real.

3.Recolección de datos y documentación:

Con el fin de diseñar un dispositivo ajustado a la morfología real del usuario, se recopilieron datos antropométricos de referencia provenientes de estudios clínicos y bases de datos biomédicas, lo que permitió modelar con suficiente precisión la geometría funcional de la rodilla y establecer una base digital confiable para el desarrollo del producto. Este paso responde al principio de “conocer a fondo el problema antes de diseñar una solución”.

4. Generación de ideas y desarrollo conceptual

Se exploraron distintas configuraciones posibles del dispositivo, generando esquemas funcionales y propuestas conceptuales mediante bocetos y modelado tridimensional. Se incorporó un microcontrolador junto a un potenciómetro para la medición de ángulos de amplitud, permitiendo registrar y enviar estos datos a una aplicación desarrollada para su monitoreo. Estas soluciones se desarrollaron en un programa llamado TinkerCad permitiendo su simulación y se evaluaron digitalmente en cuanto a su viabilidad estructural y funcional.

5. Prototipado funcional

Con base en el diseño conceptual más prometedor, se procedió a la fabricación de un prototipo funcional utilizando tecnologías de manufactura aditiva (impresión 3D). Se integraron módulos de vibración en los costados de la rodilla, con el objetivo de activar los receptores propioceptivos y cutáneos, generando una sensación de alivio local, bajo las piezas de impresión 3d va una capa de aproximadamente 3mm del primer material usado la cual es goma EVA (Etilvinilacetato) que es amigable con la piel y para el prototipado final se requiere usar una espuma llamada neopreno el cual es usado en implementos kinesiológicos para dar soporte y evitar la transpirabilidad para dar un mayor confort al usuario.

Estos módulos generan estímulos vibratorios que activan los músculos y mejoran la propiocepción, contribuyendo a una rehabilitación más eficiente (WibroterapiaPro, 2023). Además, se incorporaron sensores electrónicos en ubicaciones estratégicas para monitorear el rango de movimiento. Se realizaron pruebas preliminares de funcionamiento en condiciones simuladas, permitiendo evaluar aspectos como la ergonomía, resistencia mecánica y facilidad de montaje.

6. Evaluación técnica y validación

El prototipo será sometido a pruebas de ajuste, confort y funcionamiento, mediante la ejecución de rutinas de rehabilitación simuladas. Se registrarán datos de ángulo, carga y respuesta estructural. Estos resultados serán utilizados para verificar el cumplimiento de los objetivos establecidos y retroalimentar el proceso de diseño.

7. Iteración y mejora

A partir de la futura etapa de validación, se espera refinar aspectos clave del diseño, como la posición y protección de los sensores, así como la selección de materiales. Esta retroalimentación permitirá mejoras continuas en el prototipo, respondiendo directamente a la visión iterativa del método de Munari, en la cual la solución se perfecciona en función de su desempeño y de la experiencia del usuario final.

La aplicación del método de Bruno Munari en este proyecto permitirá estructurar el desarrollo del dispositivo de forma lógica, centrada en el usuario y sustentada en evidencia clínica, tecnológica y de diseño. Esta metodología facilitará la identificación precisa del problema, la generación de soluciones viables, su validación funcional en fases posteriores y la mejora progresiva del producto, asegurando una propuesta coherente con los principios de la innovación aplicada al bienestar humano.

Para una visualización detallada de la planificación temporal del proyecto, véase el **Anexo 1: Carta Gantt del Proyecto**.

CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE LA PROPUESTA

2. Este proyecto propone el diseño de una rodillera ortopédica inteligente para personas con gonartrosis, integrando sensores de monitoreo biomecánico, módulos de vibración terapéutica y un sistema de ajuste adaptable. Utilizando una metodología centrada en el usuario, se desarrollaron tres propuestas iniciales que guiaron el diseño funcional y estructural del prototipo, fabricable mediante impresión 3D y orientado a su uso domiciliario.

2.1. Definición de objetivo

El objetivo metodológico principal de esta propuesta es desarrollar un dispositivo ortopédico funcional y personalizado para la articulación de la rodilla, aplicando una metodología de diseño centrada en el usuario que permita resolver la problemática de falta de adaptación, monitoreo biomecánico y eficacia terapéutica presente en las rodilleras convencionales del mercado.

Esta definición de objetivo guiará el proceso técnico desde la identificación precisa de las necesidades del usuario hasta la materialización del producto, utilizando herramientas de diseño digital, tecnologías de fabricación aditiva y sistemas de sensorización integrados.

Para alcanzar este objetivo, se aplicará una metodología de diseño iterativa basada en el enfoque de Bruno Munari (Staggl, 2024), que considera el diseño como un proceso lógico, creativo y progresivo para la resolución de problemas. Esta metodología incluirá:

- La identificación del problema a partir de observaciones directas y entrevistas con usuarios y profesionales de la salud.
- La recolección y análisis de datos antropométricos del usuario objetivo.
- La definición de objetivos y requisitos funcionales del dispositivo.
- El desarrollo de ideas y esquemas iniciales que den solución al problema detectado.
- El desarrollo de prototipos virtuales y físicos mediante tecnologías de diseño generativo.

- La evaluación funcional del dispositivo mediante simulaciones digitales y pruebas controladas.
- La validación de la solución a través de pruebas de confort, eficacia mecánica y lectura de datos sensorizados.

Este enfoque permitirá iterar y ajustar el diseño de forma continua, garantizando una solución técnica viable, centrada en el usuario y con potencial de impacto clínico y social.

2.2. Detallar la propuesta desde la metodología de diseño para la resolución técnica del problema

Establecimiento de objetivos del producto

El objetivo general de este proyecto es desarrollar una rodillera ortopédica personalizada que proporcione soporte terapéutico efectivo a pacientes con lesiones articulares, particularmente aquellos afectados por gonartrosis, mediante el uso de tecnologías avanzadas que permitan su fabricación personalizada y monitoreo biomecánico en tiempo real. Esta solución busca optimizar los procesos de rehabilitación, mejorar la adherencia al tratamiento y aumentar la autonomía de los usuarios, especialmente en contextos donde el acceso a atención kinésica presencial es limitado.

Los objetivos específicos del producto son:

- Lograr una adaptación anatómica flexible mediante un sistema de ajuste con cinturones o correas ajustables, similares a los seguros de cascos de seguridad, que permiten ampliar o reducir el ancho alrededor de la rodilla sin limitar el movimiento natural del usuario.
- Integrar sensores que permitan monitorear en tiempo real parámetros como la carga articular y el rango de movimiento.
- Utilizar materiales biocompatibles que eviten reacciones adversas, garantizando confort y seguridad.
- Reducir los tiempos y costos de producción a través de procesos de manufactura aditiva.
- Diseñar un producto ligero, funcional y fácil de utilizar por parte del paciente en su hogar.

Definición funcional

La propuesta contempla como función principal el brindar soporte ortopédico y estabilidad a la articulación de la rodilla durante actividades cotidianas y sesiones de rehabilitación.

Funciones secundarias:

- Adaptarse de forma precisa a la anatomía del usuario.
- Registrar datos biomecánicos (carga articular, ángulos de flexión-extensión) durante el uso.
- Enviar la información recopilada a una interfaz digital accesible para el usuario o el profesional de salud.
- Garantizar un uso prolongado sin generar incomodidad, gracias a su diseño ergonómico y transpirable.
- Facilitar su colocación y ajuste sin asistencia técnica especializada.

2.3. Establecimiento de requerimientos y características

Como parte del desarrollo del proyecto, se han definido los requerimientos fundamentales que debe cumplir el dispositivo, considerando criterios técnicos, ergonómicos y clínicos. Entre ellos destacan la necesidad de una adaptación anatómica personalizada mediante un sistema ajustable con cinturones o correas que permitan un ajuste flexible y cómodo a la rodilla, el uso de materiales biocompatibles para mayor seguridad y confort, la integración de sensores para el monitoreo biomecánico en tiempo real, y la facilidad de uso en el entorno domiciliario. Además, se contempla el uso de manufactura aditiva para optimizar tiempos y costos de producción.

2.4. Evaluación preliminar de uso del dispositivo

Con el objetivo de evaluar el comportamiento preliminar del dispositivo, se realizaron pruebas de usabilidad exploratorias con un grupo de 15 personas, orientadas a analizar aspectos de confort, ajuste, estabilidad y percepción de seguridad durante el uso del prototipo. Estas pruebas se desarrollaron en un contexto controlado y no clínico, permitiendo identificar observaciones relevantes para el diseño sin pretender establecer conclusiones terapéuticas. La información obtenida fue utilizada para realizar ajustes menores en el diseño y confirmar la viabilidad funcional del dispositivo en condiciones reales de uso.

2.5. Generación de soluciones

Actualmente, el proyecto se encuentra en etapa de análisis y definición de lineamientos para la futura generación de soluciones. A partir de los requerimientos establecidos, se está preparando el desarrollo de propuestas de diseño que respondan a las necesidades identificadas. Se prevé la aplicación de una metodología iterativa centrada en el usuario, que incluirá la exploración de alternativas, diseño virtual y posterior validación a través de prototipos.

2.6. Propuesta de rutina terapéutica y análisis de integración de vibración como mejora funcional

Como complemento al diseño estructural y funcional del dispositivo de rehabilitación de rodilla, se propone una rutina terapéutica específica que el sistema podrá ejecutar de

forma automatizada, así como la integración de una unidad de vibración localizada con fines terapéuticos. Estas funciones tienen como objetivo potenciar los beneficios clínicos del tratamiento, mejorar la adherencia del usuario, disminuir el dolor articular y estimular el sistema neuromuscular de manera segura y controlada.

