

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA REHABILITACIÓN DE CODO

Trabajo de Titulación para optar al Título de
Ingeniero de Ejecución en CONTROL E
INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

Alumno:

Jaime Mauricio Guitál Donoso

Profesor Guía:

Mag. Guelis Montenegro Zamora



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 E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA REHABILITACIÓN DE CODO

Nombre del candidato(a): Jaime Mauricio Guital Donoso

Carrera / Grado: Ingeniería de Ejecución en Control e Instrumentación Industrial

Campus: Sede Viña del Mar

Departamento: Electrotecnia e Informática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Guelis Montenegro Zamora, 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.

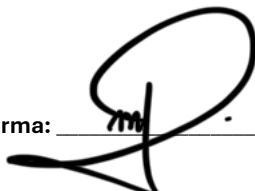
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

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

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

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

Fecha: 30/07/2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 29/07/2026 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

KEYWORDS: REHABILITACIÓN, EQUIPOS MÉDICOS, RASPBERRY, PYTHON, IMPRESIÓN 3D.

El presente trabajo de título presenta el diseño e implementación de un sistema para la rehabilitación de codo. Para el diseño se trabajará con software autodesk fusión 360 para la realización de una estructura ergonómica, se realizará el control por medio de una tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 5 y servomotores para medir el movimiento angular, y se dispondrá de una interfaz visual la cual permitirá la visualización de parámetros de monitoreo.

Finalmente, se presentan y analizan los resultados obtenidos, estructurados en tres capítulos que describen detalladamente el proceso de diseño, implementación y validación del sistema, con el propósito de cumplir los objetivos establecidos.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES	2
1 ANTECEDENTES GENERALES.....	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
1.1.1 Definición del problema	6
1.1.2 Importancia de resolverlo	7
1.1.3 Involucrados (Stakeholders).....	8
1.1.4 Consideraciones	9
1.1.5 Encuesta realizada al personal clínico.....	11
1.2 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	13
1.2.1 Requerimientos	13
1.2.2 Requerimientos funcionales	13
1.2.3 Requerimientos técnicos.....	13
1.2.4 Requerimientos Operativos	14
1.3 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN	14
1.3.1 Alternativa 1: No realizar cambios	14
1.3.2 Alternativa 2: Mejorar los equipos actuales	15
1.3.3 Alternativa 3: Desarrollar un sistema automatizado para rehabilitación	15
1.3.4 Alternativa seleccionada	16
1.3.5 Valor agregado	18
1.4 OBJETIVOS.....	18
1.4.1 Objetivo general.....	18
1.4.2 Objetivos específicos.....	19
CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN	20
2 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN.....	21
2.1 REQUERIMIENTOS PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO	21
2.1.1 Requerimientos de hardware	21
2.1.2 Impresora 3D Ender 3 y filamentos.....	22

2.1.3	Raspberry Pi 5.....	23
2.1.4	El servomotor MG995	24
2.1.5	Pantalla LCD TFT de 7 pulgadas.....	26
2.1.6	Otros componentes.....	27
2.1.7	Requerimientos de software.....	28
2.1.8	Fusion Autodesk 360	28
2.1.9	Ultimaker Cura 3D	28
2.1.10	Raspberry Pi OS (Debian)	29
2.1.11	Python (en Debian) y librerías Tkinter, GPIO y python-docx	30
2.2	DIAGRAMAS DE PROYECTO	30
2.2.1	Diagrama de bloque de funcionamiento	31
2.2.2	Esquema conexión eléctrica.....	34
2.3	IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE REHABILITACIÓN DE CODO.....	36
2.3.1	Desarrollo de modelado y preparación para la impresión	36
2.3.2	Configuración de sistema operativo e instalación de librerías	39
2.3.3	Configuración y conexión de servomotor	41
2.3.4	Resultado del proyecto	45
2.4	CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD	48
2.4.1	Limitación del rango de movimiento	48
2.4.2	Botón de parada de emergencia físico.....	48
2.4.3	Parada de emergencia mediante software	49
2.4.4	Validación de parámetros antes de iniciar la terapia.....	49
	CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	51
3	EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	52
3.1	COSTOS DEL PROYECTO.....	52
3.1.1	Costos de hardware	52
3.1.2	Costos de software.....	53
3.1.3	Costos de recursos humanos	54
3.1.4	Otros Costos	56
3.1.5	Costo total del proyecto.....	56
3.2	ANÁLISIS FINANCIERO	57

3.2.1	Inversión inicial.....	57
3.2.2	Precio venta.....	57
3.2.3	Horizonte de evaluación y tasa de descuento	58
3.2.4	Proyección de ventas	59
3.3	FLUJOS DE CAJA DEL PROYECTO	59
3.3.1	Flujo de caja puro	62
3.3.2	Flujo de caja con financiación	64
3.3.3	Análisis de sensibilidad.....	67
3.3.4	Interpretación de resultados.....	68
3.4	PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO	69
3.5	VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO	71
3.5.1	Pruebas realizadas.....	71
3.5.2	Calibración del dispositivo	73
3.5.3	Validación funcional	75
3.5.4	Mantenimiento y desinfección	76
3.5.5	Mejoras futuras.....	77
	CONCLUSIONES	79
	BIBLIOGRAFÍA	80
	ANEXOS.....	80
	ANEXO A: ENCUESTA REALIZADA AL PERSONAL CLÍNICO	81
	ANEXO B: MANUAL DE USUARIO.....	87
	ANEXO C: PAUTA DE MANTENIMIENTO	93
	ANEXO D: CARTA DE RECOMENDACIÓN.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Hospital Carlos Van Buren.....	3
Figura 1-2. Logo empresa Noctua Spa.	4
Figura 1-3. Diagrama Causa-Efecto.	7
Figura 1-4. Ejercicios flexo y extensión.	10
Figura 1-5. Ejercicios fortalecimiento flexo-extensores.....	10
Figura 1-6. Pregunta 8 encuesta.	12
Figura 1-7. Pregunta 9 de encuesta.	12
Figura 2-1. Impresora Ender 3.....	22
Figura 2-2. Raspberry Pi 5.	23
Figura 2-3. Servomotor MG995.	25
Figura 2-4. Pantalla LCD 7 pulgadas.	26
Figura 2-5. Logo Autodesk Fusion 360.	28
Figura 2-6. Logo Ultimaker Cura 3D.	29
Figura 2-7. Logo Raspberry PI OS.	29
Figura 2-8. Logo Python.....	30
Figura 2-9. Diagrama de flujo.	33
Figura 2-10. Representación de conexión.....	35
Figura 2-11. Diseño en Fusion soporte principal.....	37
Figura 2-12. Diseño en Fusion eje movable.	37
Figura 2-13. Diseño en Fusion caja interfaz.	38
Figura 2-14. Diseño en Ultimater Cura.	39
Figura 2-15. Sistema operativo Raspberry Pi OS.....	39
Figura 2-16. Consola de comandos Raspberry Pi OS.....	40
Figura 2-17. Distribución pines Gpi Raspberry.....	41
Figura 2-18. Programa servomotor.	42
Figura 2-19. Prototipo central impreso.....	45

Figura 2-20. Prototipo de interfaz visual.....	46
Figura 2-21. Programa diseñado Tkinter.....	47
Figura 2-22. Generación de reporte.....	47
Figura 2-23. Terapia detenida por botón emergencia de software.....	49
Figura 2-24. Verificación parámetros de la terapia.....	50
Figura 3-1. Flujo de caja puro.....	63
Figura 3-2. resultados de indicadores para flujo de caja puro.....	64
Figura 3-3. Flujo de caja con financiación.	65
Figura 3-4. resultados de indicadores para flujo de caja financiado.	67
Figura 3-5. Análisis de sensibilidad.	68
Figura 3-6. Prueba de validación en terapia.	72
Figura 3-7. Pruebas de validación en terapia.....	72
Figura 3-8. Calibración con goniómetro en 0°.	74
Figura 3-9. Calibración con goniómetro en 90°.	74
Figura 3-10. Prueba con voluntario 1.....	75
Figura 3-11. Prueba con voluntario 2.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Respuesta servomotor.	43
Tabla 3-1. Costos de Hardware.	53
Tabla 3-2. Costos de software.	54
Tabla 3-3. Costos recursos humanos.	55
Tabla 3-4. Costos totales	56
Tabla 3-5. Proyección de ventas.	59
Tabla 3-6. depreciación de activos fijos.	61
Tabla 3-7. Detalle de amortización del financiamiento.	66
Tabla 3-8. Planificación del proyecto.	70

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS:

HMI	: Interfaz Hombre-Máquina.
TCP	: Transmission Control Protocol
IP	: Internet Protocol
E/S	: Entrada/Salida
CPU	: Central Processing Unit.
GPU	: Graphics Processing Unit.
GPIO	: General Purpose Input/Output.
HDMI	: High-Definition Multimedia Interface.
MicroSD	: Tarjeta de memoria Micro Secure Digital.
PD	: Power Delivery .
PI OS	: Raspberry Pi Operating System.
PWM	: Pulse Width Modulation.
SD	: Secure Digital.
USB	: Universal Serial Bus.
PLA	: Polylactic Acid.
ABS	: Acrylonitrile Butadiene Styrene.
PETG	: Polyethylene Terephthalate Glycol.
TPU	: Thermoplastic Polyurethane.
TENS	: Técnico en Enfermería de Nivel Superior.
FDM	: Fused Deposition Modeling.
SBC	: Single Board Computer.
RAM	: Random Access Memory.
LCD	: Liquid Crystal Display.
TFT	: Thin Film Transistor.

TTL : Transistor-Transistor Logic

B. SIMBOLOGÍA:

V	: Volts.
%	: Por ciento.
cms	: Centímetros
s	: Segundos.
b	: Bit.
°	: Grados.
°C	: Grados Celsius.
g	: Gramos.
GB	: Gigabytes.
GND	: Ground.
Hz	: Hertz.
kg·cm	: Kilogramo-centímetro.
mm	: Milímetro.
mm/s	: Milímetros por segundo.
ms	: Milisegundos.
µs	: Microsegundos.
VCC	: Voltage Common Collector.
s/°	: Segundos por grado

INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la salud, los procesos de rehabilitación física cumplen un rol fundamental en la recuperación funcional de pacientes que han sufrido lesiones musculoesqueléticas. Sin embargo, estos procesos suelen depender en gran medida de la habilidad del terapeuta y de la precisión de los métodos manuales empleados, lo cual puede introducir variabilidad y puede limitar la capacidad de medición objetiva.

En este contexto, la incorporación de tecnologías de control y automatización representa una oportunidad significativa para modernizar los métodos de rehabilitación, proporcionando herramientas que faciliten la evaluación, el seguimiento y la ejecución de terapias de manera más precisa, segura y personalizada.

El presente trabajo se enmarca como proyecto para la carrera de Ingeniería en Ejecución en Control e Instrumentación, y tiene como propósito desarrollar un sistema automatizado de rehabilitación de codo basado en Raspberry Pi 5 y servomotores, que permita medir, controlar y registrar los movimientos articulares de los pacientes. Este desarrollo busca asistir al profesional kinesiólogo en la aplicación de ejercicios de movilidad y fortalecimiento, optimizando los recursos clínicos y aportando valor tecnológico al Hospital Carlos Van Buren de Valparaíso.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES

1 ANTECEDENTES GENERALES

El presente proyecto se enmarca en el ámbito de la electromedicina y en conjunto con la Ingeniería en Ejecución en Control e Instrumentación industrial, disciplinas orientadas al desarrollo de soluciones tecnológicas, en este caso aplicadas al área de la salud. En particular, el trabajo busca aplicar principios de control automático, instrumentación y electrónica biomédica, con el propósito de contribuir al proceso de rehabilitación física de pacientes que presentan lesiones en la articulación del codo.

El desarrollo del proyecto se lleva a cabo en el Hospital Carlos Van Buren, ubicado en el centro de la ciudad de Valparaíso, como se aprecia en la Figura 1-1. Este establecimiento es uno de los principales centros asistenciales de la Región de Valparaíso, y cumple un rol fundamental en la atención de pacientes provenientes de diversas comunas de la región. El hospital cuenta con una amplia infraestructura y una variedad de especialidades médicas, teniendo una alta demanda diaria de tratamientos.



Fuente: <https://hospitalcarlosvanburen.cl/>

Figura 1-1. Hospital Carlos Van Buren.

Dentro del Hospital Carlos Van Buren, diversas labores de mantenimiento y soporte técnico son ejecutadas por empresas externas que prestan servicios especializados. Una de estas entidades es “Ingeniería y Gestión Noctua SpA”, empresa dedicada a brindar servicios de mantenimiento preventivo y correctivo de equipos médicos, además, de asesoría técnica y desarrollo de soluciones tecnológicas para el área clínica.

La Unidad de Equipos Médicos del hospital trabaja en conjunto con la empresa Noctua en la mantención de equipos de electromedicina de distintas complejidades, asegurando operatividad para su correcto funcionamiento y cumplimiento de las normativas de seguridad hospitalaria.

Ingeniería y Gestión Noctua SpA participa activamente en diferentes centros de salud de la Región de Valparaíso y del país, contribuyendo a la mejora continua de los procesos clínicos mediante la incorporación de prácticas de gestión técnica y control de calidad. En la Figura 1-2 se presenta el logo institucional de la empresa Noctua, la cual constituye un actor relevante dentro del desarrollo del presente proyecto, aportando experiencia técnica y supervisión en aspectos de seguridad eléctrica, compatibilidad y confiabilidad operativa de los equipos involucrados.



Fuente: <https://www.noctua.cl/>

Figura 1-2. Logo empresa Noctua Spa.

Dentro del contexto mencionado, se trabajará en relación con la demanda de servicio clínico de medicina física y rehabilitación, área donde se observa que una de las lesiones más frecuentes tratadas corresponde a aquellas que afectan la articulación del codo, las cuales pueden originarse por fracturas, luxaciones, sobreesfuerzos, lesiones deportivas o procesos postoperatorios. Estas condiciones requieren procesos de rehabilitación prolongados, con el fin de recuperar gradualmente la movilidad, fuerza y funcionalidad del miembro afectado.

Actualmente, los tratamientos de rehabilitación se realizan principalmente mediante técnicas manuales aplicadas por kinesiólogos, complementadas con el uso de equipos convencionales. No obstante, estos métodos pueden presentar limitaciones significativas relacionadas con la precisión en la medición de los rangos de movimiento, la repetitividad de los ejercicios terapéuticos y la personalización de los programas de rehabilitación según las necesidades individuales de cada paciente.

Frente a esta situación, surge la necesidad de diseñar e implementar un sistema automatizado de rehabilitación de codo, con la finalidad de ser apoyo en el proceso de rehabilitación, otorgando una herramienta que pueda controlar y monitorear los movimientos articulares de forma precisa. Este sistema integrará programas especializados de tratamiento que permitirán mejorar la calidad, repetitividad y seguridad de las terapias.

El objetivo principal es apoyar la labor del profesional kinesiólogo y profesionales del área, optimizando el tiempo de atención, mejorando la calidad del tratamiento y contribuyendo a una recuperación más eficiente, objetiva y segura para los pacientes.

En este contexto, el proyecto representa una integración entre la ingeniería aplicada y la práctica clínica, contribuyendo al desarrollo tecnológico dentro del entorno hospitalario y promoviendo la incorporación de sistemas automatizados de rehabilitación que fortalezcan la calidad de la atención y la continuidad del proceso de recuperación de los pacientes.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dentro del Hospital Carlos Van Buren, en el servicio clínico de medicina física y rehabilitación, los pacientes con lesiones de codo requieren de procesos de rehabilitación prolongados, donde la precisión en los ángulos de movimiento y la repetitividad son fundamentales para una recuperación efectiva. En la actualidad, los métodos disponibles se basan en técnicas manuales y equipos convencionales, los cuales presentan limitaciones en cuanto al control, medición objetiva y la profundización de las terapias.

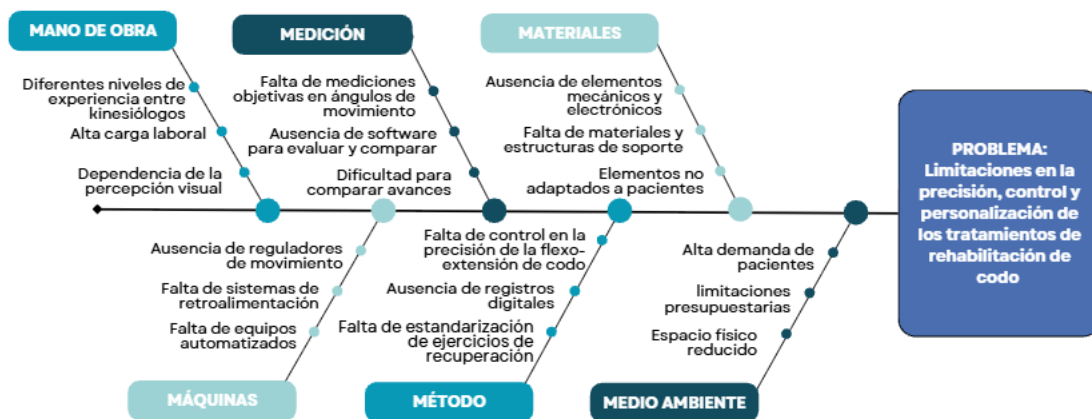
1.1.1 Definición del problema.

El presente proyecto surge de la necesidad de mejorar los procesos de rehabilitación de pacientes con lesiones de codo dentro del Hospital Carlos Van Buren, institución donde se atienden gran cantidad de pacientes con afecciones musculoesqueléticas. En la actualidad, los tratamientos se realizan mediante técnicas manuales aplicadas por kinesiólogos y con equipamiento convencional que no permite una automatización del proceso, ni tampoco una medición precisa de los rangos de movimientos.

Ante este contexto, se propone analizar y definir el problema en cuestión utilizando la metodología del diagrama de Ishikawa, como se puede observar en la figura 1-3. Mediante este diagrama se puede identificar las causas que lo originan, las limitaciones en tratamientos y las consecuencias que generan en un proceso de rehabilitación.

Del diagrama se pueden reconocer 3 etapas: la identificación del problema, las consecuencias y las causas del problema. Dentro de la identificación del problema, se obtiene que el principal problema detectado es las limitaciones en la precisión, control y personalización del tratamiento de rehabilitación de codo en el Hospital, esto se manifiesta en la imposibilidad de medir de forma objetiva los ángulos de movimiento durante la terapia, la falta de repetitividad de los ejercicios y la ausencia de sistemas automatizados que asistan en el proceso de terapéutico. En la identificación de consecuencias del problema, se obtienen datos como retrasos en la

recuperación de los pacientes, debido a la falta de control preciso, resultados terapéuticos dispares producto de la variabilidad entre sesiones o profesionales, la sobrecarga laboral en el servicio clínico, especialmente entre kinesiólogos, ausencia de datos clínicos objetivos y la limitación tecnológica, debido a la falta de integración de sistemas automatizados en el área de rehabilitación. En la etapa de identificación de causas de problema, se puede visualizar por medio de la figura 1-3 las seis categorías que engloban la causa (6Ms), donde se sintetiza que las causas del problema se originan en la combinación de factores humanos, tecnológicos y organizacionales. Esto refuerza la necesidad de desarrollar un sistema automatizado medible que apoye al personal clínico en sus labores.



Fuente: Elaboración propia en Canva.

Figura 1-3. Diagrama Causa-Efecto.

1.1.2 Importancia de resolverlo

Como se sintetiza en el punto anterior (1.1.1), el análisis del diagrama de Ishikawa evidencia que el problema de fondo no solo se debe a una causa, sino a un conjunto de factores

relacionados con los métodos utilizados, la disponibilidad tecnológica y la capacidad de medición del proceso de rehabilitación.

Por lo tanto, el proyecto surge como necesidad de resolver el problema. El desarrollo de un sistema automatizado de rehabilitación de codo, capaz de medir y regular ángulos de movimientos, almacenar datos y ejecutar rutinas de tratamientos personalizados, busca eliminar las principales causas del problema, mejorando el proceso de rehabilitación de codo mediante la precisión, la seguridad y la eficiencia de la terapia, otorgando herramientas al personal clínico de apoyo desde la integración de la ingeniería biomédica y el área clínica.

1.1.3 Involucrados (Stakeholders)

El proyecto involucra a diversas personas e instituciones que se ven directa o indirectamente afectadas por el problema de la falta de automatización y precisión en los procesos de rehabilitación de codo. Estos actores cumplen distintos roles dentro del sistema y su participación resulta clave para el desarrollo e implementación de la solución propuesta.

a) Pacientes en proceso de rehabilitación

Son los principales beneficiados del proyecto, ya que el sistema permitirá realizar terapias de rehabilitación más precisas, personalizadas y seguras. La automatización del control del ángulo de movimiento contribuirá a mejorar la recuperación funcional del codo, reducir los tiempos de tratamiento y facilitar el seguimiento del progreso almacenando informes.

b) Kinesiólogos y personal de rehabilitación

Actualmente, enfrentan sobrecarga laboral y limitaciones técnicas en el control del rango articular durante las terapias. Con el nuevo sistema, contarán con una herramienta de apoyo tecnológico que permitirá estandarizar los tratamientos, optimizar el tiempo por paciente y obtener registros objetivos del proceso de rehabilitación.

c) Hospital Carlos Van Buren

Como institución donde se desarrollará el proyecto, el hospital se beneficiará al mejorar la calidad del servicio de rehabilitación y al integrar tecnología innovadora en su área de

fisioterapia. Esto puede fortalecer su imagen institucional y contribuir a la modernización de sus procesos clínicos.

d) Unidad de Ingeniería Clínica y Mantenimiento Hospitalario

Esta unidad será la encargada de supervisar, validar y mantener el funcionamiento del sistema una vez implementado. Su participación es esencial para asegurar la compatibilidad técnica y la seguridad eléctrica del equipo dentro del entorno hospitalario.

e) Autoridades de salud y administración hospitalaria

Estos actores son responsables de aprobar y facilitar la implementación del sistema dentro del marco regulatorio hospitalario. Su rol es clave para garantizar la correcta adopción del proyecto y su posible réplica en otras áreas o centros de salud.

1.1.4 Consideraciones

Es importante, que las pautas de ejercicio tanto como para lesiones y/o post quirúrgicas no solo significan enfocarse en la articulación como tal, sino que también en otros complementos (hombro, cintura, escapulas y muñeca). En este sentido la terapia es personalizada, basándose en limitaciones y restricciones del paciente.

En la normalidad de la rehabilitación, existen 3 etapas para los ejercicios: ejercicios de movilidad, fortalecimiento y estiramiento. Este proyecto busca ser un apoyo dentro de la rehabilitación dando un enfoque en la movilidad y fortalecimiento de los ejercicios.

En la figura 1-4 se puede visualizar el procedimiento para un ejercicio de movilidad como el flexo y extensión de codo activa. Cabe destacar, que estos ejercicios son supervisados por el personal clínico y kinesiólogos.

4. Flexo y extensión de codo activa

Apoye el codo en una mesa y realice la flexión del codo lentamente hasta tocar el hombro con los dedos y a continuación estire el codo hasta apoyar el dorso de la mano en la mesa.



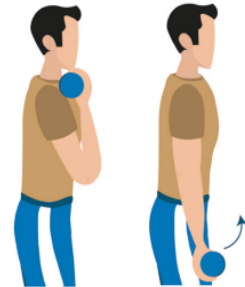
Fuente: <https://svmeifr.com/aplicaciones-de-consulta/>

Figura 1-4. Ejercicios flexo y extensión.

En la figura 1-5 se visualiza imagen de ejercicio de fortalecimiento de flexo-extensores de codo.

7. Fortalecimiento de flexo-extensores de codo

Sentado o de pie. Con el codo estirado, coja con la mano un peso (mancuerna, botella llena de agua...), realice la flexión de codo lentamente hasta tocar el hombro y a continuación estírelo hasta la posición inicial.



Fuente: <https://svmeifr.com/aplicaciones-de-consulta/>

Figura 1-5. Ejercicios fortalecimiento flexo-extensores.

Estos ejercicios son los que se proponen para apoyar el proyecto, ayudando tanto al paciente como al profesional que supervisa, entendiendo que la rehabilitación es un proceso largo y de acompañamiento para el paciente.

1.1.5 Encuesta realizada al personal clínico

Se realizó una encuesta dirigida al personal clínico del Hospital Carlos Van Buren, específicamente a kinesiólogos, enfermeras y técnicos en enfermería (TENS), con el propósito de identificar las principales necesidades, percepciones y problemáticas asociadas al proceso de rehabilitación articular. Su objetivo principal fue evaluar la pertinencia y utilidad potencial de implementar un sistema automatizado para la rehabilitación de la articulación del codo.

Las primeras preguntas (1 a 5) se enfocaron en caracterizar el perfil profesional del encuestado, recopilando información sobre su área de trabajo, años de experiencia y nivel de exposición a terapias musculoesqueléticas. Estos datos permitieron establecer el contexto laboral del personal clínico, así como su familiaridad con los procesos de rehabilitación física y con tecnologías de apoyo al tratamiento.

En una segunda etapa, las preguntas 6 y 7 abordaron directamente las dificultades presentes en la práctica terapéutica diaria. Entre las problemáticas señaladas se encuentran la falta de tiempo para supervisar terapias de manera individualizada, la baja adherencia de algunos pacientes, la limitada disponibilidad de equipamiento tecnológico y la ausencia de herramientas que permitan medir de forma objetiva el progreso motor. Estas respuestas evidencian brechas importantes en los métodos tradicionales de rehabilitación, especialmente en lo referente a precisión, control y registro clínico.

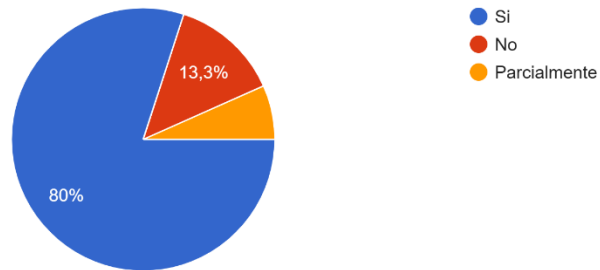
Finalmente, las preguntas 8, 9 y 10 evaluaron la percepción del personal respecto a la posibilidad de automatizar parte del proceso terapéutico, identificando su grado de disposición a incorporar nuevas tecnologías, su apreciación sobre la utilidad de un sistema automatizado y el impacto esperado en la calidad del tratamiento, la eficiencia clínica y la seguridad del paciente.

En la figura 1-6 se presenta la respuesta correspondiente a la pregunta 8, donde se observa que un 80 % del personal clínico considera que un sistema automatizado podría mejorar la

adherencia del paciente al tratamiento. Este resultado confirma la aceptación generalizada del uso de herramientas tecnológicas como complemento terapéutico.

8. ¿Cree que un sistema automatizado podría mejorar la adherencia del paciente al tratamiento?

15 respuestas



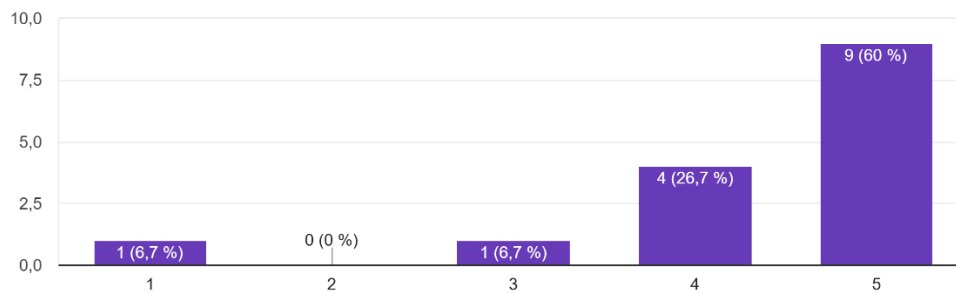
Fuente: <https://docs.google.com/>.

Figura 1-6. Pregunta 8 encuesta.

Por otra parte, en la figura 1-7 se muestran los resultados de la pregunta 9, donde un 60% de los encuestados indica que sería útil disponer de una interfaz visual que permita visualizar parámetros como ángulo de movimiento, progreso terapéutico y tiempos de ejecución. Este hallazgo evidencia la necesidad de contar con sistemas que faciliten el monitoreo objetivo y la toma de decisiones clínicas.

9. ¿Qué tan útil sería una interfaz visual que muestre parámetros como ángulo, progreso y tiempos de terapia?

15 respuestas



Fuente: <https://docs.google.com/>.

Figura 1-7. Pregunta 9 de encuesta.

1.2 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

La solución propuesta debe optimizar el proceso de rehabilitación de la articulación de codo mediante el diseño e implementación de un sistema controlado. Este sistema debe, integrar tecnologías de control y procesamiento de datos para asistir al profesional kinesiólogo, mejorando la repetitividad de los ejercicios, otorgando seguridad y eficiencia en las terapias.

1.2.1 Requerimientos

Para abordar el problema identificado es necesario definir los requerimientos, tanto general y específicos relacionados al tipo de control a utilizar, software y distintos implementos para el proyecto.

1.2.2 Requerimientos funcionales

Entre los requerimientos funcionales se debe tener en cuenta que el sistema:

- Debe controlar el movimiento angular del codo del paciente.
- Debe medir en tiempo real los rangos de movimiento (flexo-extensión).
- Debe permitir la visualización del programa o terapia, contar con una interfaz visual.
- Debe permitir posibilidad de control manual y parada de emergencia.
- Debe permitir posibilidad de programar rutinas.
- Debe emitir informe de terapia.

1.2.3 Requerimientos técnicos

Entre los requerimientos técnicos, se debe tener en cuenta la utilización de:

- Control automatizado, con capacidad de procesamiento y comunicación.
- Servomotores de precisión integrados para control de ángulo y velocidad.
- Pantalla display y teclados.
- Diseño de estructura de bajo costo que sea ergonómica, segura y adaptable al paciente.

1.2.4 Requerimientos Operativos

Entre los requerimientos operativos, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- El sistema debe ser de fácil uso para el personal clínico.
- Debe permitir un mantenimiento técnico sencillo por parte de la unidad de equipos médicos.
- Contar con manual o instrucciones de uso.
- Cumplimiento de las normativas de seguridad eléctrica y equipos médicos.

1.3 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

A continuación, se presentan tres posibilidades de alternativa de solución al problema identificado.

1.3.1 Alternativa 1: No realizar cambios

Consiste en mantener los métodos actuales de rehabilitación manual realizados por los kinesiólogos, con equipos convencionales o manuales disponibles en el hospital.

- Ventajas: no requieren inversión adicional como tampoco capacitación técnica.

- Desventajas: no soluciona el problema de la falta de precisión, repetividad y medición objetiva.

1.3.2 Alternativa 2: Mejorar los equipos actuales

Se plantea optimizar los dispositivos ya existentes, mediante la incorporación de sensores externos que puedan medir el ángulo de movimiento con un software básico para obtener mediciones de las terapias manuales.

- Ventajas: bajo costo de implementación. Permite cierta mejora en obtención de medición.
- Desventajas: no ofrece automatización del proceso como tampoco control activo de movimiento. La precisión depende del operador.

1.3.3 Alternativa 3: Desarrollar un sistema automatizado para rehabilitación de codo

Se propone diseñar e implementar un sistema automatizado controlado por una tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 5 y servomotores, donde se obtiene una medición de movimiento y una interfaz de usuario para control y monitoreo de la terapia.

- Ventajas: Permite medición objetiva y controlada de los movimientos. Mejora la repetividad, personalización de la terapia y registros clínicos. Reduce la carga operativa del kinesiólogo.
- Desventajas: Requiere de inversión inicial en componentes electrónicos y tiempo de desarrollo técnico.

1.3.4 Alternativa seleccionada

En base al análisis comparativo entre las alternativas presentadas, se realiza una tabla aplicando los siguientes criterios de evaluación:

Tabla 1-1. Comparación de alternativas.

Criterio	%	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Innovación	25	5	10	25
Beneficio clínico	25	5	15	25
Factibilidad técnica	20	20	20	20
Costo/beneficio	15	15	9	12
Impacto largo plazo	15	3	6	15
Total %	100	48	60	97

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 1-1 se aprecia la comparación de alternativas. En la tabla, la asignación de puntajes se realizó considerando el grado de cumplimiento de cada alternativa respecto a distintos criterios definidos para el proyecto.

En el criterio de innovación (25%), la alternativa 1 obtuvo 5 puntos debido a que mantiene el método tradicional de rehabilitación sin incorporar nuevas tecnologías. La alternativa 2 obtuvo 10 puntos, ya que incorpora sensores para mejorar la medición del movimiento, representando una mejora respecto al método convencional. Por su parte, la alternativa 3 obtuvo el puntaje máximo de 25 puntos al integrar automatización, control electrónico, monitoreo y una interfaz de usuario, constituyendo una solución tecnológica innovadora para la rehabilitación de codo.