La rutina de ejercicios sugerida ha sido diseñada considerando principios de rehabilitación en patologías articulares degenerativas como la gonartrosis. El dispositivo permitirá la ejecución asistida de movimientos de flexión y extensión de la rodilla en posición sentada, a través de la acción de servomotores que operarán con velocidad y rango programables. La fase activa de la rutina contempla tres tipos de ejercicios principales: flexión-extensión asistida, contracciones isométricas controladas y movilidad pasiva continua. La primera corresponde a movimientos guiados entre los 90° y 120° de flexión, realizados de manera lenta y progresiva con pausa entre repeticiones, buscando mantener la movilidad articular sin dolor. La segunda consiste en generar una leve resistencia en el ángulo de 90°, sin desplazamiento, para estimular la musculatura sin forzar la articulación, ideal para usuarios con dolor o debilidad. La tercera, de carácter pasivo, ejecuta ciclos completos automatizados sin requerir esfuerzo por parte del usuario, recomendada para momentos de fatiga o etapas iniciales de recuperación.

Cada sesión podrá tener una duración estimada de 15 a 20 minutos, y se recomienda realizarla entre dos y tres veces al día, según la evaluación clínica. El sistema integrará sensores de ángulo, carga articular y acelerómetros que permitirán registrar las variables biomecánicas más relevantes, como la amplitud de movimiento, el esfuerzo realizado y la regularidad de la ejecución. Los datos recopilados serán enviados a una interfaz digital accesible para el profesional de salud o el usuario, facilitando un monitoreo continuo, retroalimentación del desempeño y ajuste personalizado de los parámetros terapéuticos.

Adicionalmente, se plantea la incorporación de un sistema de vibración localizada como mejora funcional complementaria. Esta propuesta se fundamenta en la evidencia clínica que respalda el uso de vibración de baja frecuencia en procesos de rehabilitación musculoesquelética, especialmente en pacientes con dolor, rigidez o pérdida de fuerza muscular. Los beneficios asociados incluyen la reducción del dolor mediante la activación de mecanorreceptores cutáneos, así como la estimulación de la propiocepción a través de los receptores cutáneos y articulares, generando una sensación de alivio local y una mayor percepción de la articulación.

La implementación técnica de esta función considera la integración de un motor vibrador tipo “coin” o ERM (eccentric rotating mass), encapsulado en material blando y ubicado en zonas estratégicas de la rodillera como el costado externo o el área posterior del muslo, evitando contacto directo con estructuras óseas. El sistema operará en un rango de frecuencia de 20 a 50 Hz, lo cual se encuentra dentro del umbral terapéutico utilizado en dispositivos médicos de vibración. El tiempo de aplicación será de entre 8 y 10 minutos por sesión, ya sea como complemento previo o posterior a los ejercicios activos. Su activación podrá ser automática mediante programación o manual mediante interfaz de

usuario, con control de intensidad y tiempo a través del mismo microcontrolador que gestiona el movimiento.

La integración de la vibración no solo aporta un beneficio clínico adicional, sino que también incrementa el valor tecnológico del dispositivo, diferenciándolo de las soluciones actuales en el mercado. Esta característica podrá ser incluida en futuras versiones del prototipo sin alterar significativamente la arquitectura base del diseño, ya que el enfoque modular y el uso de manufactura aditiva permiten modificaciones ágiles y adaptaciones específicas.

En síntesis, la incorporación de una rutina terapéutica automatizada y de vibración localizada refuerza el carácter integral e innovador del proyecto, al responder no solo a la necesidad de movimiento articular asistido, sino también al alivio sintomático, el fortalecimiento muscular y la mejora en la experiencia de uso del paciente. Estas funciones complementarias permitirán desarrollar un dispositivo más completo, versátil y con mayor impacto clínico en la rehabilitación domiciliaria de personas con gonartrosis.

2.7. Lluvia de ideas

Durante la etapa inicial del proceso de diseño se realizó una lluvia de ideas con el objetivo de generar múltiples enfoques funcionales para una rodillera ortopédica inteligente orientada a la rehabilitación de personas con gonartrosis. Esta actividad permitió explorar diferentes posibilidades técnicas en torno a la integración de módulos de vibración para estimulación terapéutica, sensores para monitoreo biomecánico en tiempo real, y sistemas de ajuste adaptables que no interfieran con el movimiento natural de la articulación. La diversidad de ideas generadas sirvió como base para definir los lineamientos del diseño conceptual, priorizando la viabilidad técnica, la comodidad del usuario y la capacidad del dispositivo para operar en contextos domiciliarios con autonomía y eficacia clínica.

2.8. Diseño conceptual de alternativas

A partir de los bocetos iniciales desarrollados en la etapa de ideación, se definieron tres alternativas de diseño conceptual para la rodillera ortopédica inteligente. Cada propuesta exploró una disposición distinta de los componentes clave: sensores de ángulo, módulos de vibración terapéutica y sistema de comunicación Bluetooth.

La primera alternativa integraba una pantalla LCD en el propio dispositivo, lo que facilitaba la visualización directa de los datos por parte del usuario, pero incrementaba el volumen general del diseño. La segunda propuesta reemplazó la pantalla por un módulo Bluetooth, optimizando el tamaño del dispositivo y permitiendo el envío de datos a una aplicación externa. La tercera correspondió a una versión estructural alternativa basada en la segunda, con ajustes estéticos y ergonómicos en la distribución de los componentes.

Estas alternativas fueron evaluadas según criterios de ergonomía, viabilidad técnica, facilidad de fabricación y experiencia de uso. A partir de este análisis, se seleccionó una

versión que prioriza el monitoreo digital mediante conectividad Bluetooth, manteniendo la ligereza estructural, la comodidad del usuario y el potencial de ampliación futura.

2.9. Selección de alternativas

Para definir la alternativa de diseño más adecuada, se aplicaron criterios de evaluación relacionados con la ergonomía, viabilidad técnica, integración de componentes, facilidad de uso y posibilidad de fabricación mediante tecnologías aditivas. Las tres propuestas iniciales fueron comparadas en función de estos parámetros.

La primera propuesta contemplaba una estructura sólida con pantalla LCD integrada, lo que ofrecía una visualización directa de los datos, pero presentaba desafíos en términos de volumen, consumo energético y complejidad electrónica. La segunda alternativa reemplazaba la pantalla por un módulo Bluetooth, lo que permitía una solución más compacta y funcional, facilitando la conexión con una aplicación externa para el monitoreo de datos. La tercera opción correspondía a una variante estructural de la segunda, con un rediseño exterior más estético y anatómicamente adaptable.

Tras el análisis, se optó por avanzar con la primera alternativa como base estructural. Sin embargo, para mejorar el procesamiento de datos y la conectividad, se reemplazó la pantalla LCD por un módulo ESP32, un microcontrolador potente y eficiente. Este módulo fue seleccionado específicamente porque permite procesar directamente los datos capturados por el potenciómetro y, gracias a su conectividad Wi-Fi integrada, facilita la visualización y gestión remota a través de una aplicación móvil. Adicionalmente, se incorporaron aspectos formales de la tercera propuesta para optimizar la comodidad del usuario y el ajuste anatómico del dispositivo.

La elección final del diseño se basó en un análisis cualitativo centrado en la viabilidad técnica y funcional de cada propuesta. Se consideraron criterios como la facilidad de fabricación mediante impresión 3D, la estabilidad estructural, la comodidad del usuario y la integración potencial de módulos electrónicos. Bajo estos lineamientos, la alternativa seleccionada fue la que mejor equilibró simplicidad constructiva con cumplimiento funcional.

2.10. Bocetos

Para abordar las necesidades específicas del dispositivo ortopédico, se desarrollaron tres propuestas conceptuales que buscan optimizar la funcionalidad y la experiencia del usuario. Estas ideas fueron representadas mediante tres bocetos principales: la primera propuesta incluye una pantalla LCD integrada junto a los módulos de vibración ubicados a los costados de la rodilla y un sensor de ángulo dispuesto en la parte superior (ver Figura 2.1). La segunda propuesta elimina la pantalla y en su lugar incorpora un módulo Bluetooth, el cual se vincula con una aplicación móvil para facilitar el seguimiento del ejercicio, manteniendo los sensores de ángulo y vibración (ver Figura 2.2). La tercera

propuesta corresponde a una variación estructural de la segunda, con un diseño exterior distinto, pero con los mismos elementos funcionales (ver Figura 2.3).