Respecto al beneficio clínico (25%), la alternativa 1 obtuvo 5 puntos debido a que no genera mejoras en la precisión ni en el seguimiento de las terapias. La alternativa 2 alcanzó 15 puntos al permitir la obtención de mediciones objetivas durante la rehabilitación. Sin embargo, la alternativa 3 obtuvo 25 puntos al proporcionar movimientos controlados y repetitivos,

personalización de la terapia y registro de datos clínicos, mejorando significativamente el proceso de rehabilitación.

En el criterio de factibilidad técnica (20%), las tres alternativas obtuvieron 20 puntos, debido a que todas pueden implementarse utilizando recursos, conocimientos y tecnologías disponibles. La alternativa 1 no requiere desarrollo adicional, la alternativa 2 implica modificaciones simples a equipos existentes y la alternativa 3 puede desarrollarse mediante el uso de componentes electrónicos comerciales, como Raspberry Pi, servomotores e interfaces compatibles.

En cuanto al criterio costo/beneficio (15 %), la alternativa 1 obtuvo el máximo puntaje de 15 puntos debido a que no requiere inversión económica. La alternativa 2 obtuvo 9 puntos, ya que implica una inversión moderada para incorporar sensores y software de medición. La alternativa 3 obtuvo 12 puntos porque requiere una inversión inicial mayor; sin embargo, los beneficios obtenidos en automatización, precisión y optimización del trabajo clínico compensan gran parte del costo.

Finalmente, en el criterio impacto a largo plazo (15 %), la alternativa 1 obtuvo 3 puntos debido a que no aporta mejoras futuras al proceso de rehabilitación. La alternativa 2 alcanzó 6 puntos al permitir mejoras limitadas relacionadas con la medición de datos. La alternativa 3 obtuvo el puntaje máximo de 15 puntos, ya que presenta posibilidades de expansión, actualización tecnológica e incorporación de nuevas funcionalidades, aumentando su valor para futuras aplicaciones clínicas.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la alternativa 3 alcanzó un puntaje total de 97 puntos sobre 100, superando ampliamente a las demás opciones evaluadas. Por esta razón, se selecciona como la alternativa más adecuada para el desarrollo del proyecto, ya que ofrece el mejor equilibrio entre innovación, beneficio clínico, viabilidad técnica, costo-beneficio e impacto a largo plazo.

1.3.5 Valor agregado

A diferencia de los equipos convencionales, este sistema no solo ejecuta movimientos controlados, sino que además permite el análisis de avance de los pacientes en cada sesión, permitiendo un seguimiento objetivo y controlado del progreso del paciente. En ese contexto, el valor agregado del proyecto radica en la integración de control automático y medición biomédica en un entorno clínico, aplicando tecnología de bajo costo y con una alta versatilidad.

Su diseño modular y adaptable abre la posibilidad de futuras ampliaciones, como la incorporación de algoritmos de inteligencia artificial, la conexión a plataformas hospitalarias de registro y tratamiento no específico para la rehabilitación de brazo.

De esta manera, no solo se ofrece una herramienta técnica, sino que un modelo innovador que apoya la rehabilitación, potenciando la eficiencia del tratamiento y desarrollo tecnológico dentro del área de la salud pública.

1.4 OBJETIVOS

A continuación, se plantean los objetivos, tanto general y específicos que busca el desarrollo del proyecto.

1.4.1 Objetivo general

El objetivo general es crear y desarrollar un sistema automatizado para la rehabilitación de codo, que sea controlado por la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 5 y servomotores, capaz de medir, controlar, ejecutar y monitorear los movimientos articulares, otorgando seguridad y eficiencia al proceso terapéutico dentro del hospital.

1.4.2 Objetivos específicos

Dentro de los objetivos específicos, se tiene lo siguiente:

1. Analizar los requerimientos clínicos y técnicos asociados al proceso de rehabilitación de codo en el hospital Carlos Van Buren.
2. Diseñar una estructura mecánica y ergonómica para el sistema de rehabilitación, considerando seguridad y confort del paciente.
3. Implementar un sistema de control utilizando Raspberry Pi 5 y servomotores, garantizando precisión del movimiento angular.
4. Desarrollo de una interfaz gráfica de usuario, a través de un display que mediante un teclado permita configurar parámetros para el tratamiento.
5. Validar experimentalmente el funcionamiento del sistema, evaluando su precisión, repetitividad y utilidad clínica.
6. Proponer pautas de uso y mantenimiento para su aplicación segura dentro del entorno hospitalario.

CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

2 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

El desarrollo de la solución materializa la propuesta planteada en el capítulo anterior, integrando diseño mecánico, electrónica, programación y fabricación. En este capítulo se describe el proceso metodológico utilizado para construir el sistema automatizado de rehabilitación de codo, desde la conceptualización del diseño estructural hasta la implementación del control mediante la Raspberry Pi 5. Se abordan los modelos utilizados, la estructura operativa del sistema, los diagramas que explican su funcionamiento y los procedimientos que permiten convertir una necesidad clínica en un dispositivo funcional de apoyo terapéutico. De esta forma, en esta etapa se da forma práctica y técnica a la solución planteada.

2.1 REQUERIMIENTOS PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO

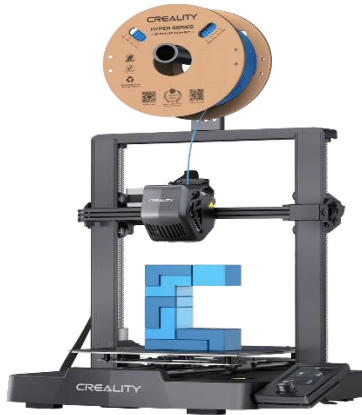
Esta sección establece los criterios funcionales, técnicos y operativos necesarios para construir una solución confiable, segura y útil en un entorno clínico. Los requerimientos, constituyen el marco que orienta el diseño del sistema y aseguran que su desempeño sea coherente con los objetivos del proceso de rehabilitación.

2.1.1 Requerimientos de hardware

En esta sección se describen los componentes electrónicos, mecánicos y de fabricación indispensables para la construcción del dispositivo, destacando el uso de la Raspberry Pi 5, el servomotor MG995 y la estructura impresa en 3D mediante la impresora Ender 3. También se incluyen los periféricos y accesorios que permiten la interacción del usuario con el sistema.

2.1.2 Impresora 3D Ender 3 y filamentos.

La Ender 3 es una impresora 3D de tecnología FDM, destacada por su bajo costo, facilidad de uso y diseño open source, lo que permite realizar modificaciones según las necesidades del usuario. Cuenta con un volumen de impresión de $220 \times 220 \times 250$ mm y utiliza filamento estándar de 1.75 mm, compatible con materiales como PLA, ABS, PETG y TPU. Su estructura de perfiles V-Slot de aluminio garantiza una buena estabilidad y precisión durante el proceso de fabricación. En la figura 2-1 se puede apreciar la impresora y su diseño.



Fuente: <https://store.creality.com/>

Figura 2-1. Impresora Ender 3.

Principales características de la Ender 3:

- Tecnología de impresión FDM.
- Volumen de impresión de $220 \times 220 \times 250$ mm.
- Compatibilidad con filamentos de 1.75 mm.
- Cama caliente para mejorar la adhesión inicial.
- Nivelación manual mediante perillas de fácil ajuste.

Gracias a su mayor capacidad de procesamiento, la Raspberry Pi 5 es una opción robusta para aplicaciones que demandan un desempeño superior, tales como el control de sensores, sistemas de impresión 3D, visión artificial o entornos gráficos livianos.

Características importantes de la Raspberry Pi 5:

- CPU Broadcom BCM2712 de cuatro núcleos ARM Cortex-A76 a 2.4 GHz.
- GPU VideoCore VII, compatible con OpenGL ES 3.1.
- 4 GB de RAM LPDDR4X-4267.
- Puerto USB-C para alimentación con soporte PD.
- 2 puertos USB 3.0 y 2 puertos USB 2.0.
- Salida doble de video mediante 2 micro HDMI, hasta 4K60.
- Conectividad Wi-Fi 802.11ac y Bluetooth 5.0.
- Puerto Gigabit Ethernet.
- Soporte para GPIO de 40 pines, compatible con generaciones anteriores.
- Mejoras en gestión térmica y posibilidad de usar ventilador oficial.
- Sistema operativo recomendado: Raspberry Pi OS (Debian).

2.1.4 El servomotor MG995

El servomotor MG995 es un actuador rotacional de alto torque ampliamente utilizado en proyectos de robótica, automatización y prototipado. Destaca por su robustez, su funcionamiento estable y su caja de engranajes metálicos, que ofrece una mayor durabilidad frente a modelos de plástico. Su diseño permite realizar movimientos precisos dentro de un rango típico de 0° a 180°, controlados mediante señales PWM estándar. En la figura 2-3 se puede apreciar el servomotor MG995.



Fuente: <https://mcielectronics.cl/>

Figura 2-3. Servomotor MG995.

Gracias a su buena relación entre potencia, velocidad y costo, el MG995 es una opción confiable para aplicaciones que requieren fuerza adicional, como mecanismos articulados, sistemas de palancas, brazos robóticos, plataformas móviles y proyectos de control mecánico en general.

Características importantes del servomotor MG995:

- Tipo de servo: Servo estándar de rotación limitada ($\approx 0^{\circ}$ – 180°).
- Par (torque): Aproximadamente 9.4 kg·cm a 4.8V y 11 kg·cm a 6V.
- Velocidad: 0.2 s/ 60° a 4.8V.
- Alimentación: 4.8V – 6.0V.
- Control: Señal PWM estándar (pulso entre 500–2500 μ s).
- Engranajes metálicos, que otorgan mayor resistencia y durabilidad.
- Rodamiento doble para un movimiento más estable.
- Peso aproximado: 55 g.
- Conector estándar de 3 pines: Señal, VCC y GND.

- Uso común en: robótica, mecanismos articulados, brazos robóticos, sistemas de palancas y proyectos de automatización.

2.1.5 Pantalla LCD TFT de 7 pulgadas

La pantalla LCD TFT de 7 pulgadas es un dispositivo de visualización utilizado para la muestra de información gráfica, parámetros de funcionamiento e interfaces de usuario dentro del sistema. Su función principal es permitir la interacción visual entre el usuario y el dispositivo, facilitando el monitoreo.



Fuente: <https://es.aliexpress.com/>

Figura 2-4. Pantalla LCD 7 pulgadas.

Este módulo es compatible con plataformas como la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi y otros dispositivos con salida HDMI. A través de su resolución de alta definición y tamaño compacto, proporciona una visualización clara y cómoda de los datos en tiempo real. En la Figura 2-4 se aprecia la pantalla y la placa compatible con Raspberry.

Características importantes de pantalla LCD:

- Tipo de pantalla: TFT LCD.
- Tamaño: 7 pulgadas.
- Resolución: 1240 x 600 píxeles.
- Interfaz de video: Mini-HDMI.
- Alimentación: 5V DC mediante micro USB.
- Corriente requerida: superior a 1.5 A.
- Compatibilidad: Raspberry Pi, computadores y dispositivos HDMI.
- Interfaz con panel: TTL de 50 pines.

2.1.6 Otros componentes

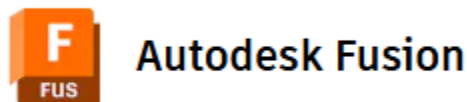
Además de los elementos principales del sistema, se incorporan diversos componentes complementarios que permiten el correcto funcionamiento y la interacción con la Raspberry Pi. Entre ellos se incluye una pantalla display compatible con la Raspberry Pi para la visualización de la interfaz gráfica, un teclado Bluetooth que facilita la operación del sistema sin necesidad de conexiones físicas adicionales, un botón para la parada de emergencia y una tarjeta microSD de 128 GB, utilizada para la instalación del sistema operativo y el almacenamiento del software necesario para el proyecto.

2.1.7 Requerimientos de software

En esta sección se presentan las herramientas digitales utilizadas para el diseño, programación y configuración de la plataforma, incluyendo Fusion 360, Cura 3D, Raspberry Pi OS y Python con sus librerías especializadas. Cada elemento cumple una función esencial en la construcción del sistema, desde la modelación mecánica hasta la automatización del movimiento articular del codo.

2.1.8 Fusion Autodesk 360

Fusion 360 es un software de diseño asistido por computador (CAD) que permite crear modelos 3D paramétricos, ensamblajes y simulaciones. Su entorno integrado facilita el diseño, análisis y exportación de piezas para fabricación digital. En este proyecto se utiliza para diseñar y modelar la estructura mecánica y componentes necesarios para el sistema de rehabilitación. En la figura 2-5 se aprecia el logo de software de fusión 360.



Fuente: <https://www.autodesk.com/>

Figura 2-5. Logo Autodesk Fusion 360.

2.1.9 Ultimaker Cura 3D

Cura es un software de laminado (slicer) utilizado para preparar modelos 3D para impresión en impresoras FDM. Transforma el diseño en un archivo G-code que contiene las instrucciones de movimiento, temperatura y velocidad para la impresora. En el proyecto se utiliza

para configurar, optimizar y generar el archivo de impresión de las piezas diseñadas en Fusion 360. En la figura 2-6 se aprecia logo de software Ultimaker Cura.

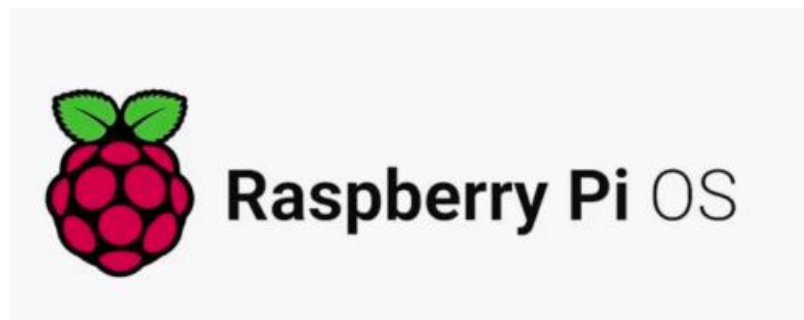


Fuente: <https://ultimaker.com/>

Figura 2-6. Logo Ultimaker Cura 3D.

2.1.10 Raspberry Pi OS (Debian)

Raspberry Pi OS es un sistema operativo basado en Debian, optimizado para las placas Raspberry Pi. Proporciona un entorno estable y ligero, con acceso a herramientas de programación, control de hardware y soporte para interfaces gráficas. En este proyecto funciona como la plataforma principal donde se ejecuta el software de control, permitiendo la gestión del servomotor y la interfaz de usuario. En la figura 2-7 se aprecia logo de software Raspberry Pi OS.



Fuente: <https://www.raspberrypi.com/>

Figura 2-7. Logo Raspberry PI OS.

2.1.11 Python (en Debian) y librerías Tkinter, GPIO y python-docx

Python es un lenguaje de programación versátil y ampliamente utilizado en sistemas embebidos. Permite controlar hardware, crear interfaces gráficas y gestionar datos de manera eficiente. La figura 2-8 se visualiza logo de lenguaje Python.



Fuente: <https://www.python.org/>

Figura 2-8. Logo Python.

Las librerías utilizadas cumplen funciones específicas en el proyecto:

- Tkinter: Permite desarrollar la interfaz gráfica del sistema.
- GPIO: Facilita el control de pines y dispositivos electrónicos, como el servomotor MG995.
- python-docx: Se utiliza para generar automáticamente documentos Word, como reportes o registros de sesiones.

2.2 DIAGRAMAS DE PROYECTO

El diagrama del proyecto constituye una representación visual del funcionamiento lógico y operativo del sistema de rehabilitación desarrollado. En esta sección se presenta el flujo

completo desde el inicio de la terapia, el registro del paciente, la configuración de parámetros clínicos, la verificación de seguridad, la ejecución del control automatizado y la generación de reportes. Esto permite comprender la interacción entre el software, el hardware y el usuario clínico, sirviendo como guía para la programación y validación del sistema.

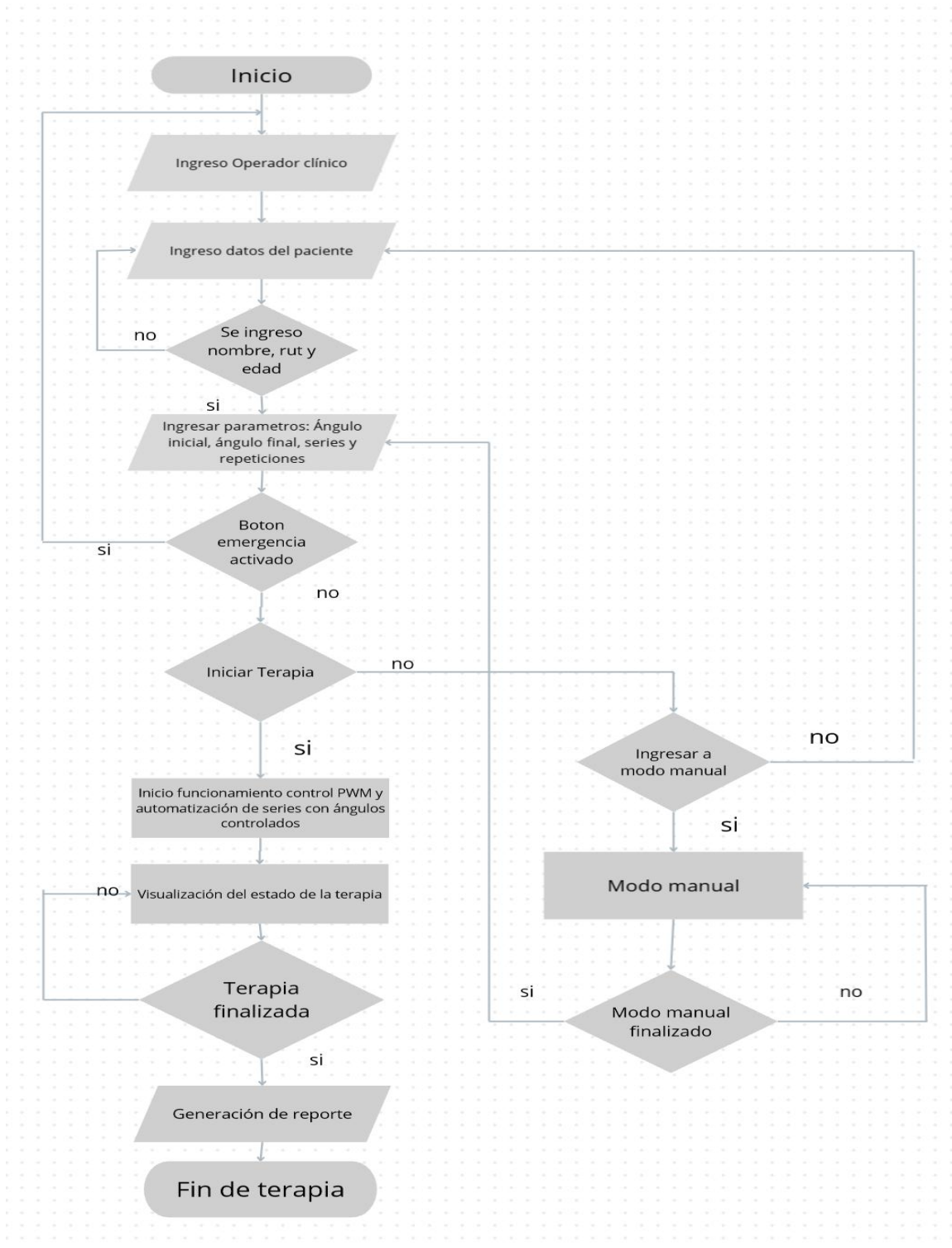
2.2.1 Diagrama de bloque de funcionamiento

El diagrama de flujo representa la secuencia lógica del funcionamiento del sistema de rehabilitación automatizada para codo, desarrollado con Raspberry Pi 5, servomotores y una interfaz gráfica de usuario. El proceso describe cada una de las etapas que realiza el sistema desde el inicio de la sesión terapéutica hasta la generación del reporte final, asegurando control, seguridad y trazabilidad de la terapia aplicada.

La figura 2-9 muestra el diagrama de bloque del sistema, donde se identifican las siguientes etapas:

- Inicio de la terapia: el sistema se inicia y permanece a la espera de la autenticación del usuario responsable de la terapia.
- Ingreso de operador: el acceso del sistema está restringido mediante clave de administrador, permitiendo que únicamente el personal autorizado pueda configurar e iniciar sesión.
- Ingreso de datos del paciente: una vez autenticado el operador, se ingresan los datos del paciente correspondientes a nombre, RUT y edad, información necesaria para identificar correctamente la sesión y mantener trazabilidad.
- Validación de datos: el sistema verifica que los campos de nombre, RUT y edad hayan sido ingresados correctamente, si alguno de estos datos está vacío, el sistema solicita nuevamente la información antes de continuar.

- Selección de parámetros: una vez validada la información del paciente, el operador puede configurar los parámetros de la terapia correspondientes al ángulo inicial, ángulo final, número de series y número de repeticiones. Para garantizar la seguridad del paciente y evitar movimientos fuera del rango permitido, el sistema valida que los ángulos se encuentren dentro de los límites establecidos para el dispositivo. Como alternativa se puede seleccionar el modo manual, donde controla directamente el movimiento mediante la interfaz.
- Verificación del botón de emergencia: antes de iniciar los movimientos, el sistema comprueba el estado del botón de emergencia. Si se encuentra activado, la terapia no puede comenzar hasta que la condición sea reestablecida.
- Ejecución automática de la terapia: cuando todas las validaciones han sido superadas y no existe una condición de emergencia, el sistema inicia la terapia mediante el control PWM del servomotor, ejecutando los movimientos entre el ángulo inicial y el ángulo final de acuerdo con las series y repeticiones configuradas.
- Visualización en tiempo real: durante la ejecución de la terapia, la interfaz gráfica muestra el estado del proceso, el avance de las series y el ángulo instantáneo del servomotor, permitiendo al operador supervisar continuamente la sesión.
- Finalización de la terapia: el sistema verifica si se ha completado el número de series y repeticiones programadas. Mientras la terapia permanezca en ejecución, el ciclo continúa actualizando la información mostrada en la interfaz. Una vez completada la rutina, el proceso finaliza automáticamente.
- Generación del reporte: al finalizar la sesión, el sistema genera automáticamente un informe en formato Microsoft Word, el cual contiene la información del paciente, los parámetros configurados para la terapia y los datos relevantes de la sesión realizada.
- Fin de la terapia: una vez generado el reporte, el sistema retorna al estado inicial, quedando disponible para iniciar una nueva sesión de rehabilitación o para apagar el dispositivo de forma segura.



Fuente: Elaboración propia en Visio.

Figura 2-9. Diagrama de flujo.

2.2.2 Esquema conexión eléctrica

El esquema de conexión eléctrica define la interconexión entre los componentes principales del sistema de rehabilitación, permitiendo el control seguro del servomotor y el funcionamiento de la interfaz gráfica implementada en la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 5. La distribución de las conexiones es diseñada considerando la capacidad de corriente de cada elemento y la estabilidad del sistema durante la ejecución de la terapia.

La Figura 2-10 presenta el diagrama general de conexiones del dispositivo. Se observa que la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 5 es la unidad encargada del procesamiento y control del sistema, mientras que el servomotor MG995 recibe alimentación desde una fuente de alimentación externa de 5 VDC en corriente continua, evitando que la corriente requerida por el actuador sea suministrada directamente por la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi.

Aunque el servomotor utiliza una fuente de alimentación independiente, ambas fuentes comparten una masa común (GND). Para ello, el terminal negativo de la fuente externa se conecta al pin GND de la Raspberry Pi, estableciendo una referencia eléctrica común indispensable para que la señal de control PWM sea interpretada correctamente por el servomotor.

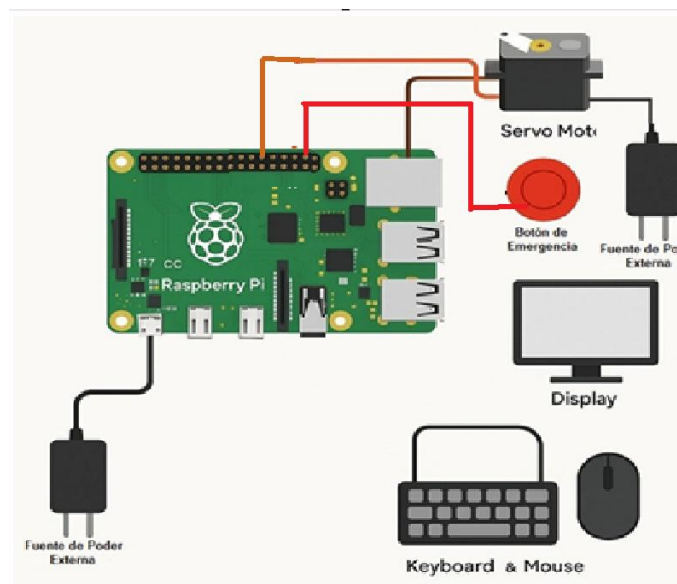
El control del movimiento se realiza mediante la conexión del conductor de señal del servomotor al GPIO 17 de la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi, configurado como salida PWM. A través de este pin se genera la señal que determina la posición angular del actuador durante la ejecución de la terapia.

Asimismo, la pantalla LCD de 7 pulgadas empleada para la interfaz gráfica dispone de una alimentación independiente de 5 VDC en corriente continua, garantizando un suministro estable de energía y evitando incrementar la carga sobre la tarjeta. La comunicación de video entre ambos dispositivos se realiza mediante un cable Mini-HDMI a HDMI, a través del cual la Raspberry Pi transmite la interfaz gráfica desarrollada en Python.

Para facilitar la interacción con el sistema, se incorpora un teclado y un mouse inalámbricos, conectados mediante tecnología Bluetooth a la Raspberry Pi. Estos dispositivos permiten al operador ingresar los datos del paciente, configurar los parámetros de la terapia y supervisar la ejecución del tratamiento desde la interfaz gráfica.

Finalmente, el sistema incorpora un botón físico de parada de emergencia, conectado a una entrada GPIO de la Raspberry Pi. Cuando este botón es accionado, el software detecta inmediatamente el cambio de estado de la entrada digital y detiene el movimiento del servomotor, proporcionando una medida adicional de seguridad para proteger al paciente y al operador durante la terapia.

La utilización de fuentes de alimentación independientes para la Raspberry Pi, el servomotor y la pantalla permite reducir la posibilidad de caídas de tensión, reinicios inesperados o sobrecargas eléctricas, mejorando la estabilidad, confiabilidad y seguridad del sistema durante su funcionamiento.



Fuente: Elaboración propia.

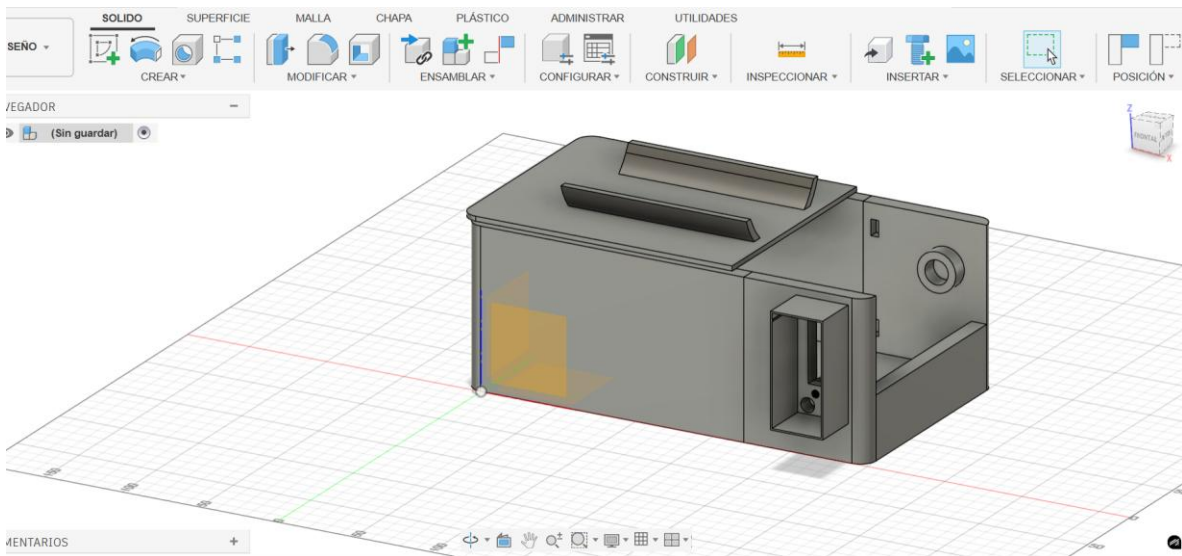
Figura 2-10. Representación de conexión.

2.3 IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE REHABILITACIÓN DE CODO

La implementación del sistema de rehabilitación corresponde a la fase donde se integran todos los componentes diseñados y se ponen en funcionamiento dentro de un entorno real. En esta sección se detalla el proceso de fabricación de la estructura mecánica, la configuración del sistema operativo, la programación del control del servomotor y el montaje completo del dispositivo. Asimismo, se describe la conexión eléctrica, la instalación de librerías, la creación de la interfaz de usuario y la validación de los movimientos en función de los parámetros clínicos programados.

2.3.1 Desarrollo de modelado y preparación para la impresión

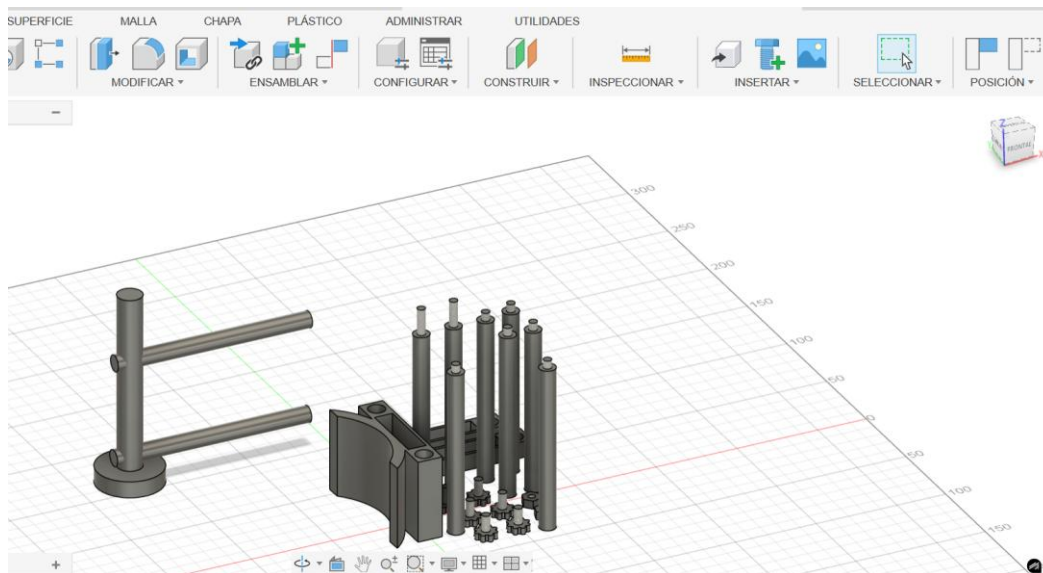
Para el desarrollo del proyecto, se comienza diseñando la estructura de soporte necesaria para poder apoyar el codo y con ello realizar el movimiento angular flexo-extensión del brazo. Se diseña en programa Fusión 360, donde se consideran las medidas de un soporte de 25 cm de largo, 15 cm de ancho y una altura de 10 cm como se puede visualizar en la figura 2-11.



Fuente: Elaboración propia en fusión.

Figura 2-11. Diseño en Fusion soporte principal.

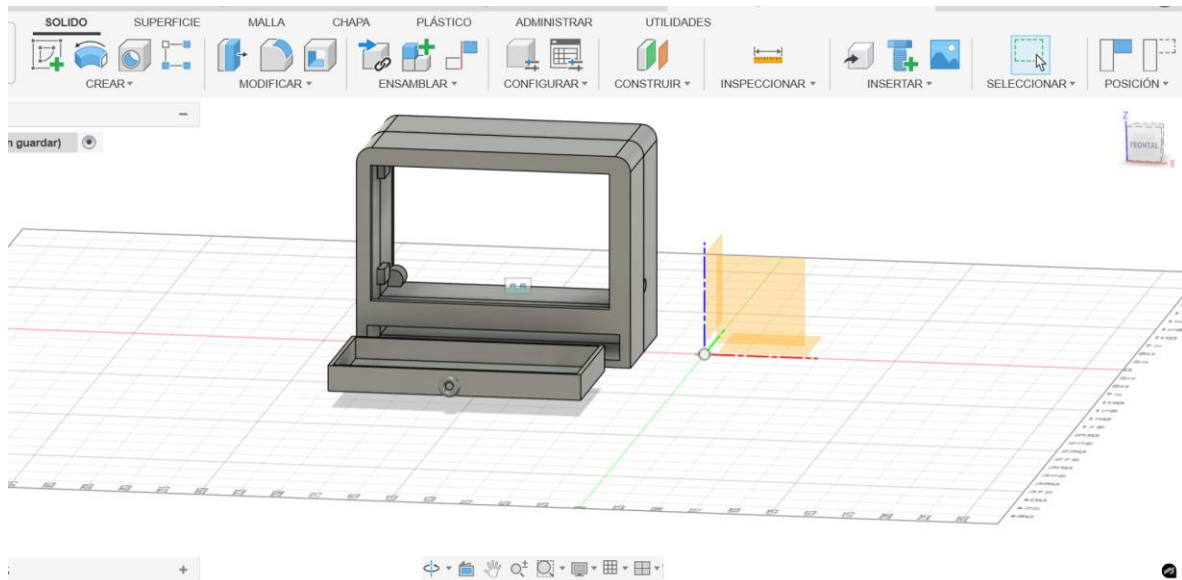
También se diseña la estructura móvil que el servomotor pueda controlar, con sus soportes como muestra la figura 2-12.