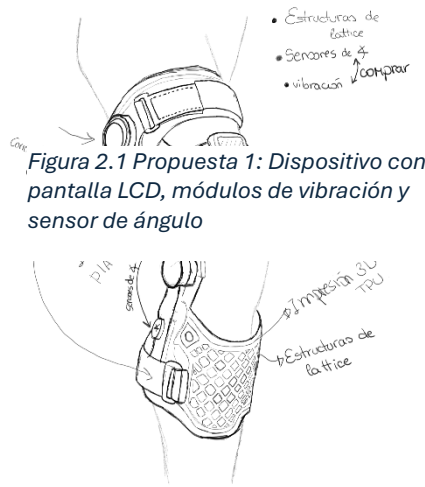
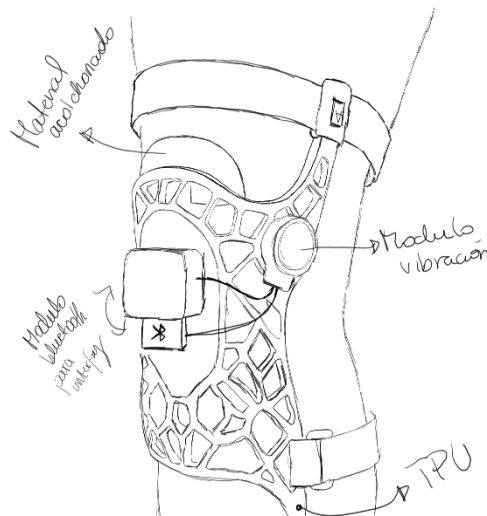
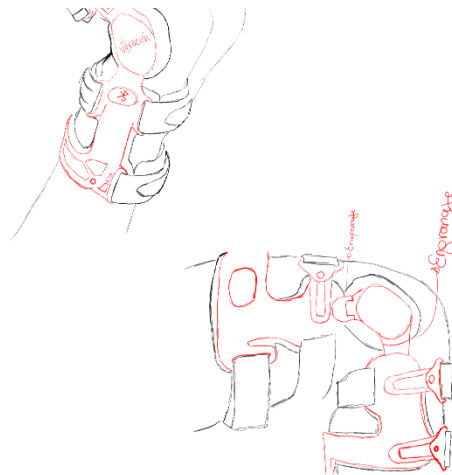
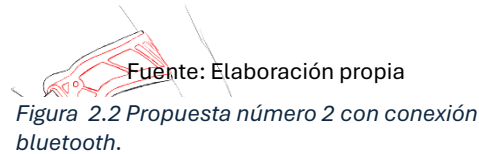


Figura 2.1 Propuesta 1: Dispositivo con pantalla LCD, módulos de vibración y sensor de ángulo

Fuente: Elaboración propia

Figura 2.1 Propuesta número 1 con pantalla LCD





2.11. Croquis de componentes

En esta fase se estableció la configuración final del diseño, detallando la disposición funcional de los componentes del dispositivo ortopédico. La estructura principal está fabricada mediante impresión 3D en PLA con un grosor de 2 mm, lo que permite obtener la flexibilidad necesaria para adaptarse al movimiento del usuario. Se integran zonas acolchadas para aumentar el confort durante su uso prolongado. Los sensores de ángulo se ubican a los costados de la articulación, permitiendo un monitoreo preciso del movimiento de la rodilla. El microcontrolador ESP32, con su sistema de comunicación WiFi, se ubica en la parte frontal dentro de una carcasa integrada, permitiendo la transmisión de datos hacia la aplicación desarrollada para el monitoreo. El sistema se

sujeta mediante correas y un tramo elástico, proporcionando mayor estabilidad y un ajuste ergonómico.

Figura 2.4 . Distribución de componentes en el diseño final del dispositivo ortopédico. Se observa la disposición de los sensores de ángulo, módulos de vibración y módulo Bluetooth, integrados en una estructura impresa en 3D con geometría lattice. El diseño incorpora zonas acolchadas para mayor confort y una correa tipo arnés para una sujeción segura.

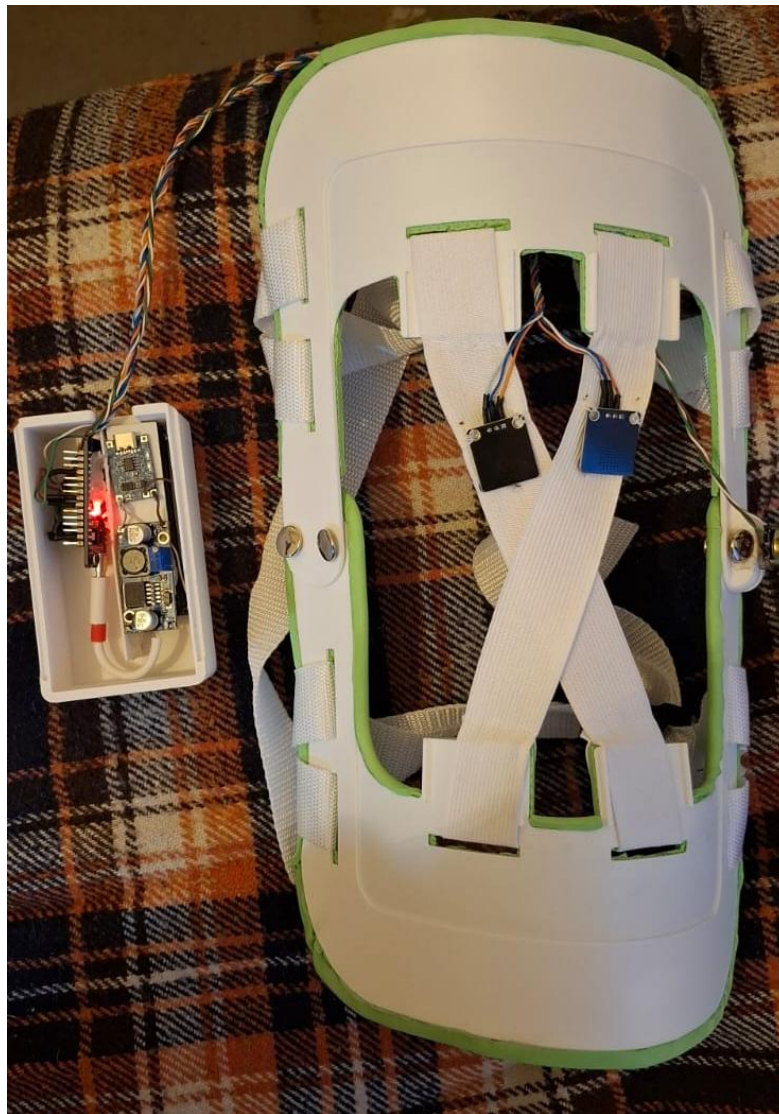
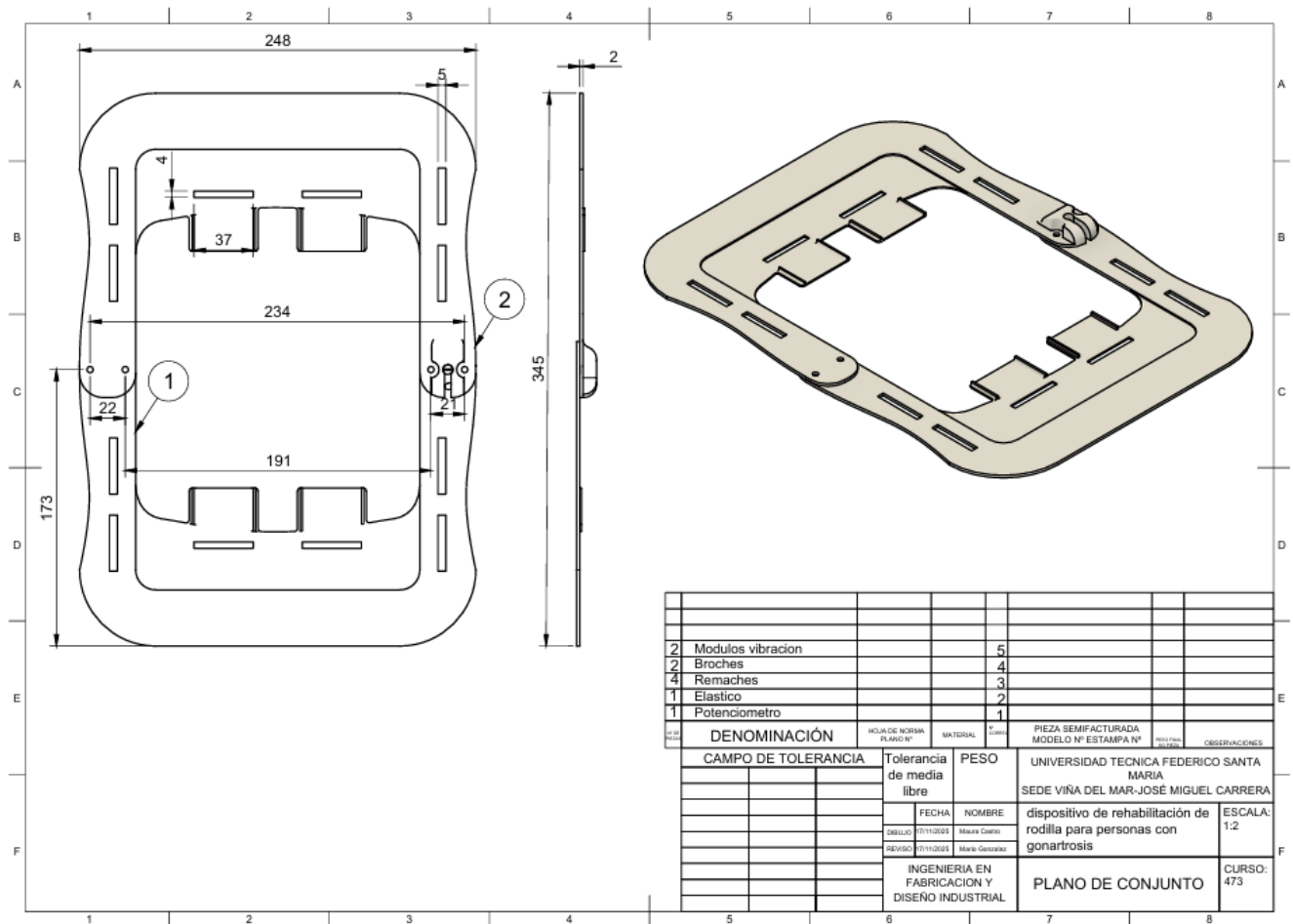