Fuente: Elaboración propia en fusión.

Figura 2-12. Diseño en Fusion eje movable.

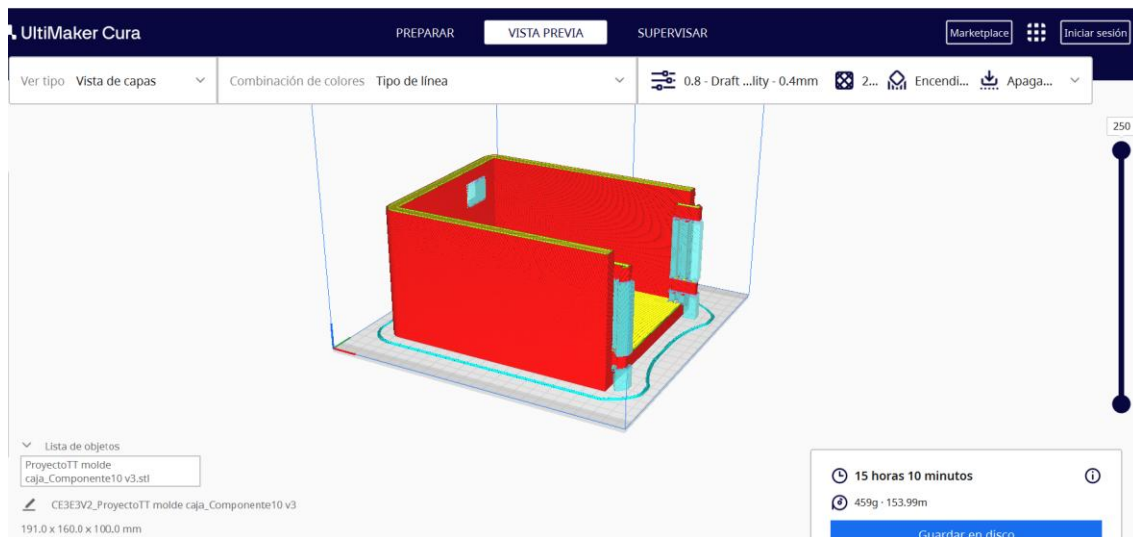
Por último, se diseña una caja para contener la interfaz visual y el teclado como muestra la figura 2-13.



Fuente: Elaboración propia en fusión.

Figura 2-13. Diseño en Fusion caja interfaz.

Luego cada parte diseñada es exportada a un formato STL, donde se abre con programa Cura 3D y se configuran las preferencias a imprimir (tipo de impresora, tamaño boquilla, densidad de relleno, temperatura de filamento, velocidad, entre otros) y se segmenta. Es importante considerar que, dado al tamaño de la impresora, cada cuerpo y componente creado tiene que ser aislado e impreso de manera individual. En la figura 2-14 se visualiza cómo queda la exportación a formato STL y una vez segmentado generado a un formato G-Code, que es el formato adecuado para la impresión.

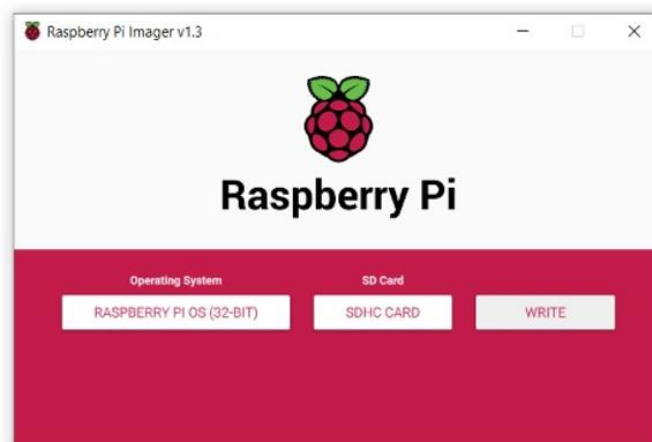


Fuente: Elaboración propia en Ultimater Cura 3D.

Figura 2-14. Diseño en Ultimater Cura.

2.3.2 Configuración de sistema operativo e instalación de librerías

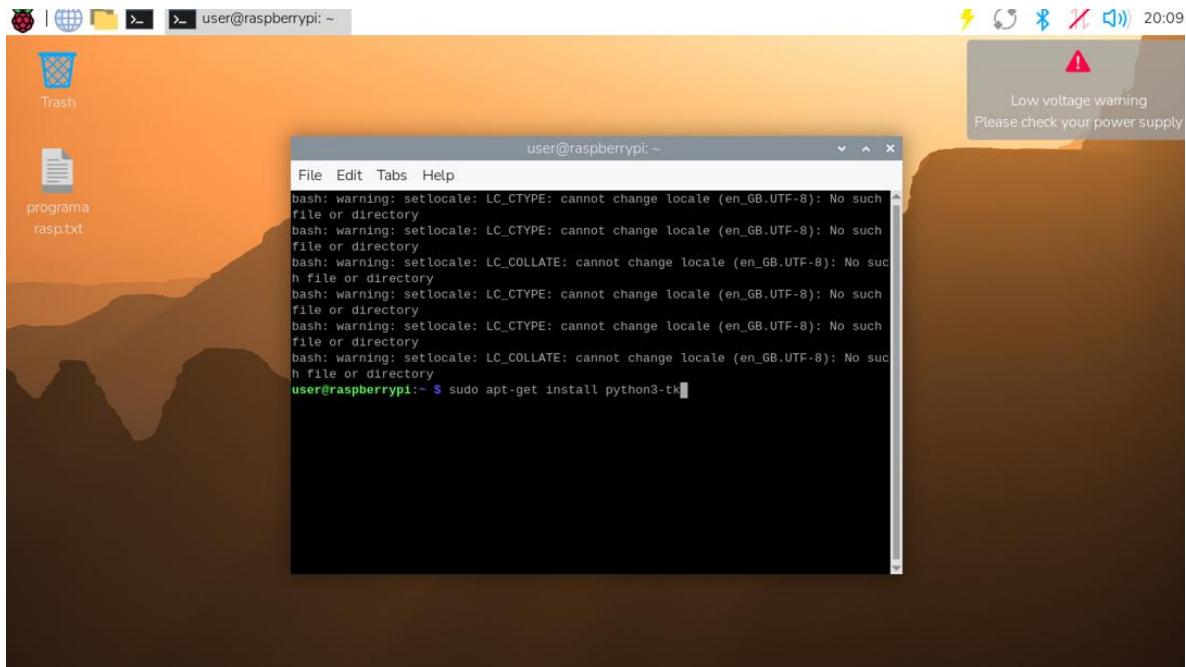
Luego de la impresión de los componentes, se configura la tarjeta SD extraíble que será el sistema operativo de la Raspberry Pi 5. En la figura 2-15 se muestra proceso de instalación de sistema operativo Raspberry Pi OS.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-15. Sistema operativo Raspberry pi OS.

Luego de la instalación de sistema operativo en la Raspberry Pi 5, se inicia el procedimiento de la instalación de librerías necesarias, por medio de cable ethernet conectado a una red y a través de la consola de comandos de sistema operativo Raspberry Pi OS como se muestra en la figura 2-16.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-16. Consola de comandos Raspberry Pi OS.

A través de este método se instalan distintas librerías, tales como:

RPi.GPIO as GPIO: librería para controlar los pines GPIO de la Raspberry Pi.

time: Permite usar retrasos (sleep), medir tiempo y sincronizar movimientos.

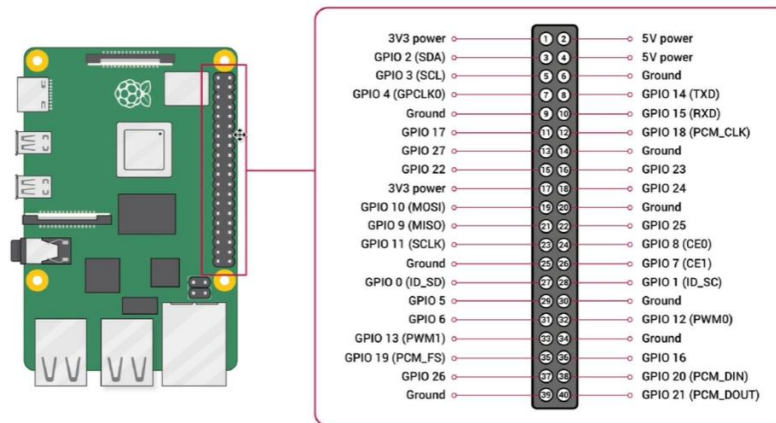
tkinter as tk: la librería nativa de Python para crear interfaces gráficas. Donde ttk permite usar widgets modernos y messagebox para mostrar mensajes emergentes.

from docx import Document: Permite crear archivos Word (.docx).

threading: Permite ejecutar la terapia en un hilo separado sin congelar la interfaz.

2.3.3 Configuración y conexión de servomotor

La conexión del servomotor MG995 a la Raspberry Pi requiere tres cables: el naranja (señal) se conecta al GPIO 17 de la Raspberry Pi; el rojo (VCC) se conecta a 5 VDC de una fuente externa; y el café/negro (GND) se conecta al GND de la fuente externa, uniendo la masa de la fuente externa con la masa de la placa Raspberry (masa común). En la figura 2-17 se muestra el diagrama de distribución de pines de la Raspberry Pi 5 y la conexión recomendada.



Fuente: <https://pinout.xyz/>

Figura 2-17. Distribución pines Gpi Raspberry.

El control del servomotor MG995 se implementa mediante una señal PWM generada desde la Raspberry Pi utilizando Python y la librería RPi.GPIO. La señal PWM opera a una frecuencia de 50 Hz, equivalente a un período de 20 ms, este periodo es utilizado por la mayoría de los servomotores comerciales.

En este tipo de actuadores la posición angular no depende de la frecuencia de la señal, sino del ancho del pulso aplicado dentro de cada período. De manera, un pulso de aproximadamente 0,5 ms posiciona el eje en 0°, un pulso de 1,5 ms corresponde a la posición central (90°) y un pulso de 2,5 ms lleva el eje hasta 180°.

0.5 ms → posición mínima $\approx 0^\circ$

1.5 ms → posición central $\approx 90^\circ$

2.5 ms → posición máxima $\approx 180^\circ$

```

20  detener = False
21  modo_manual = False
22  angulo_manual = 0 # ángulo inicial manual
23
24
25  # Funcionamiento servomotor
26
27
28  def set_angle(angle):
29      """Convierte 180° en 0°, debido a que el servo está invertido físicamente."""
30      angle = 180 - angle
31      duty = 2 + (angle / 18)
32      pwm.ChangeDutyCycle(duty)
33      time.sleep(0.02)
34
35
36  def mover_lento(inicio, fin, paso=1, pausa=0.03, callback=None):
37      global detener
38
39      if inicio < fin:
40          rango = range(inicio, fin + 1, paso)
41      else:
42          rango = range(inicio, fin - 1, -paso)

```

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-18. Programa servomotor.

En la figura 2-18 se presentan las principales instrucciones utilizadas para controlar el servomotor. Las líneas más relevantes son las siguientes:

$\text{angle} = 180 - \text{angle}$

Esta instrucción invierte el sentido del movimiento del servomotor. Debido a la orientación física con la que fue instalado en el prototipo, el movimiento obtenido era contrario al esperado por la interfaz gráfica. Al realizar la operación $180 - \text{ángulo}$, se mantiene la lógica de programación y el usuario continúa ingresando los ángulos de manera convencional, mientras que el sistema compensa automáticamente la inversión mecánica del actuador.

La segunda instrucción del programa corresponde a la conversión del ángulo de posición del servomotor en el Duty Cycle de la señal PWM, mediante la siguiente ecuación:

$$Duty = 2.5 + (\theta \times 0.0555)$$

donde θ representa el ángulo deseado del servomotor en grados.

Esta ecuación permite convertir el ángulo ingresado por el usuario en el porcentaje de Duty Cycle requerido para generar la señal PWM correspondiente. Como se explica anteriormente, el servomotor MG995 opera con una señal PWM de 50 Hz, equivalente a un período de 20 ms, y su posición depende del ancho del pulso aplicado durante cada período.

La Tabla 2-1 presenta la relación entre el ángulo de giro, el ancho del pulso y el Duty Cycle correspondiente. Para obtener el Duty Cycle se utiliza la siguiente expresión:

$$Duty(\%) = \frac{\text{Ancho del pulso}}{\text{Periodo}} \times 100$$

Considerando un período de 20 ms, se obtiene:

Tabla 2-1. Respuesta servomotor.

Ángulo	Pulso	Duty cycle
0°	0.5 ms	0.5/20= 2.5 %
90°	1.5 ms	1.5/20= 7.5 %
180°	2.5 ms	2.5/20= 12.5 %

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la Tabla 2-1 se observa que el servomotor requiere un Duty Cycle mínimo de 2,5 % para alcanzar la posición de 0° y un Duty Cycle máximo de 12,5 % para llegar a 180°. Por lo tanto, el rango total de variación del Duty Cycle es:

$$12.5\% - 2.5\% = 10\%$$

Este incremento corresponde al recorrido completo del servomotor (180°). En consecuencia, el aumento del Duty Cycle por cada grado de movimiento se obtiene dividiendo el rango total entre los 180 grados de recorrido:

$$\frac{10}{180} = 0.0555\%$$

Esto significa que por cada grado que gira el servomotor, el Duty Cycle debe incrementarse aproximadamente un 0,0555 %.

Conociendo el Duty Cycle mínimo (2,5 %) y el incremento por grado (0,0555 %), es posible modelar la relación entre el ángulo y el Duty Cycle mediante una ecuación lineal de la forma:

$$Duty = Duty_{mínimo} + (\theta \times Incremento)$$

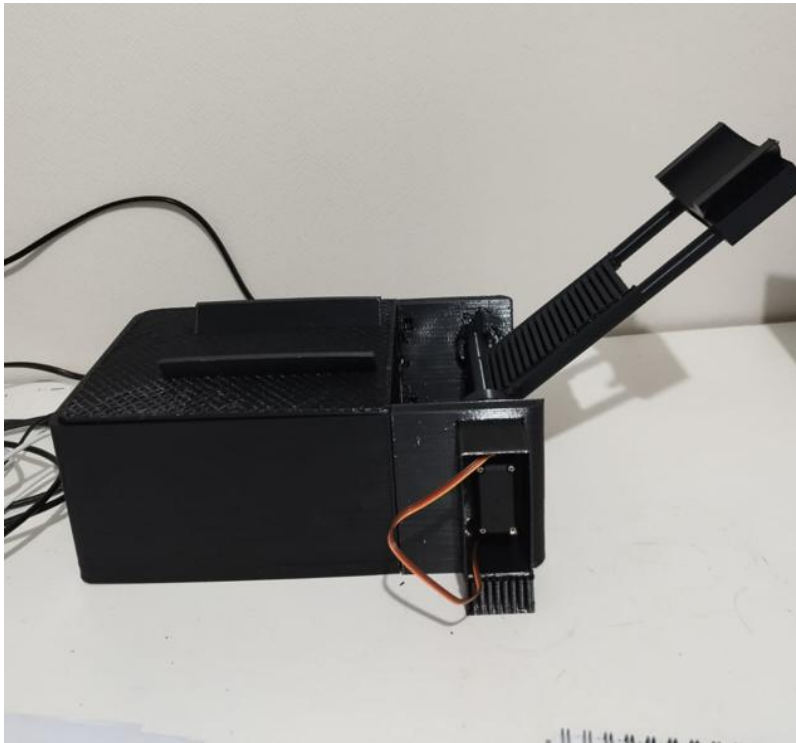
Sustituyendo los valores obtenidos anteriormente, la expresión queda definida como:

$$Duty = 2.5 + (\theta \times 0.0555)$$

Finalmente, esta es la ecuación implementada en el programa para calcular automáticamente el Duty Cycle correspondiente a cualquier ángulo solicitado por el usuario, permitiendo posicionar el servomotor de forma proporcional y precisa dentro de su rango de operación.

2.3.4 Resultado del proyecto

En la figura 2-19 se visualiza el finalizado de la impresión 3D con la incorporación del servomotor y Raspberry Pi 5 para poder probar su correcto funcionamiento.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-19. Prototipo central impreso.

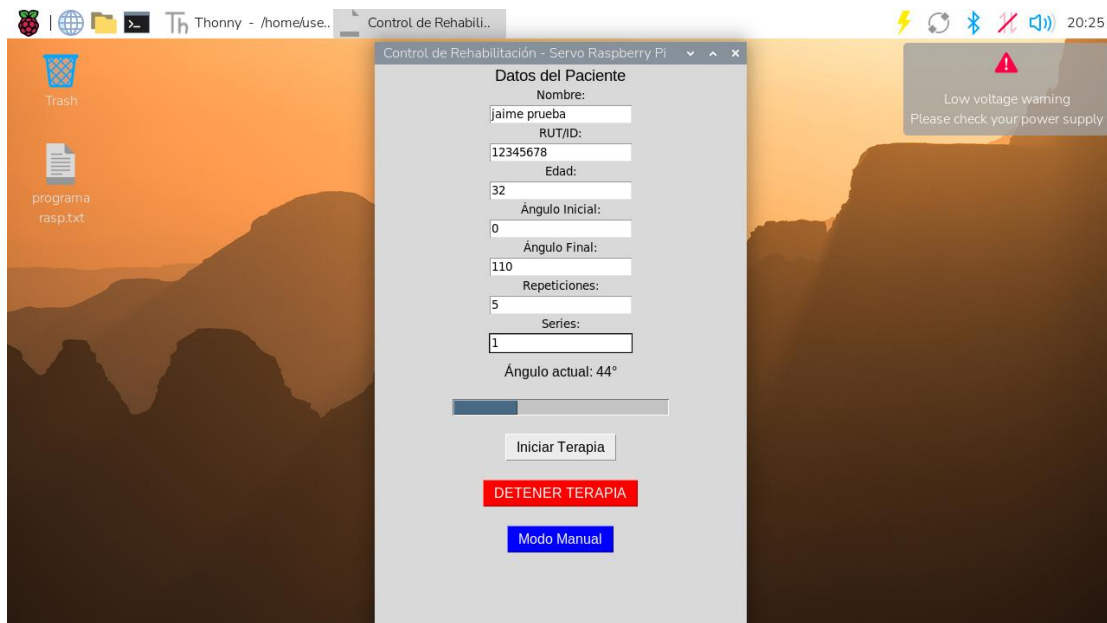
En la figura 2-20 se aprecia la interfaz visual impresa en 3D y enlazada al prototipo central. Se visualiza en procedimiento de terapia activa en tiempo real.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-20. Prototipo de interfaz visual.

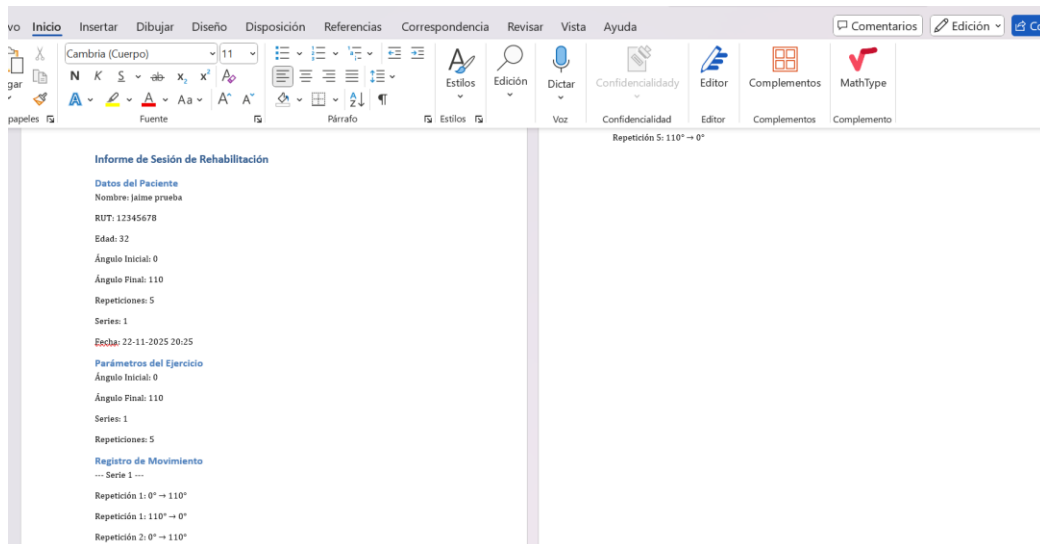
También en la figura 2-21 se aprecia el programa realizado a través de Python en tkinter, donde se puede ingresar nombre de paciente, Rut, edad, ángulo de inicio, ángulo final, repeticiones y series, además, de un control manual y una parada de emergencia a través de software.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-21. Programa diseñado Tkinter.

Una vez finalizada la terapia se genera un informe a través del programa Python y la librería Docx, donde se obtienen datos de paciente y de la terapia, como se puede observar en la figura 2-22.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-22. Generación de reporte.

2.4 CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD

Con el propósito de proteger al paciente y al operador durante la ejecución de las terapias, el sistema incorpora diversas medidas de seguridad implementadas tanto a nivel de software como de hardware. Estas medidas permiten reducir el riesgo de movimientos fuera del rango terapéutico y detener el funcionamiento ante situaciones imprevistas.

2.4.1 Limitación del rango de movimiento

El sistema establece un límite máximo de 120° para el movimiento del servomotor durante la terapia. Este valor fue definido para evitar que el mecanismo sobrepase el rango de movimiento considerado seguro para el prototipo, reduciendo el riesgo de generar una hiperextensión o una posición incómoda para el paciente.

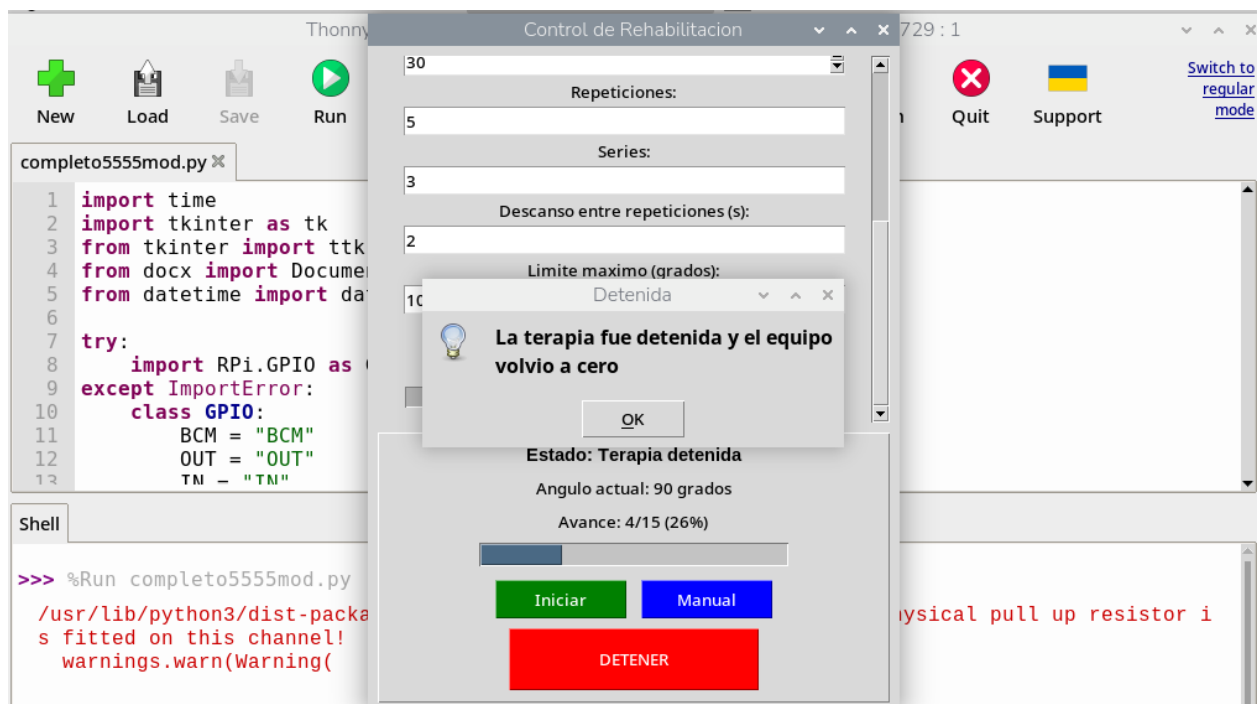
Además de limitar físicamente el movimiento durante la ejecución de la terapia, el software valida los parámetros ingresados por el operador, impidiendo configurar ángulos superiores a 120°. De esta forma, cualquier valor que exceda este límite es rechazado antes de iniciar la sesión, garantizando que el dispositivo opere únicamente dentro del rango permitido.

2.4.2 Botón de parada de emergencia físico

El sistema incorpora un botón físico de parada de emergencia conectado a la Raspberry Pi mediante una entrada GPIO. Cuando este botón es accionado, el movimiento del servomotor se detiene inmediatamente, interrumpiendo la terapia para proteger al paciente frente a cualquier situación inesperada, como molestias, fallas mecánicas o errores de operación.

2.4.3 Parada de emergencia mediante software

Como medida de seguridad adicional, la interfaz gráfica dispone de un botón de detención que permite al operador finalizar la terapia de forma inmediata desde la aplicación. Esta función proporciona un segundo mecanismo de detención cuando el operador detecta una condición que requiere suspender el tratamiento, sin necesidad de utilizar el botón físico. En la figura 2-23, se aprecia la terapia detenida mediante el botón de emergencia del software.



Fuente: Elaboración propia.

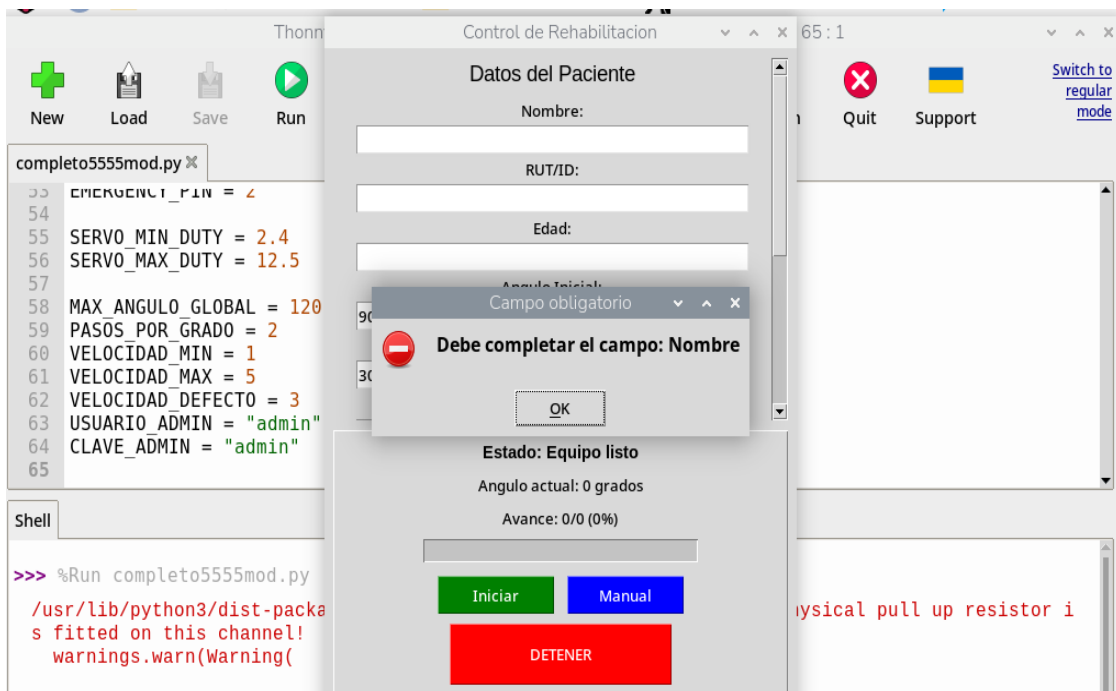
Figura 2-23. Terapia detenida por botón emergencia de software.

2.4.4 Validación de parámetros antes de iniciar la terapia

Antes de comenzar una sesión, el software verifica que se hayan ingresado correctamente los datos del paciente (nombre, RUT y edad), además de los parámetros de la terapia, tales como

ángulo inicial, ángulo final, número de series y repeticiones. Si alguno de estos datos es inválido o se encuentra fuera de los límites permitidos, el sistema impide el inicio de la terapia hasta que la información sea corregida.

En la figura 2-24, se visualiza la verificación de software de los parámetros de la terapia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-24. Verificación parámetros de la terapia.

CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN ECONÓMICA

3 EVALUACIÓN ECONÓMICA

La evaluación económica tiene como objetivo estimar los costos asociados a la implementación del sistema automatizado de rehabilitación de codo, considerando los recursos necesarios desde la perspectiva de una empresa u hospital que decida adoptar esta solución. El análisis económico contempla los costos de hardware, software, recursos humanos y otros costos asociados que permiten determinar la viabilidad económica del proyecto.

3.1 COSTOS DEL PROYECTO

La definición de los costos tiene como objetivo identificar, estimar y analizar los costos asociados a la implementación del sistema propuesto, con el fin de determinar la inversión total requerida. Para ello, se realiza un desglose detallado de los costos de hardware, software, recursos humanos y otros costos adicionales, se consideran los valores referenciales de mercado expresados en unidad de fomento chilena (UF), que 1 de abril de 2026 se encuentra en 39,841.72 pesos (CLP).

3.1.1 Costos de hardware

Los costos de hardware se presentan en la tabla 3-1, donde se describen los componentes requeridos para la implementación del sistema, junto con una estimación de costos unitarios y totales. Los valores corresponden a precios del mercado referenciales en moneda nacional (UF).

Tabla 3-1.Costos de Hardware.

Descripción	Cantidad	Costo unitario (UF)	Costo total (UF)
Raspberry Pi 5 (4GB)	1	2,03	2,03
Servomotor MG995	1	0,12	0,12
Fuente de alimentación 5VDC	2	0,20	0,40
Pantalla display (compatible)	1	0,56	0,56
Teclado bluetooth	1	0,49	0,49
Botón emergencia	1	0,06	0,06
Filamentos PLA 1.75 mm 1 KG	2	0,32	0,65
Tarjeta microSD 128 GB	1	0,46	0,46
Cables, conectores y tornillería	-	0,25	0,25
TOTAL			5,02

Fuente: Elaboración propia.

El costo total de los componentes de hardware es de 5,02 (UF).

3.1.2 Costos de software

El proyecto se desarrolla utilizando exclusivamente software de código abierto y licencias de uso educacional, lo cual constituye una ventaja económica relevante. En consecuencia, no se incurre en costos asociados a licencias de software para la implementación del sistema, permitiendo reducir significativamente la inversión total del proyecto. En la tabla 3-2 se describen los costos asociados al software.

Tabla 3-2. Costos de software.

Software	Costo (CLP)
Autodesk fusión 360	Licencia Educacional (sin costo)
Ultimaker Cura	Software libre
Raspberry pi OS	Software libre
Python y librerías	Software libre

Fuente: Elaboración propia.

El costo total de software corresponde a 0 (UF).

3.1.3 Costos de recursos humanos

Para la evaluación económica del proyecto se estimaron los costos asociados al recurso humano requerido para el diseño, desarrollo e implementación del dispositivo de rehabilitación. La estimación de las horas de trabajo se realizó a partir de la planificación temporal del proyecto presentada en la Carta Gantt (Tabla 3-6), considerando el tiempo efectivo destinado a las principales actividades del proyecto, tales como el diseño mecánico, el desarrollo del software de control, la integración electrónica, las pruebas funcionales y la elaboración de la documentación técnica. Cabe señalar que las horas estimadas corresponden al tiempo efectivo de trabajo invertido en cada actividad y no a la duración total del proyecto, debido a que varias de ellas se ejecutaron de forma paralela.

Para la valorización del recurso humano se consideró una tarifa referencial de \$12.000 CLP por hora para un profesional del área de ingeniería, correspondiente al perfil de Ingeniero en Automatización y Control Industrial o Ingeniero Electrónico, encargado del diseño mecánico asistido por computador (CAD), la programación del sistema de control, la integración electrónica y la puesta en marcha del prototipo. Esta tarifa fue definida a partir de la remuneración promedio observada para profesionales del área de ingeniería en Chile, publicada por el portal Mi Futuro del Ministerio de Educación y complementada con antecedentes del Observatorio Laboral del

Servicio Nacional de Capacitación y Empleo (SENCE), ajustando posteriormente el valor a una tarifa horaria referencial para efectos de la evaluación económica.