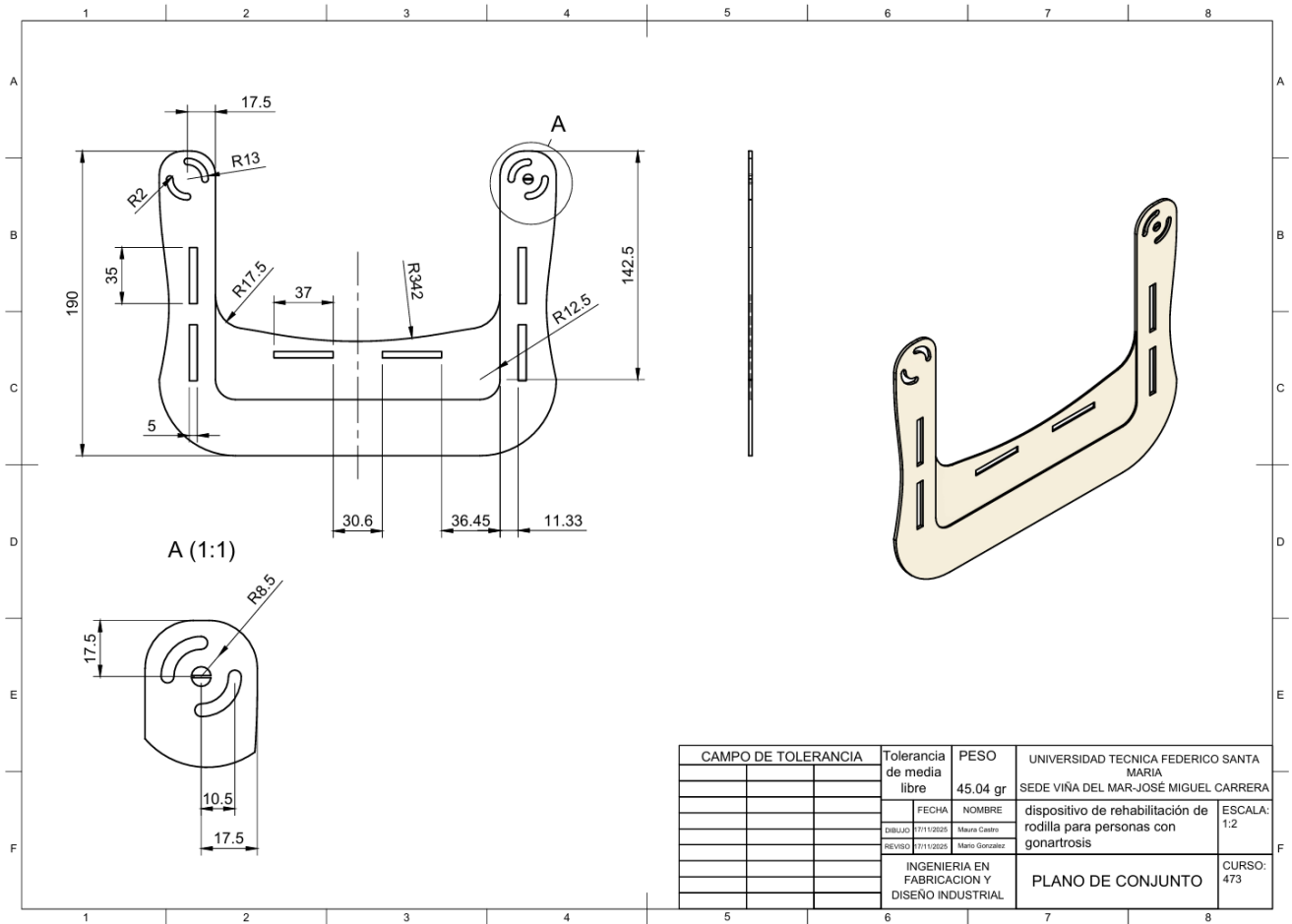
Figura 2.4 Distribución de componentes en el diseño final

2.12. Desarrollo de ingeniería de detalle



Fuente: Elaboración propia

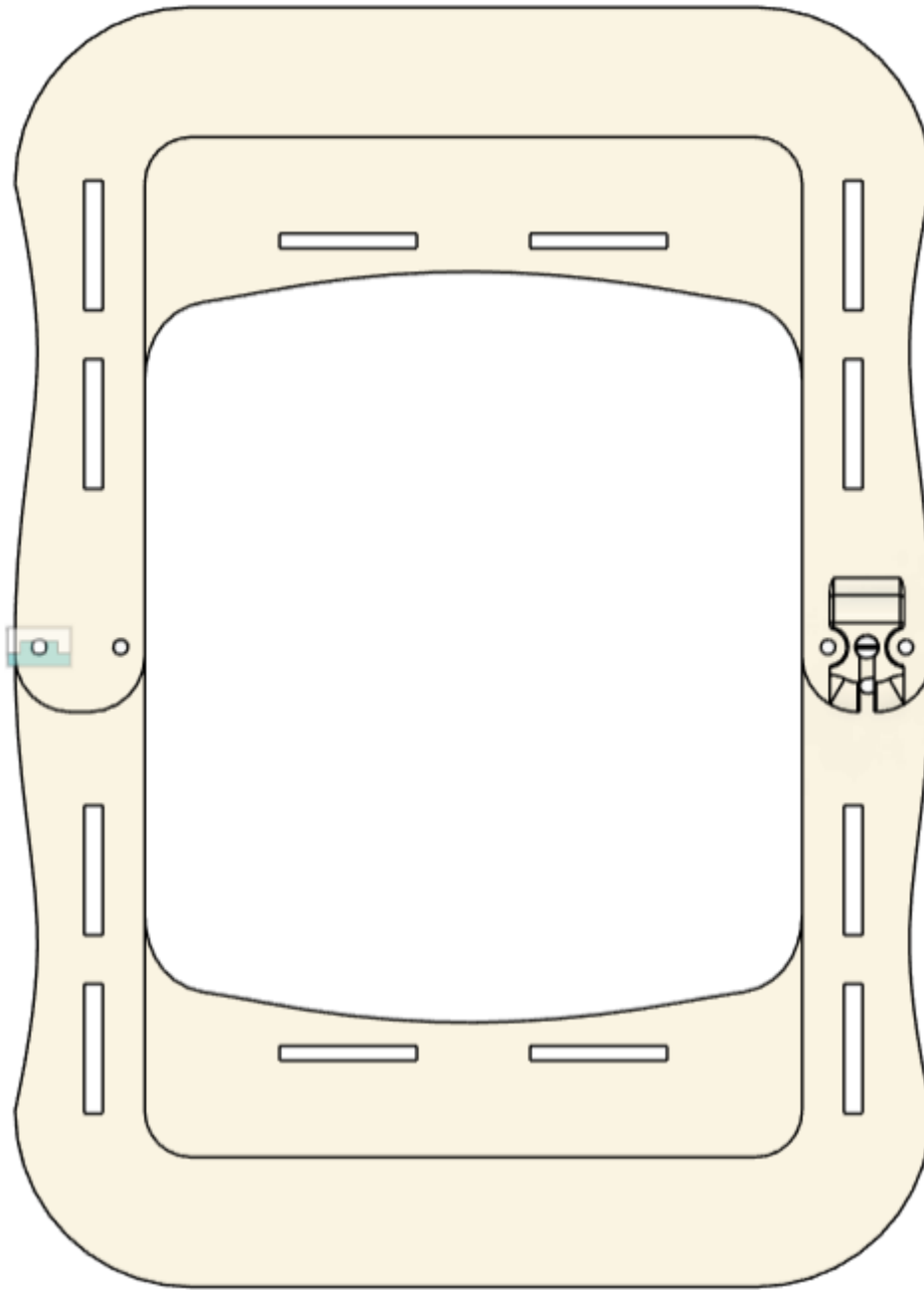
Figura 2.5 Plano de conjunto



Fuente: Elaboración propia

Figura 2.6 Plano de subconjunto superior

2.13. Modelación 3d



Fuente: Elaboración propia

Figura 2.8 Modelación 3d

2.14. Análisis Sistémico

El dispositivo de rehabilitación de rodilla para personas con gonartrosis es analizado como un sistema abierto que interactúa constantemente con su entorno clínico, social, tecnológico y económico. Desde una perspectiva sistémica, el proyecto integra diversos elementos interrelacionados que permiten cumplir una función global: asistir y monitorear el movimiento articular de la rodilla durante procesos de rehabilitación domiciliaria, promoviendo la recuperación funcional del usuario.

El sistema se compone de entradas (inputs), procesos internos, salidas (outputs) y mecanismos de retroalimentación que permiten ajustar su funcionamiento de acuerdo con las necesidades del paciente. Dentro de las entradas, se consideran los datos antropométricos de los usuarios, las necesidades terapéuticas relacionadas con los movimientos de flexión y extensión articular, el nivel de dolor o rigidez muscular, así como los recursos tecnológicos disponibles, entre ellos sensores biomecánicos, módulos de vibración, microcontroladores (como el ESP32), materiales biocompatibles y tecnologías de manufactura aditiva.

El proceso interno del sistema corresponde al funcionamiento integral del dispositivo, que implica la sujeción ergonómica a la extremidad, la asistencia al movimiento articular mediante vibración terapéutica, la captación y medición de los ángulos de movilidad a través de sensores, y la conversión de estos datos en información útil para el usuario o un profesional de la salud, a través de una pantalla integrada o mediante conectividad Bluetooth hacia una plataforma externa.

En cuanto a las salidas, el sistema genera asistencia mecánica y sensorial para favorecer la movilidad controlada de la rodilla, reduce la rigidez mediante vibración localizada, proporciona datos cuantificables del progreso del usuario y fomenta la adherencia al tratamiento de rehabilitación, especialmente en contextos domiciliarios.

La retroalimentación se produce a través de la respuesta fisiológica del paciente (nivel de dolor, rango de movimiento alcanzado y comodidad durante el uso), así como mediante los datos obtenidos por los sensores, los cuales permiten realizar ajustes en la rutina terapéutica, la intensidad de vibración, la ergonomía del dispositivo o su configuración electrónica. Este proceso iterativo también se emplea en el rediseño del prototipo durante las etapas de validación.