Para las actividades de validación clínica y funcional del dispositivo se consideró una tarifa referencial de \$10.000 CLP por hora para un profesional kinesiólogo. Este valor se estableció considerando las remuneraciones promedio informadas para kinesiólogos en Chile por el portal Mi Futuro y antecedentes del Observatorio Laboral SENCE, ajustando el costo a una prestación profesional por horas. La participación del kinesiólogo comprende la supervisión de las pruebas funcionales, la verificación de los rangos de movimiento y la validación del funcionamiento del dispositivo desde el punto de vista terapéutico.

Las tarifas horarias utilizadas corresponden a valores referenciales empleados exclusivamente para la evaluación económica del proyecto. Su finalidad es estimar el costo asociado al desarrollo del prototipo considerando el tiempo efectivo de participación de cada profesional, sin representar necesariamente una contratación efectiva ni un valor contractual de mercado.

Tabla 3-3. Costos recursos humanos.

Actividad	horas estimadas	Valor hora (UF)	Costo total (UF)
Diseño mecánico y modelado 3D	30	0,3012	9,036
Programación y desarrollo software	40	0,3012	12,048
Integración electrónica y montaje	20	0,3012	6,024
Pruebas y validación funcional	20	0,2510	5,02
Documentación técnica	10	0,3012	3,012
Total RR.HH. estimado			35,14

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 3-3, el costo total estimado de los recursos humanos asciende a 35,14 UF, valor que representa el esfuerzo técnico requerido para el diseño, desarrollo, integración, validación y documentación del prototipo, considerando las horas de trabajo estimadas y las tarifas referenciales definidas para cada perfil profesional.

3.1.4 Otros Costos

Se consideran costos adicionales relacionados con el uso del sistema y su puesta en marcha, que son:

- Consumo eléctrico durante las pruebas, impresión y operación inicial.
- Mantenimiento preventivo básico.
- Introducción al funcionamiento y software.

Estos costos se estiman en un monto global aproximado de 2,51 (UF). El determinado aparente se obtuvo midiendo alza de consumo eléctrico, filamentos para impresión adicionales, horas soldando y realizando pruebas de seguridad.

3.1.5 Costo total del proyecto

Sumando los ítems anteriormente descritos, el costo total estimado para la implementación del sistema como se visualiza en la tabla 3-4.

Tabla 3-4. Costos totales

Ítem	Costo (CLP)	Costo (UF)
Hardware	\$200.015	5,02 UF
Software	\$0	0,00 UF
Recursos Humanos	\$1.393.993	35,14 UF
Otros costos	\$100.000	2,51 UF
Total	\$1.700.008	42,67 UF

Fuente: Elaboración propia.

Al sumar, se obtiene que el costo total estimado del proyecto es de 42,67 UF.

3.2 ANÁLISIS FINANCIERO

Para el análisis financiero se considera que el sistema de rehabilitación de codo es un producto comerciable dirigido a instituciones de salud. La evaluación se basa en los ingresos generados por venta, junto a los costos de producción y la proyección de la demanda.

Para determinar viabilidad económica, se utilizan indicadores como valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR) los cuales permiten evaluar rentabilidad del proyecto en el tiempo. Además, el periodo de recuperación de la inversión (Payback) con el fin de estimar el tiempo necesario para recuperar el capital inicial.

3.2.1 Inversión inicial

La inversión inicial del proyecto corresponde al desembolso realizado en el año 0, e incluye costos de hardware, recursos humanos y otros costos asociados a la implementación del sistema. El monto total de la inversión inicial asciende a:

- Inversión inicial (Año 0): \$1.700.008 CLP

Este valor se considera como un flujo de caja negativo inicial y en UF

- Inversión inicial (Año 0): -42,67 UF

3.2.2 Precio venta

El precio de venta se determina a partir del análisis que considera los gastos de producción como criterios de mercado y posicionamiento del producto.

Se establece como base el costo unitario de fabricación estimado \$300.000 CLP (7.53 UF) que incluye materiales, componentes y costos asociados a la producción del dispositivo. Sobre

este costo, se aplica el margen de utilidad necesario para garantizar la sostenibilidad económica del proyecto, cubriendo costos indirectos (como logísticos, soporte técnico, comercialización y posible garantía) y generar rentabilidad. Se adopta un precio de venta de \$450.000 (11.29 UF) lo que corresponde a un margen de 50 % de costo de producción.

- Precio de venta: \$450.000 CLP o 11,29 UF.

3.2.3 Horizonte de evaluación y tasa de descuento

Para el análisis financiero se considera:

- Horizonte de evaluación: 5 años
- Tasa de descuento anual: 15 %

El horizonte de evaluación de cinco años se seleccionó considerando la vida útil esperada del dispositivo, la obsolescencia tecnológica de los componentes electrónicos utilizados y el período durante el cual el equipo puede operar con un mantenimiento preventivo adecuado, antes de requerir una actualización tecnológica o su reemplazo. Este horizonte permite evaluar la recuperación de la inversión inicial y estimar los beneficios económicos esperados durante un período representativo de operación.

Para la evaluación financiera se adopta una tasa de descuento anual del 15 %, utilizada para actualizar los flujos de caja futuros a valor presente en el cálculo de indicadores como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). La tasa de descuento representa el costo de oportunidad del capital, es decir, la rentabilidad mínima esperada por un inversionista al destinar recursos a este proyecto en lugar de invertirlos en una alternativa de riesgo similar.

La selección de una tasa del 15 % se fundamenta en que el presente prototipo corresponde al desarrollo de un tecnológico orientado al área de la rehabilitación, cuya implementación y eventual comercialización presentan un nivel de incertidumbre asociado a factores como la validación técnica, la aceptación por parte de los usuarios, la evolución tecnológica de los

componentes y el comportamiento futuro del mercado. En consecuencia, se adopta una tasa del 15 % como un valor conservador y representativo para evaluar la viabilidad económica del proyecto.

3.2.4 Proyección de ventas

La proyección de ventas se estima con un crecimiento progresivo en el horizonte propuesto de 5 años como se muestra en la tabla 3-5.

Tabla 3-5. Proyección de ventas.

Año	Unidades
1	10
2	15
3	20
4	25
5	30

Fuente: Elaboración propia.

3.3 FLUJOS DE CAJA DEL PROYECTO

La evaluación económica del proyecto se realiza mediante la elaboración de un flujo de caja puro, un flujo de caja con financiación y un análisis de sensibilidad. El flujo de caja puro permite determinar la rentabilidad del proyecto suponiendo que la totalidad de la inversión es financiada con recursos propios. Por su parte, el flujo de caja financiado incorpora un préstamo de largo plazo, permitiendo analizar el efecto del endeudamiento sobre la rentabilidad y la capacidad de pago del proyecto.

El horizonte de evaluación corresponde a cinco años e incluye la inversión inicial, los costos de operación, los ingresos obtenidos mediante la comercialización del dispositivo, el servicio de mantenimiento preventivo, la depreciación de los activos fijos y su valor residual al término del periodo de análisis.

Todos los valores se expresan en Unidades de Fomento (UF), utilizando como referencia el valor oficial de la UF al 1 de abril de 2026, correspondiente a \$39.841,72. La utilización de esta unidad permite disminuir el efecto de la inflación sobre la evaluación y facilita la comparación de los flujos proyectados durante los cinco años.

La inversión inicial asciende a 52,21 UF y está compuesta por 42,67 UF destinadas al diseño, desarrollo y puesta en marcha del proyecto, además de 9,54 UF correspondientes a la adquisición de activos fijos. Estos activos incluyen una impresora 3D, una estación de soldadura y herramientas de montaje electrónico, elementos necesarios para la fabricación y ensamblaje del dispositivo, pero que no forman parte del producto final comercializado.

Para representar la pérdida de valor de los activos durante su utilización, se aplica el método de depreciación lineal. Este método distribuye uniformemente el valor depreciable de cada activo durante su vida útil, definida en cinco años. Además, se considera un valor residual equivalente al 10 % de su valor de adquisición.

La depreciación anual se calcula mediante la siguiente expresión:

$$D = \frac{V_i - V_r}{n}$$

Donde D corresponde a la depreciación anual, V_i al valor inicial del activo, V_r al valor residual y n a la vida útil.

Como se observa en la Tabla 3-6, la depreciación anual total de los activos fijos alcanza las 1,72 UF. Al finalizar el quinto año se considera un valor residual total de 0,96 UF, correspondiente al monto que podría recuperarse mediante la venta, reutilización o disposición de los activos empleados en el proyecto.

Tabla 3-6. depreciación de activos fijos.

Activo fijo	Valor (UF)	Vida útil (años)	Valor residual (UF)	Depreciación anual (UF)
Impresora 3D Ender 3 V3 SE	5,77	5	0,58	1,04
Estación de soldadura	2,01	5	0,20	0,36
Herramientas de montaje electrónico	1,76	5	0,18	0,32
Total	9,54		0,96	1,72

Fuente: Elaboración propia.

El flujo también incorpora los ingresos provenientes del servicio de mantenimiento preventivo ofrecido como parte del servicio posventa. Para este servicio se establece un valor anual de 2 UF por dispositivo, equivalente aproximadamente a cinco horas de trabajo de un profesional del área de ingeniería. Las actividades consideradas comprenden la inspección general, calibración, verificación del funcionamiento y ejecución de la pauta de mantenimiento preventivo.

Los ingresos por mantenimiento se incorporan desde el segundo año, debido a que corresponden a los equipos comercializados durante el periodo anterior. Por ejemplo, durante el segundo año se consideran los ingresos por la venta de 15 dispositivos, además del mantenimiento de los 10 equipos vendidos durante el primer año.

3.3.1 Flujo de caja puro

El flujo de caja puro evalúa el proyecto suponiendo que la totalidad de la inversión inicial es cubierta mediante recursos propios, sin recurrir a créditos ni otras fuentes de financiamiento externo. En consecuencia, este flujo no incorpora pagos de intereses ni amortizaciones de deuda.

La proyección considera una demanda inicial de 10 unidades durante el primer año, aumentando progresivamente a 15, 20, 25 y 30 unidades durante los años siguientes. El precio de venta se mantiene en 11,295 UF por dispositivo, equivalente a \$450.000.

Los ingresos aumentan desde 113 UF durante el primer año hasta 389 UF en el quinto año. Este crecimiento se explica por el incremento proyectado de las unidades comercializadas y por la incorporación del servicio anual de mantenimiento preventivo desde el segundo año.

Los costos totales también aumentan a medida que crece la producción, pasando de 76 UF durante el primer año a 228 UF durante el quinto año. A pesar de este incremento, el margen bruto permanece positivo durante todo el horizonte de evaluación, alcanzando 161 UF en el último año.

UF DIA 01-04-2026 \$39.842
PRECIO DE VENTA EN CLP \$450.000
PRECIO DE VENTA EN UF (P) 11,295
venta anuales 10

	PERIODO ANUAL	0	1	2	3	4	5
	NUMERO DE VENTAS (Q)		10	15	20	25	30
	PRECIO DE VENTA (P) EN UF		11,295	11,295	11,295	11,295	11,295
+	Ingresos x vtas		113	189	256	322	389
-	Costos Fijos		-75	-113	-151	-188	-226
-	Costos Variables		-1	-1	-1	-2	-2
-	total costos		-76	-114	-152	-190	-228
=	margen bruto (Ingreso - costo)		37	76	104	133	161
-	Intereses LP						
-	Intereses CP						
-	Depreciaciones		-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0
+/-	Dif x vta de activos a VL						1
-	Pérdidas ejercicio anterior						
=	Utilidad Antes de Impto		35	74	102	131	160
-	impto % (25%)		-9	-18	-26	-33	-40
=	Utilidad Desp Impto		26	55	77	98	120
+	Pérdidas ejercicio anterior						
+	Depreciaciones		2	2	2	2	2
-	Amortización LP						
-	Amortización CP						
-	capital de trabajo						
-	Inversion en puesta en marcha	-43					
-	Inversion en maquinaria	-10					
+	devolucion del capital de trabajo						
+	Vta activos a VL						
=	Total Anual	-52	28	57	79	100	122
+	Préstamo LP						
+	Préstamo CP						
=	Flujo Neto de Caja (FCN)	-52	28	57	79	100	122
	Flujo de caja ACTUALIZADO	-52	25	43	52	57	61
	Flujo de caja ACTUALIZADO Y ACUMULADO	-52	-28	16	67	124	185

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-1. Flujo de caja puro.

La figura 3-1 visualiza el flujo de caja puro calculado. El flujo neto de caja presenta un desembolso inicial aproximado de 52 UF y resultados positivos desde el primer año de operación. Aplicando una Tasa Mínima Atractiva de Retorno TMAR del 15 %, se obtienen los siguientes indicadores:

- VAN: 185 UF.
- TIR: 94 %.
- Periodo de recuperación: año 2.
- Índice de Valor Actual Neto: 3,544.

El VAN positivo indica que el proyecto genera valor por sobre la rentabilidad mínima exigida. Asimismo, la TIR de 94 % supera ampliamente la TMAR del 15 %, evidenciando una rentabilidad favorable. El periodo de recuperación muestra que la inversión inicial se recuperaría durante el segundo año de funcionamiento. En la figura 3-2 se aprecian los resultados de indicadores para el flujo de caja puro.

TMAR	15%
VAN	185
TIR	94%
PAYBACK	año 2
IVAN	3,544

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-2. resultados de indicadores para flujo de caja puro.

3.3.2 Flujo de caja con financiación

El flujo de caja financiado evalúa el proyecto incorporando un préstamo de largo plazo por 42 UF, equivalente a aproximadamente el 80 % de la inversión inicial. El financiamiento se proyecta a cinco periodos anuales, con una tasa de interés del 18 % y cuotas aproximadas de 14 UF.

La estructura de pago considera una amortización creciente, desde 6 UF durante el primer año hasta 11 UF en el quinto año. Paralelamente, los intereses disminuyen desde 7,63 UF hasta 2,07 UF, debido a la reducción progresiva del saldo pendiente del préstamo.

La incorporación del financiamiento disminuye el desembolso inicial realizado con recursos propios. Después de recibir el préstamo, el aporte inicial requerido por los inversionistas se reduce a aproximadamente 11 UF. No obstante, durante los años siguientes el proyecto debe cubrir el pago de los intereses y la amortización de la deuda.

UF DIA 01-04-2026 \$39.842
PRECIO DE VENTA EN CLP \$450.000
PRECIO DE VENTA EN UF (P) 11,295

	PERIODO ANUAL	0	1	2	3	4	5
	NUMERO DE VENTAS (Q)		10	15	20	25	30
	PRECIO DE VENTA (P) EN UF		11,295	11,295	11,295	11,295	11,295
+	Ingresos x vtas (P*Q)		113	189	256	322	389
-	Costos Fijos		-75	-113	-151	-188	-226
-	Costos Variables		-1	-1	-1	-2	-2
-	total costos		-76	-114	-152	-190	-228
=	margen bruto (Ingreso - costo)		37	76	104	133	161
-	Intereses LP		-8	-7	-5	-4	-2
-	Intereses CP						
-	Depreciaciones		-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0
+/-	Dif x vta de activos a VL						1
-	Pérdidas ejercicio anterior						
=	Utilidad Antes de Impto		27	67	97	127	158
-	impto % (25%)		-7	-17	-24	-32	-39
=	Utilidad Desp Impto		21	50	73	95	118
+	Pérdidas ejercicio anterior						
+	Depreciaciones		2	2	2	2	2
-	Amortización LP (largo plazo)		-6	-7	-8	-10	-11
-	Amortización CP (corto plazo)						
-	capital de trabajo						
-	Inversion en puesta en marcha	-43					
-	Inversion en maquinaria	-10					
+	devolucion del capital de trabajo						
+	Vta activos a VL						
=	Total Anual	-53	17	45	66	87	109
+	Préstamo LP	42					
+	Préstamo CP						
=	Flujo Neto de Caja (FCN)	-11	17	45	66	87	109
	Flujo de caja ACTUALIZADO	-11	14	34	44	50	54
	Flujo de caja ACTUALIZADO Y ACUMULADO	-11	4	38	82	132	186

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-3. Flujo de caja con financiación.

En la figura 3-3, se visualiza el diagrama de flujo completo con financiación, mientras que en la tabla 3-7, se aprecia el detalle de amortización del financiamiento.

- Monto: 42 UF.
- Interés: 18 %.