El sistema opera en un entorno multidimensional donde intervienen factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales (PESTEL). Entre estos, destacan el envejecimiento poblacional y el aumento de la demanda por soluciones de rehabilitación domiciliaria (factor social), la disponibilidad de tecnologías de bajo costo como la impresión 3D (factor tecnológico), el acceso a fondos de innovación en salud (factor político-económico), y la necesidad de cumplir con normativas médicas y estándares clínicos (factor legal).

En conclusión, el análisis sistémico permite comprender este dispositivo como un conjunto organizado de elementos dependientes entre sí, cuyo funcionamiento coordinado busca mejorar la rehabilitación ortopédica, considerando tanto las necesidades del usuario como las condiciones del entorno donde será implementado.

2.15. Análisis funcional

El dispositivo de rehabilitación de rodilla para personas con gonartrosis cumple una función principal orientada a facilitar y monitorear el movimiento articular de forma segura, ergonómica y guiada, apoyando los procesos de recuperación física en entornos domiciliarios. Esta función global se descompone en un conjunto de funciones específicas y complementarias, que actúan de forma coordinada para garantizar su usabilidad, efectividad terapéutica y adaptabilidad al paciente.

El análisis funcional permite identificar la función principal del sistema, organizar sus subfunciones en un orden lógico y determinar su relación con los requerimientos del diseño. Esto favorece su comprensión estructural y permite establecer criterios técnicos para su desarrollo y validación.

A continuación, se presenta la descomposición funcional del sistema (Visualizar tabla 1):

Función Principal:

- Asistir y monitorear el movimiento de flexión y extensión de la rodilla en pacientes con gonartrosis para favorecer su rehabilitación domiciliaria.

Fuente: Elaboración propia con investigación de diseño

Tabla 2.1 Análisis función

Tipo de función	Subfunción	Descripción técnica	Relación con el objetivo
Función operativa	Fijar el dispositivo al usuario	Se asegura el ajuste ergonómico mediante correas y estructura anatómica adaptable.	Permite estabilidad y seguridad durante el uso.
Función operativa	Guiar el movimiento articular	Acompaña mecánicamente la flexión y extensión dentro del rango permitido.	Facilita una rehabilitación segura y controlada.
Función operativa	Aplicar estimulación terapéutica	Se activa el módulo de vibración para reducir rigidez y estimular musculatura.	Mejora la circulación y disminuye el dolor.
Función de medición	Detectar el ángulo de movimiento	Los sensores registran el desplazamiento articular en tiempo real.	Permite monitorear la evolución del usuario.

Función de registro	Procesar y almacenar datos	El microcontrolador interpreta los valores obtenidos y los ordena.	Contribuye a generar información para seguimiento.
Función de comunicación	Visualizar o enviar datos	Los resultados se muestran en una pantalla enviando por wifi a una aplicación	Favorece el análisis clínico y el seguimiento.
Función de confort	Garantizar ergonomía y biocompatibilidad	Se utilizan materiales cómodos, hipoalergénicos y ligeros.	Aumenta la adherencia al tratamiento.
Función de adaptabilidad	Ajustarse a diferentes usuarios	El diseño considera dimensiones antropométricas variables.	Permite uso en distintos perfiles de pacientes.
Función de protección	Evitar lesiones durante el uso	Se limita el rango de movimiento y se asegura un comportamiento predecible.	Garantiza seguridad terapéutica.

La función principal del dispositivo se logra gracias a la interacción armónica de funciones operativas (asistencia y guía), terapéuticas (estimulación y confort), tecnológicas (sensorización y comunicación) y estructurales (adaptabilidad y manufactura). De este modo, el dispositivo no solo cumple un rol mecánico, sino también informativo y terapéutico, consolidándose como una solución integral para la rehabilitación.

2.16. Modelo caja negra

El análisis de caja negra permite representar el dispositivo como un sistema en el cual no se detallan los procesos internos, sino únicamente las relaciones entre las entradas y las salidas. Este enfoque facilita la interpretación simplificada del funcionamiento global del dispositivo, destacando su propósito sin profundizar en sus mecanismos internos.

En este contexto, el dispositivo de rehabilitación de rodilla para personas con gonartrosis se presenta como un sistema que recibe información biométrica y requerimientos funcionales del usuario, los transforma mediante un proceso terapéutico asistido y entrega resultados vinculados a la movilidad articular, estimulación muscular y retroalimentación de progreso.

Entradas (Inputs):

- Datos antropométricos del usuario.
- Movimiento inicial de la rodilla (flexión/extensión).
- Nivel de dolor o rigidez articular.
- Interacción del paciente con el dispositivo (colocación y activación).
- Energía eléctrica para funcionamiento del sistema.

Proceso:

- Se realiza la asistencia al movimiento articular mediante la estructura ergonómica del dispositivo, se aplican estímulos vibratorios para favorecer la rehabilitación y se registran los ángulos de desplazamiento a través de sensores, sin detallar específicamente los mecanismos electrónicos o mecánicos que intervienen en esta fase.

Salidas (Outputs):

- Movimiento articular guiado y asistido en flexión/extensión.
- Reducción de rigidez y estimulación muscular por vibración.
- Datos medidos sobre el rango de movilidad articular.
- Información de progreso disponible en pantalla o aplicación móvil.
- Mejora gradual en la adherencia al tratamiento domiciliario.

Los datos registrados por los sensores, junto con la percepción de comodidad del paciente, permiten realizar ajustes en la intensidad de vibración, rango de movimiento, sujeción ergonómica o reprogramación de la rutina terapéutica.

2.17. Desarrollo final de prototipo físico



Figura 2.9 Prototipo físico con ensamble completo

Capítulo 3: Costo del prototipo

3. El presente análisis económico se desarrolla sobre la base de una producción estimada de 240 prototipos funcionales al año, correspondiente a una capacidad de fabricación de 5 unidades semanales, considerando una jornada parcial de trabajo y procesos de manufactura semiautomatizados mediante impresión 3D. Los costos se estructuran en costos indirectos, costos directos, cubicación de materiales, costo de personal, costo de uso de máquina, costo de diseño y margen de utilidad.

3.1 Fundamentación de la cantidad anual de prototipos

La cantidad anual de prototipos desarrollados se define a partir de un análisis de la capacidad productiva del proyecto, considerando los tiempos de fabricación, ensamblaje y validación del prototipo, así como la disponibilidad horaria destinada al desarrollo.

La cantidad anual de prototipos se determina a partir de un análisis de la capacidad productiva efectiva del proyecto, considerando la disponibilidad horaria diaria y el tiempo requerido para la fabricación de cada unidad.

Para el desarrollo del proyecto se considera una jornada parcial de trabajo de 4 horas diarias, correspondiente a un contexto académico de prototipado y validación. De acuerdo con el análisis de tiempos del proceso, cada prototipo funcional requiere aproximadamente 4 horas de trabajo efectivo, las cuales incluyen preparación de archivos 3D, supervisión de impresión, post-procesado, ensamblaje electrónico y montaje final.

Bajo una lógica estrictamente secuencial, esta relación permitiría la fabricación de 1 prototipo por día ($4 \text{ h disponibles} \div 4 \text{ h por prototipo}$). Sin embargo, los procesos de impresión 3D operan de forma autónoma, lo que permite realizar actividades en paralelo mientras las piezas se imprimen, tales como ensamblaje, ajustes de diseño o preparación de archivos para prototipos posteriores. Esta condición permite optimizar los tiempos y aumentar la capacidad productiva diaria.

Considerando esta optimización, se establece una capacidad productiva promedio de 1 prototipo por día, lo que equivale a 5 prototipos semanales, asumiendo una planificación de trabajo de cinco días a la semana. A partir de esta base, la producción mensual corresponde a 20 prototipos ($5 \text{ prototipos/semana} \times 4 \text{ semanas}$), y la producción anual a 240 prototipos ($20 \text{ prototipos/mes} \times 12 \text{ meses}$).

Esta estimación representa un escenario conservador y realista, orientado al desarrollo, prueba y validación del prototipo, sin asumir condiciones de producción industrial ni una demanda de mercado consolidada. Revisar anexo 2.

3.2 Costo indirecto

Los costos indirectos corresponden a aquellos gastos asociados al proceso de fabricación que no derivan directamente de la compra de materiales o componentes, pero que influyen en el desarrollo del prototipo a lo largo del año de trabajo. En el presente proyecto, estos costos se estiman considerando el consumo energético de la impresora 3D durante la fabricación anual de los prototipos, el uso de insumos menores utilizados en procesos de ajuste y montaje, y el uso general de herramientas e infraestructura de trabajo.

Dado que el desarrollo del proyecto se realizó en un entorno académico, sin costos asociados a arriendo de laboratorio ni adquisición de equipamiento adicional, estos ítems no representan un desembolso económico directo. No obstante, se incluyen como costos indirectos anuales prorrateados, con el objetivo de reflejar de manera más realista el impacto económico del proceso productivo en un escenario de trabajo continuo.

El consumo eléctrico se calcula en función de la fabricación de 240 prototipos al año, considerando un tiempo promedio de 4 horas de impresión por prototipo y un costo eléctrico promedio. Los insumos menores se estiman a partir de un consumo mensual proyectado a doce meses, mientras que el uso de herramientas y espacio de trabajo se incorpora como un costo referencial anual por uso de infraestructura académica. Los valores asignados corresponden a estimaciones conservadoras, coherentes con el alcance del proyecto y su carácter experimental. Revisar anexo 3.

Tabla 3.1 Costos indirectos

Ítem	Descripción	Base calculo	Estimación (CLP)	Estimación (UF)
Consumo eléctrico de impresiones 3D	Uso de impresora 3D durante fabricación de 240 prototipos/año	240 prototipos x 4h x costo eléctrico promedio	16500	0.42
Insumos menores	Lijas, cintas, adhesivos utilizados en procesos de ajuste y montaje	Consumo estimado mensual x 12	\$6000	0.15
Uso de herramientas y espacio de trabajo	Costo referencial académico por uso de infraestructura, herramientas y espacio de trabajo	Prorrateo anual	\$8400	0.21
Total costos indirectos estimados			\$30.900	0.78

Valor UF a Día 07.01.2026 según SII= 39.754,84

3.3 Costo directo

El costo directo corresponde a todos aquellos gastos asociados de manera inmediata y tangible a la fabricación del prototipo. En el presente proyecto, estos costos incluyen el consumo de material utilizado en la impresión 3D de las piezas estructurales, la adquisición de componentes electrónicos y los elementos directamente incorporados en el ensamblaje del sistema.

Para la evaluación económica del proyecto, los costos directos se estiman considerando una producción anual de 240 prototipos funcionales, de acuerdo con la capacidad productiva definida. Los valores se calcularon a partir del peso real del filamento PLA utilizado en cada pieza, los precios unitarios de los componentes electrónicos y una proyección anual de fabricación. A continuación, se presenta el desglose del costo directo anual del proyecto. Revisar anexo 4.

Elaboración Propia

Tabla 3.1 Costos directos

Ítem	Cantidad por prototipo	Costo unitario (CLP)	Cantidad anual	Subtotal anual (CLP)	Estimación (UF)
Pieza 3D 1 (PLA)	1	491	240	117.840	2.96
Pieza 3D 2 (PLA)	1	587	240	140.880	3.54
Caja 3D ESP32 (PLA)	1	831	240	199.440	5.02
ESP32	1	6.750	240	1.620.000	40.75
Motores vibradores	2	4.300	480	2.064.000	51,92
Potenciómetro	1	400	240	96.000	2.41
Remaches	4	40	960	38.400	0.97
Total costo directo anual	—	—	—	4.276.560	107.57

Valor UF a Día 07.01.2026 según SII= 39.754,84

3.4 Cubicación de materiales

La cubicación de materiales considera el consumo anual de filamento PLA utilizado en la fabricación de las piezas impresas en 3D que componen el prototipo. El cálculo se realiza a partir del peso real de cada pieza, expresado en gramos, el cual se convierte a kilogramos para determinar el costo proporcional según el valor comercial del filamento por kilogramo.

Adicionalmente, se incorpora una cantidad anual de 240 unidades por pieza, correspondiente al volumen estimado de fabricación, y un factor de merma del 10%, asociado a fallas de impresión, ajustes dimensionales y pérdidas propias del proceso. De este modo, se obtiene una estimación precisa y realista del costo anual de material, coherente con el consumo efectivo de recursos durante la fabricación. Revisar anexo 5.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2 Cubicación de materiales

Pieza	Peso unitario (g)	Filamento unitario (kg)	Costo PLA (\$/kg)	Costo unitario (CLP)	Cantidad anual	Subtotal anual (CLP)	Estimación (UF)
Pieza 3D 1	45,04	0,04504	10.890	491	240	117.840	2.96
Pieza 3D 2	53,92	0,05392	10.890	587	240	140.880	3.54
Caja 3D ESP32	76,27	0,07627	10.890	831	240	199.440	5.02
Subtotal filamento	–	–	–	–	–	458.160	11.52
Merma filamento (10%)	–	–	–	–	–	45.816	1.15
TOTAL ANUAL FILAMENTO	–	–	–	–	–	503.976 CLP	12,68

Valor UF a Día 07.01.2026 según SII= 39.754,84

3.5 Costo del personal para la fabricación del prototipo

El costo del personal corresponde a la estimación del tiempo de trabajo requerido para la fabricación anual de los prototipos y al valor de la mano de obra asociada a dichas actividades. Si bien el desarrollo del proyecto se realizó en un contexto académico, para efectos del análisis económico se considera un escenario referencial de mercado, utilizando la tarifa de un técnico especializado en impresión 3D y ensamblaje electrónico. Revisar anexo 6.

La estimación contempla las actividades de preparación y ajuste de archivos de impresión, supervisión del proceso de fabricación, post-procesado de las piezas impresas y montaje del sistema electrónico, incluyendo el montaje final del prototipo. El cálculo se realiza considerando una producción anual de 240 prototipos.

Cálculo del tiempo estimado

Las horas estimadas por prototipo son las siguientes:

- Preparación y ajustes de archivos 3D: 0,5 horas
- Supervisión de impresión 3D (3 piezas): 1,5 horas
- Post-procesado y limpieza de piezas: 0,5 horas
- Ensamblaje electrónico (ESP32, potenciómetro, cableado y fijaciones): 1 hora
- Montaje final del prototipo: 0,5 horas

Tiempo total por prototipo: 4 horas

Cálculo anual de mano de obra

Considerando una producción de 240 prototipos al año, se obtiene un total de 960 horas anuales de trabajo.

Se utiliza una tarifa de referencia de \$8.000 CLP por hora, acorde a un técnico especializado.

Costo anual de personal:

- $960 \text{ horas} \times \$8.000 \text{ CLP/h} = \$7.680.000 \text{ CLP}$

Este valor representa el costo anual estimado de la mano de obra directa necesaria para la fabricación de los prototipos del proyecto.

3.6 Costo de uso de maquina

El costo de uso de máquina considera la utilización de la impresora 3D y de las herramientas de taller durante el proceso de fabricación de los prototipos. Esta partida contempla exclusivamente el uso operativo de los equipos, asociado al tiempo efectivo de funcionamiento y a una tarifa horaria referencial que representa desgaste, mantenimiento y disponibilidad de la infraestructura.

La adquisición de la impresora 3D corresponde a una inversión única, realizada al inicio del proyecto, por lo que no se imputa como un costo recurrente por prototipo ni anual. Asimismo, el filamento PLA utilizado en la impresión de las piezas se considera de manera independiente dentro de la cubicación de materiales, con un valor unitario de referencia de \$14.990 CLP por kilogramo, por lo que no se incluye en esta sección.

El consumo eléctrico asociado a la operación de los equipos se encuentra incorporado dentro de los costos indirectos, evitando así la doble contabilización de este concepto. Revisar anexo 7.

Tabla 3.3 Costo de uso de maquina

Ítem	Tiempo por prototipo (h)	Producción anual (unid)	Tiempo anual (h)	Tarifa (CLP/h)	Subtotal anual (CLP)	Costo anual (UF)
Impresora 3D (BambuLab A1)	4,7	240	1.128	1.000	1.128.000	28,37
Estación de soldadura / herramientas	0,25	240	60	1.000	60.000	1.51
TOTAL	—	—	1.188	—	1.188.000	29.88

Valor UF a Día 07.01.2026 según SII= 39.754,84

3.7 Costo de equipos y componentes

En este apartado se consideran únicamente los equipos o herramientas adicionales que hubieran sido necesarios adquirir específicamente para la fabricación del prototipo. En este proyecto, no fue requerida la compra de maquinaria ni instrumentos nuevos, ya que todo el proceso de manufactura y ensamblaje se realizó utilizando equipamiento disponible en el laboratorio (impresora 3D, estación de soldadura y herramientas manuales).

Por lo anterior, el costo asociado a equipos y herramientas corresponde a \$0, dado que su uso ya fue contemplado dentro del “Costo de uso de máquina” y no se incurrió en gastos adicionales por adquisición de equipamiento.

3.8 Costo de montaje y traslado

En el presente proyecto no se considera un costo adicional asociado a montaje o traslado, dado que la totalidad de las piezas y componentes incluyendo las estructuras impresas en 3D, el sistema de vibración, el potenciómetro, los elásticos y la correa fueron ensamblados íntegramente en el taller durante el proceso de fabricación.

El producto final se entrega completamente armado y no requiere instalación en terreno ni transporte especializado. Por lo tanto, este ítem no aplica dentro del cálculo de costos del proyecto.

3.9 Costo de diseño

El costo de diseño corresponde al tiempo dedicado al desarrollo conceptual, modelado tridimensional, iteración técnica y adecuación funcional del prototipo. Esta etapa comprendió la generación de bocetos iniciales, la construcción y ajuste de modelos CAD, la definición e integración de los componentes electrónicos (microcontrolador, potenciómetro, sistema de vibración y carcasa), así como la preparación de las piezas para su fabricación mediante impresión 3D.

Adicionalmente, se consideró el tiempo invertido en la validación digital de cada componente, correcciones dimensionales, ajustes de ensamble y el diseño de la carcasa destinada a alojar el microcontrolador, asegurando el correcto funcionamiento del sistema desde el punto de vista técnico, ergonómico y funcional.

El costo de diseño se calcula como un costo único del proyecto, dado que estas actividades se realizan una sola vez y no se repiten durante la producción de los prototipos. Para su estimación, se consideró un total de 22 horas de trabajo especializado, distribuidas entre diseño conceptual, modelado CAD, ajustes por iteraciones e integración diseño–electrónica, aplicando una tarifa de referencia de \$12.000 CLP por hora, acorde al nivel técnico del trabajo realizado. Revisar anexo 8.

Cálculo del costo de diseño:

Costo de diseño = *Horas totales* × *Tarifa por hora*

$$\text{Costo de diseño} = 22 \text{ h} \times \$12.000/\text{h} = \$264.000 \text{ CLP}$$

El análisis del costo de diseño evidencia que el tiempo invertido es coherente con la complejidad técnica del prototipo desarrollado. Las horas estimadas reflejan adecuadamente el proceso de diseño iterativo necesario para lograr una solución funcional, integrando componentes mecánicos, electrónicos y criterios de uso. En conjunto, este costo se encuentra alineado con la estructura general del proyecto y contribuye a una estimación económica realista y consistente.

3.10 Costo de porcentaje de utilidades del proyecto

Para la estimación del margen de utilidad del proyecto se aplica un 30% sobre el costo total anual, considerando que el desarrollo contempla trabajo especializado, gestión técnica, uso intensivo de equipamiento y una producción sostenida de prototipos a lo largo del año.

Este porcentaje se adopta como un valor de referencia habitual en proyectos de desarrollo de productos tecnológicos y prototipado funcional, permitiendo cubrir riesgos operativos, tiempos no productivos, iteraciones técnicas no previstas y asegurar la viabilidad económica del proyecto. Revisar anexo 9.

Cálculo del costo total anual

El costo total anual del proyecto se obtiene a partir de la suma de todos los costos directos e indirectos asociados a la fabricación y desarrollo del prototipo:

Tabla 3.4 Costo porcentaje utilidad del proyecto

Descripción	Monto (CLP)	Monto (UF)
Costo indirecto	30.900	0,78
Costo directo	4.276.560	107,57
Cubicación de materiales	503.976	12,68
Costo de personal	7.680.000	193,18
Costo uso de máquina	1.188.000	29,88
Costo de diseño (costo único)	264.000	6,64
Costo total anual	13.943.436	350,74

Valor UF a Día 07.01.2026 según SII= 39.754,84

Cálculo de precio de venta

$$\text{Precio de venta} = \frac{\text{Costo total}}{1 - 0.30}$$

$$\text{Precio de venta} = \frac{13.943.436}{0.70}$$

$$\text{Precio de venta} = 19.919.194 \text{ CLP}$$

Costo de utilidad

$$Utilidad = 19.919.194 - 13.943.436$$

$$Utilidad = 5.975.758 \text{ CLP}$$

Los valores obtenidos permiten visualizar de manera integral el costo económico del proyecto bajo un escenario de producción anual de 240 prototipos. El monto final del proyecto, determinado a partir del costo total anual y un margen de utilidad del 30% calculado sobre el precio de venta, incorpora no solo los costos directos de materiales y componentes, sino también la mano de obra especializada, el uso de maquinaria, el diseño del producto y los costos indirectos asociados al proceso.

La aplicación de este porcentaje de utilidad contribuye a la sostenibilidad económica del proyecto, reflejando de manera más realista el valor del trabajo técnico, la gestión del desarrollo y los riesgos inherentes al proceso de fabricación. El valor final obtenido constituye una referencia válida para evaluaciones económicas, proyecciones productivas y análisis de factibilidad del dispositivo desarrollado.

El margen de utilidad aplicado en el presente proyecto no debe interpretarse como una ganancia comercial en sentido estricto, sino como un factor de cobertura económica asociado al desarrollo de un prototipo funcional en etapa de diseño y validación. Dicho margen contempla el riesgo técnico propio de los procesos de prototipado, las iteraciones de diseño, los ajustes derivados de pruebas funcionales, el tiempo no directamente productivo y la gestión general del proyecto. Asimismo, permite representar de forma más precisa el valor del trabajo intelectual, la planificación técnica y la sostenibilidad del proceso de desarrollo, elementos que no siempre se reflejan de manera directa en los costos operativos. En este contexto, el margen aplicado cumple una función metodológica y referencial, orientada a estimar el costo integral del proyecto bajo un escenario de desarrollo tecnológico y no de producción industrial a gran escala.

Conclusión y recomendaciones

Conclusión: El desarrollo del presente proyecto permitió abordar de manera integral el diseño y desarrollo de un dispositivo de rehabilitación de rodilla orientado a personas con gonartrosis, considerando las necesidades funcionales asociadas a los movimientos de flexión y extensión en posición sentada. A partir de la investigación de usuarios y del análisis antropométrico, se incorporaron criterios de diseño que permitieron responder a la diversidad física, logrando un dispositivo ergonómico y funcional que asiste el movimiento de la rodilla mediante el uso de sensores, proporcionando un movimiento guiado y seguro.

Asimismo, se seleccionaron materiales y tecnologías de manufactura flexible que posibilitan una fabricación personalizada y de bajo costo, coherente con el enfoque de rehabilitación domiciliaria. En paralelo, se realizó el análisis y estimación de los costos totales asociados al desarrollo del proyecto, incluyendo recursos materiales, humanos y productivos, lo que permitió evidenciar la viabilidad económica de la propuesta.

Finalmente, se desarrolló un prototipo funcional que fue sometido a pruebas preliminares de usabilidad, permitiendo validar aspectos de confort, ajuste y funcionamiento general del dispositivo en un contexto no clínico. Si bien los resultados fueron positivos, se identificaron oportunidades de mejora, particularmente en el sistema de ajuste de la rodillera y en el sistema de vibración, el cual puede optimizarse para lograr una mejor penetración y distribución del estímulo, constituyendo líneas claras de desarrollo futuro.

Recomendaciones:

- Optimizar el sistema de ajuste de la rodillera, incorporando mecanismos que permitan una mejor adaptación anatómica y mayor estabilidad durante el uso, considerando la diversidad morfológica de los usuarios.
- Mejorar el sistema de vibración, evaluando distintas configuraciones de ubicación, intensidad y frecuencia, con el fin de lograr una mejor penetración y distribución del estímulo propioceptivo.
- Realizar pruebas con usuarios reales en periodos de uso más prolongados, que permitan evaluar confort, durabilidad y comportamiento del dispositivo en condiciones cercanas a un contexto real de rehabilitación domiciliaria.
- Desarrollar una versión funcional completa de la aplicación móvil, que permita una visualización más clara del progreso del usuario y una interacción más intuitiva con el dispositivo.
- Mejorar el encapsulado y la protección de la electrónica, con el objetivo de aumentar la seguridad, durabilidad y acabado profesional del prototipo.
- Avanzar hacia etapas de validación clínica supervisada, que permitan evaluar la eficacia terapéutica del dispositivo y respaldar su uso en contextos de rehabilitación formal.

Bibliografía

Rodillera OA Unloader; rodilleras para dolor de rodilla, Ost. (s. f.). Meses Sin Interés. <https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-2669497060-rodillera-oa-unloader-rodilleras-para-dolor-de-rodilla-ost- JM>

Ortoweb, & Ortoweb. (2020, 18 junio). La Gonartrosis - Blog sobre ortopedia de ortoweb.com. *Blog sobre ortopedia de ortoweb.com.* <https://www.ortoweb.com/blogortopedia/la-gonartrosis/>

Admin. (2023, 8 junio). *TRATAMIENTO ORTOPÉDICO EN LA GONARTROSIS.* Ortopedia Itosa. <https://ortopediaito.com/antiequino-exoesqueleto-2-2-2-2/>

Rodillera multifuncional ortopédica Bisagra soporte rótula. (s. f.). Cuotas Sin Interés. https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-2168810880-rodillera-multifuncional-ortopedica-bisagra-soporte-rotula- JM?matt_tool=31735389&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=22116391677&matt_ad_group_id=173057394389&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creative=729566859748&matt_keyword=&matt_ad_position=&matt_ad_type=pla&matt_merchant_id=632478959&matt_product_id=MLC2168810880&matt_product_partition_id=2417613507324&matt_target_id=aud-2177063467803:pla-2417613507324&cq_src=google_ads&cq_cmp=22116391677&cq_net=g&cq_plt=gp&cq_med=pla&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwiLLABhCEARIsAJYS6umj7eqtHadBdooeGC8jZd2-S9vzsi-j7zE9jlcJ6E2Ejkb1Py6VUAAaAvsREALw_wcB

A Gutiérrez, Agutierrez, & Agutierrez. (2021, 27 abril). *Diseñar con un propósito: introducción a las estructuras Lattice (celosías).* Avantek - Avantek CT Solutions. <https://avantek.es/disenar-con-un-proposito-introduccion-a-las-estructuras-lattice-celosias/>

Staggl, S. (2024, 11 abril). *Bruno Munari's design methodology – from problem to solution.* Noisli Blog. <https://www-noisli-com.translate.goog/blog/bruno-munaris-design-methodology-from-problem-to-solution/? x tr sl=en& x tr tl=es& x tr hl=es& x tr pto=tc>

Martinez, J. (2024, March 25). Análisis PESTEL de una empresa: qué es y cómo hacerlo - ESERP. *ESERP Digital Business & Law School.* <https://es.eserp.com/articulos/que-es-analisis-pestel/>

<https://innovacion.ufro.cl/wp-content/uploads/2022/04/1.-VT-Manufactura-Aditiva.pdf>

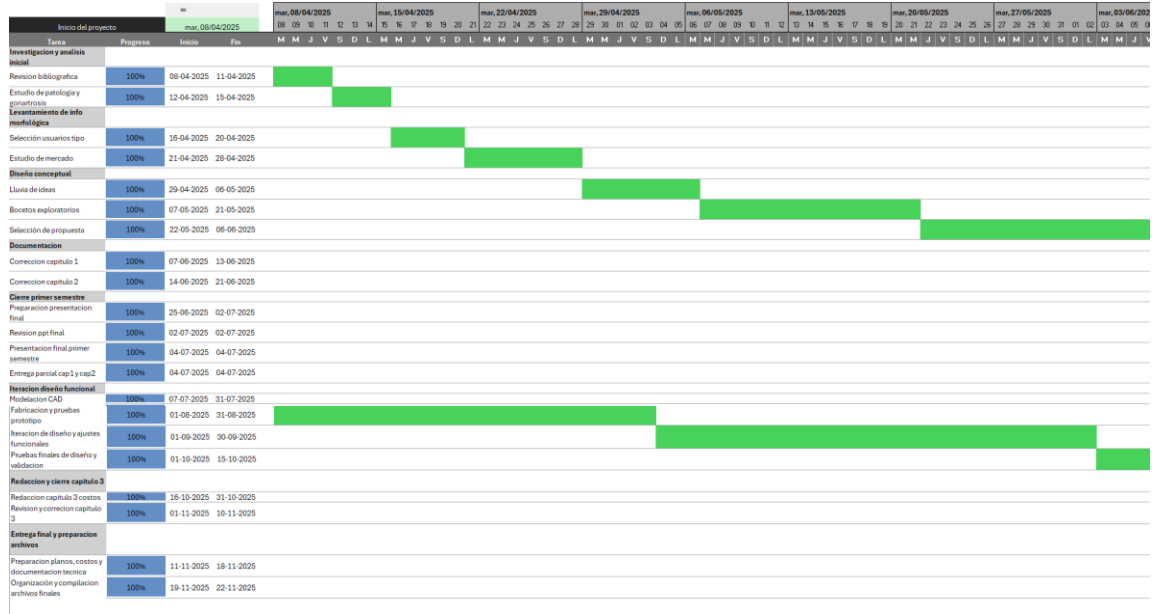
[https://www-who-](https://www-who-int.translate.goog/? x tr sl=en& x tr tl=es& x tr hl=es& x tr pto=tc& x tr hist=true#tab=tab_1)

[int.translate.goog/? x tr sl=en& x tr tl=es& x tr hl=es& x tr pto=tc& x tr hist=true#tab=tab_1](https://www-who-int.translate.goog/? x tr sl=en& x tr tl=es& x tr hl=es& x tr pto=tc& x tr hist=true#tab=tab_1)

WibroterapiaPro, R. (2023, 7 noviembre). *3 weeks of vibration therapy reduces pain and increases mobility in people with knee osteoarthritis.* Vibrotherapy Pro. <https://www-vibrotherapy-pro.translate.goog/neurology/motion/knee-rehabilitation/3-weeks-of-vibration-therapy-reduces-pain-and-increases-mobility-in-people-with-knee-osteoarthritis/? x tr sl=en& x tr tl=es& x tr hl=es& x tr pto=tc>

Khosravi, M., Arazpour, M., Saeedi, H., & Rezaei, M. (2018). Design Evaluation in Novel Orthoses for Patients with Medial Knee Osteoarthritis. *Journal Of Biomedical Physics And Engineering*. <https://doi.org/10.31661/jbpe.v0i0.965>

Anexo 1: Carta Gantt del Proyecto



Anexo 1. Carta Gantt de elaboración propia correspondiente a la planificación del proyecto, donde se muestran las actividades principales, su duración y fechas estimadas.

Anexo 2: Datos previos

Concepto	Valor	Justificación
Prototipos por semana	5	Capacidad de impresión y montaje manual
Prototipos por mes	20	Ritmo constante de validación
Prototipos por año	240	Escala mínima viable
Horas de diseño por prototipo	2 h	Ajustes CAD y personalización
Horas de impresión por prototipo	4 h	Tiempo promedio impresora 3D

La cantidad anual de prototipos se define a partir de la capacidad productiva del proyecto. Se considera una jornada parcial de trabajo de 4 horas diarias y un tiempo promedio de 4 horas por prototipo, lo que permite fabricar 1 prototipo por día. Dado que los procesos de impresión 3D operan de forma autónoma y permiten realizar actividades en paralelo, esta capacidad resulta operativamente viable. Considerando una planificación de 5 días de trabajo a la semana, se obtiene una producción de 5 prototipos semanales, equivalentes a 20 prototipos mensuales y 240 prototipos anuales, bajo un escenario conservador de desarrollo académico.

Fuente: Elaboración propia e investigación de economía

Anexo 2. Datos previos para avanzar con cálculos de proyecto tamaño anual

Anexo 3: Costos indirectos

Ítem	Descripción técnica	Base de cálculo	Total peso	UF
Consumo eléctrico impresiones 3D	Uso de impresora 3D durante fabricación de 240 prototipos/año	240 prototipos × 4 h × costo eléctrico promedio	16500	0,42
Insumos menores	Lijas, cintas, adhesivos utilizados en procesos de ajuste y montaje	Consumo estimado mensual × 12 meses	6000	0,15
Uso de herramientas y espacio	Costo referencial académico por uso de infraestructura, herramientas y espacio de trabajo	Prorratao anual	8400	0,21
Total costos indirectos			30900	0,78

Fuente: Elaboración propia e investigación de economía

Anexo 3. Cálculo de costos indirectos

Anexo 4: Costos directos

Ítem	Cant. por prototipo	Costo unitario (\$)	Cantidad anual	Subtotal anual (\$)	Subtotal anual (UF)
Pieza 3D 1 (PLA)	1	491	240	117.840	2.96
Pieza 3D 2 (PLA)	1	587	240	140.880	3.54
Caja 3D ESP32 (PLA)	1	831	240	199.440	5.02
ESP32	1	6.750	240	1.620.000	40.75
Motores vibradores	2	4.300	480	2.064.000	51.92
Potenciómetro	1	400	240	96.000	2.41
Remaches	4	40	960	38.400	0.97
TOTAL COSTO DIRECTO ANUAL	—	—	—	4.276.560 CLP	107.57

Fuente: Elaboración propia e investigación de economía

Anexo 4. Cálculo de costos directos

Anexo 5: Cubicación de materiales

Pieza	Peso (g)	Filamento (kg)	Costo PLA (\$/kg)	Costo unitario (\$)	Cantidad anual	Subtotal anual (\$)	Subtotal anual (UF)
Pieza 3D 1	45,04	0,04504	10.890	491	240	117.840	2,96
Pieza 3D 2	53,92	0,05392	10.890	587	240	140.880	3,54
Caja 3D ESP32	76,27	0,07627	10.890	831	240	199.440	5,02
Subtotal filamento	—	—	—	—	—	458.160	11,52
Merma filamento (10%)	—	—	—	—	—	45.816	1,15
TOTAL ANUAL FILAMENTO	—	—	—	—	—	503.976 CLP	12,68

(UF calculada con valor del 17 de noviembre: **39.643,59 CLP**)

La cubicación de materiales considera el consumo real de filamento PLA según el peso de cada pieza impresa. Adicionalmente, se incorpora un factor de merma del 10%, asociado a procesos de prueba, fallas de impresión y generación de soportes, con el fin de representar de forma conservadora el consumo anual de material durante el desarrollo del prototipo.

Fuente: Elaboración propia e investigación de economía
Anexo 5. Cubicación de materiales

Anexo 6: Costo del personal

Actividad	Horas por prototipo	Prototipos/año	Horas anuales	Tarifa (CLP/h)	Costo anual (\$)	Costo anual (UF)
Preparación y ajustes archivos 3D	0,5	240	120	8.000	960.000	24,15
Supervisión impresión 3D	1,5	240	360	8.000	2.880.000	72,44
Post-procesado de piezas	0,5	240	120	8.000	960.000	24,15
Ensamblaje electrónico	1	240	240	8.000	1.920.000	48,3
Montaje final	0,5	240	120	8.000	960.000	24,15
TOTAL	4 h/prototipo	—	960 h/año	—	7.680.000	193,19

Costo mensual	640000
---------------	--------

Para la estimación de costos se define un escenario de producción de prototipos funcionales equivalente a 5 unidades semanales, lo que corresponde a 20 prototipos mensuales y 240 prototipos anuales. Este volumen se considera representativo para un producto mínimo viable en etapa de validación técnica y de usuario.

Fuente: Elaboración propia e investigación de economía
Anexo 6. Costo del personal

Anexo 7: Costo uso de maquina

Ítem	Tiempo por prototipo (h)	Producción anual (unid)	Tiempo anual (h)	Tarifa (CLP/h)	Subtotal anual (CLP)	Costo anual (UF)
Impresora 3D (BambuLab A1)	4,7	240	1.128	1.000	1.128.000	28,37
Estación de soldadura / herramientas	0,25	240	60	1.000	60.000	1,51
TOTAL	—	—	1.188	—	1.188.000	29,88

El costo de uso de maquinaria considera la operación de la impresora 3D y de la estación de soldadura, valorizadas mediante una tarifa horaria que incorpora depreciación, desgaste del equipo y consumo energético. Dado que estos equipos son reutilizables y no se adquieren por unidad producida, su costo se imputa como costo indirecto de fabricación, prorrateado en función del tiempo de uso anual asociado a la producción estimada de 240 prototipos.

Fuente: Elaboración propia e investigación de economía
Anexo 7. Costo uso de maquina

Anexo 8: Costo de diseño

Actividad	Horas	Valor hora (CLP)	Subtotal (CLP)	Costo (UF)
Diseño conceptual y definición de	4 h	12.000	48.000	1,21
Modelado CAD inicial	8 h	12.000	96.000	2,41
Ajustes y rediseño por iteraciones	6 h	12.000	72.000	1,81
Integración diseño-electrónica	4 h	12.000	48.000	1,21
TOTAL diseño del proyecto (costo único)	22 h	—	264.000	6,64

El costo de diseño corresponde a un costo no recurrente asociado al desarrollo del prototipo funcional, incluyendo etapas de diseño conceptual, modelado CAD, iteraciones de rediseño e integración con el sistema electrónico. Este costo se considera fijo para el proyecto, dado que el diseño no se modifica con el aumento del volumen de producción.

Fuente: Elaboración propia e investigación de economía
Anexo 8. Costo de diseño

Anexo 9: Costo de porcentaje de utilidad

Descripción	Porcentaje	\$
Costo indirecto		30.900
Costo directo		4.276.560
Cubicacion		503.976
Costo personal		7.680.000
Costo uso maquina		1.188.000
Costo de diseño		264.000
Total		13.943.436

Precio de venta	\$ 19.919.194
-----------------	---------------

Utilidad	0,3	13.943.436	\$ 5.975.758
Total proyecto			19.919.194

Fuente: Elaboración propia e investigación de economía
Anexo 9. Costo de porcentaje de utilidad