Tabla 3-7. Detalle de amortización del financiamiento.

periodos	saldo	interés	amortización	cuota
1	36	7,63	6	14
2	29	6,57	7	14
3	21	5,31	8	14
4	11	3,82	10	14
5	0	2,07	11	14

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3-4 se visualizan los resultados de los indicadores de flujo de caja con financiamiento. De esta figura se visualiza que, considerando una TMAR del 15 %, los resultados del flujo financiado son los siguientes:

- VAN: 186 UF.
- TIR: 253 %.
- Periodo de recuperación: año 1.
- Índice de Valor Actual Neto: 17,525.

El VAN permanece prácticamente igual al obtenido en el flujo puro, lo que indica que el proyecto mantiene su capacidad para generar valor. Sin embargo, la TIR y el Índice de Valor Actual Neto aumentan significativamente, debido a que el financiamiento reduce el aporte inicial de recursos propios.

Este efecto corresponde al apalancamiento financiero: al utilizar recursos externos, la rentabilidad calculada sobre el capital aportado por los inversionistas aumenta. No obstante, esta alternativa también incorpora la obligación de cumplir oportunamente con las cuotas del préstamo, por lo que se debe mantener una adecuada disponibilidad de caja durante los cinco años.

TMAR	15%
VAN	186
TIR	253%
PAYBACK	año 1
IVAN	17,525

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-4.resultados de indicadores para flujo de caja financiado.

3.3.3 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad permite determinar cómo cambia el VAN cuando se modifican simultáneamente el precio de venta y la cantidad de dispositivos comercializados. Para ello, ambas variables se evalúan entre el 50 % y el 140 % de los valores establecidos en el escenario base.

El escenario base corresponde al 100 % del precio y al 100 % de la cantidad proyectada, obteniéndose un VAN de aproximadamente 185 UF. Los valores positivos se representan en color verde, mientras que los escenarios con VAN negativo se identifican en color rojo.

Los resultados muestran que el proyecto conserva un VAN positivo ante disminuciones importantes en la cantidad vendida, siempre que el precio de comercialización se mantenga en niveles cercanos o superiores al 70 % del valor original. Incluso con una cantidad equivalente al 50 % de la proyección y un precio correspondiente al 70 %, el VAN permanece ligeramente positivo.

En cambio, cuando el precio disminuye al 60 % o al 50 % del valor proyectado, el VAN resulta negativo en todos los niveles de venta analizados. Esto demuestra que el precio de venta tiene una incidencia mayor sobre la viabilidad económica que la cantidad de unidades comercializadas.

Por lo tanto, el precio constituye la variable crítica del proyecto. La organización deberá controlar los costos de fabricación y evitar reducciones excesivas en el precio de venta, especialmente aquellas superiores al 30 % respecto del valor inicialmente establecido.

CANTIDAD	PRECIO										
	185	140%	130%	120%	110%	100%	90%	80%	70%	60%	50%
	140%	494,01	429,8	365,58	301,37	237,15	172,94	108,72	44,506	-19,71	-83,92
	130%	469,62	408,25	346,87	285,5	224,12	162,74	101,37	39,993	-21,38	-82,76
	120%	445,23	386,7	328,16	269,63	211,09	152,55	94,017	35,481	-23,06	-81,59
	110%	420,84	365,15	309,45	253,75	198,06	142,36	86,665	30,968	-24,73	-80,42
	100%	396,45	343,6	290,74	237,88	185,03	132,17	79,312	26,455	-26,4	-79,26
	90%	372,06	322,05	272,03	222,01	171,99	121,98	71,96	21,943	-28,07	-78,09
	80%	347,67	300,5	253,32	206,14	158,96	111,79	64,608	17,43	-29,75	-76,93
	70%	323,28	278,95	234,61	190,27	145,93	101,59	57,255	12,917	-31,42	-75,76
	60%	298,89	257,39	215,9	174,4	132,9	91,401	49,903	8,4047	-33,09	-74,59
	50%	274,5	235,84	197,19	158,53	119,87	81,21	42,551	3,892	-34,77	-73,43

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-5. Análisis de sensibilidad.

En la figura 3-5 se aprecia el resultado simulado de un análisis de sensibilidad.

3.3.4 Interpretación de resultados

Los resultados de la evaluación económica indican que el proyecto es rentable tanto en el escenario financiado completamente con recursos propios como en el escenario que incorpora un préstamo de largo plazo.

En el flujo de caja puro se obtiene un VAN de 185 UF, una TIR de 94 % y un periodo de recuperación durante el segundo año. Estos indicadores muestran que el proyecto genera beneficios superiores a la rentabilidad mínima exigida del 15 % y permite recuperar la inversión dentro de un plazo inferior al horizonte de evaluación.

En el flujo de caja financiado se obtiene un VAN de 186 UF, una TIR de 253 % y un periodo de recuperación durante el primer año. El aumento de la TIR se debe principalmente al efecto del

apalancamiento financiero, ya que el préstamo reduce el monto inicial aportado mediante recursos propios.

Por su parte, el análisis de sensibilidad demuestra que el proyecto presenta capacidad para soportar disminuciones moderadas en las ventas y en el precio. Sin embargo, una reducción del precio al 60 % o menos del valor originalmente proyectado genera un VAN negativo, incluso cuando la cantidad comercializada aumenta. En consecuencia, la gestión del precio de venta y el control de los costos de producción son factores fundamentales para mantener la viabilidad económica del proyecto.

En términos generales, los indicadores obtenidos permiten concluir que el proyecto es económicamente viable y presenta condiciones favorables para su desarrollo y posterior comercialización en el área de la salud.

3.4 PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO

La planificación del proyecto se realizó considerando las principales etapas necesarias para su desarrollo, desde el levantamiento de requerimientos hasta la validación final del sistema. En la Tabla 3-8 se presenta la planificación temporal del proyecto.

Tabla 3-8. Planificación del proyecto.

Actividad	01-09-2025	08-09-2025	15-09-2025	22-09-2025	29-09-2025	06-10-2025	13-10-2025	20-10-2025	27-10-2025	03-11-2025	10-11-2025	17-11-2025	24-11-2025	01-12-2025	08-12-2025	15-12-2025	22-12-2025	29-12-2025	05-01-2026	26-01-2026
Levantamiento de requerimientos clínicos y técnicos																				
Diseño mecánico y estructural																				
Diseño electrónico																				
Programación y desarrollo de software																				
Impresión 3D de componentes																				
Integración y montaje de sistema																				
Pruebas funcionales y validación																				
Documentación y elaboración de informe final																				

Fuente: Elaboración propia.

La planificación total del proyecto considera una duración aproximada de 20 semanas, permitiendo una ejecución ordenada y controlada de cada etapa.

3.5 VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO

Una vez finalizada la etapa de diseño, fabricación e integración del sistema, se realizó la validación funcional del prototipo con el propósito de verificar el correcto desempeño de los componentes mecánicos, electrónicos y de control desarrollados durante el proyecto. Las pruebas efectuadas permitieron evaluar el comportamiento del dispositivo bajo distintas condiciones de operación, comprobando la correcta ejecución de los movimientos de flexión y extensión del codo, la respuesta de la interfaz gráfica, el funcionamiento de los sistemas de seguridad y la interacción entre el usuario y el equipo.

Debido a que el presente trabajo corresponde al desarrollo de un prototipo funcional, la validación se centró en comprobar la factibilidad técnica del sistema y su desempeño operativo, sin considerar una evaluación clínica o terapéutica con pacientes.

3.5.1 Pruebas realizadas

Una vez finalizada la fabricación e integración del prototipo, se realizaron diversas pruebas de funcionamiento con el propósito de verificar la correcta operación de los sistemas mecánicos, electrónicos y de control. Estas pruebas contemplaron la verificación del desplazamiento del servomotor, el cumplimiento de los rangos de movimiento programados, la comunicación entre la Raspberry Pi 5 y los distintos componentes electrónicos, la respuesta de la interfaz gráfica desarrollada en Python y el correcto funcionamiento de los elementos de seguridad, tales como el botón de parada de emergencia y las limitaciones de recorrido implementadas por software.

Asimismo, se verificó la estabilidad del sistema durante la ejecución de ciclos continuos de terapia, comprobando la repetibilidad de los movimientos programados y la respuesta del equipo frente a las diferentes configuraciones ingresadas por el usuario.

Las Figuras 3-6 y 3-7 muestran algunas de las pruebas realizadas durante la etapa de validación del prototipo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-6. Prueba de validación en terapia.



Fuente: Elaboración propia.

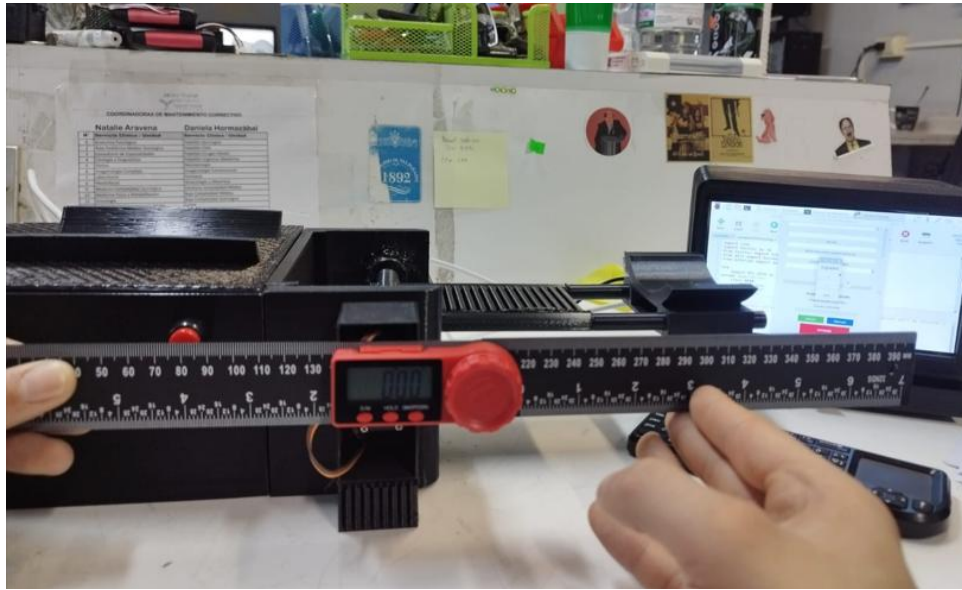
Figura 3-7. Pruebas de validación en terapia.

3.5.2 Calibración del dispositivo

Durante la puesta en marcha del dispositivo se realiza una calibración inicial para establecer la posición de referencia correspondiente a 0° del mecanismo. Para ello, se utiliza un goniómetro como instrumento patrón, comparando el ángulo real del sistema con el ángulo indicado por el software y realizando los ajustes necesarios hasta obtener la coincidencia entre ambos valores.

Este procedimiento se efectúa durante la implementación del equipo y posteriormente como parte de las labores de mantenimiento preventivo, con el objetivo de compensar posibles desviaciones mecánicas producidas por el desgaste, desmontaje o reemplazo de componentes. De esta manera, se asegura que los ángulos programados durante la terapia correspondan al movimiento real del dispositivo, manteniendo la precisión y la repetibilidad del sistema a lo largo de su vida útil. En caso de existir diferencias entre el ángulo medido y el valor mostrado por el sistema, se realizan los ajustes necesarios en el software hasta obtener la coincidencia entre ambas mediciones. Este procedimiento permite asegurar que los ángulos programados durante la terapia correspondan al movimiento real ejecutado por el dispositivo, garantizando una adecuada precisión durante su funcionamiento.

La Figura 3-8 presenta el procedimiento de calibración utilizando un goniómetro como instrumento de referencia en 0° y la figura 3-9 presenta procedimiento calibración con goniómetro en 90° .



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-8. Calibración con goniómetro en 0°.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-9. Calibración con goniómetro en 90°.

3.5.3 Validación funcional

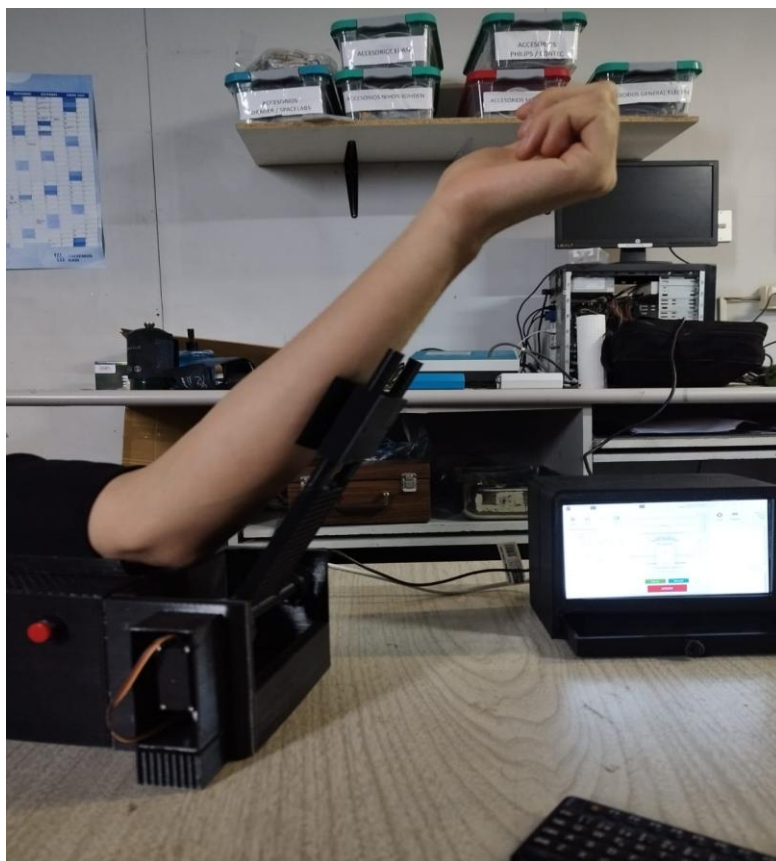
Con el objetivo de verificar la ergonomía, el rango de movimiento y el funcionamiento general del dispositivo, se realizaron pruebas funcionales con voluntarios adultos sanos. Durante estas evaluaciones se comprobó el correcto posicionamiento del brazo sobre el soporte, la comodidad durante la ejecución de los movimientos, la respuesta del sistema frente a distintos parámetros de terapia y la correcta operación de la interfaz de usuario.

En las figuras 3-10 y 3-11, se visualizan las pruebas realizadas con voluntarios.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-10. Prueba con voluntario 1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-11. Prueba con voluntario 2.

3.5.4 Mantenimiento y desinfección

Con el propósito de garantizar el correcto funcionamiento del dispositivo y prolongar la vida útil de sus componentes, se estableció un programa de mantenimiento preventivo orientado a detectar oportunamente posibles fallas mecánicas, eléctricas y electrónicas. Dicho mantenimiento contempla una inspección visual general del equipo, verificando el estado de la estructura, el correcto apriete de tornillos y uniones mecánicas, la operación del servomotor, la integridad del cableado y de las conexiones eléctricas, además del funcionamiento del botón de parada de emergencia. Finalmente, se realiza una prueba funcional para comprobar que el sistema opere correctamente antes de su utilización.

Considerando que el dispositivo mantiene contacto con el usuario durante las sesiones de rehabilitación, es necesario efectuar un procedimiento de limpieza y desinfección después de cada uso. Para ello, se recomienda limpiar las superficies de contacto utilizando un paño limpio humedecido con alcohol isopropílico al 70 %, evitando aplicar líquidos directamente sobre los componentes electrónicos o sumergir el equipo en agua u otros agentes de limpieza. Finalizado el procedimiento, se debe verificar nuevamente el estado general del equipo antes de su próxima utilización.

El procedimiento completo de mantenimiento preventivo, limpieza y desinfección, junto con la periodicidad de las inspecciones y las recomendaciones de operación, se presenta en el Manual de Usuario incluido en los anexos del presente trabajo.

3.5.5 Mejoras futuras

El dispositivo desarrollado cumple con los objetivos establecidos para esta etapa del proyecto, demostrando la factibilidad técnica de implementar un sistema automatizado para la rehabilitación de flexión y extensión de codo. Sin embargo, al tratarse de un prototipo funcional, se identifican diversas oportunidades de mejora que permitirían aumentar sus prestaciones, precisión y seguridad en futuras versiones.

Una de las principales mejoras consiste en la incorporación de un encoder rotatorio, que permita medir de manera directa la posición angular del mecanismo e implementar un sistema de control con retroalimentación, incrementando la precisión y repetibilidad de los movimientos ejecutados.

Asimismo, la integración de sensores de torque o fuerza permitiría monitorear el esfuerzo ejercido durante la terapia, detectar situaciones de sobrecarga y adaptar automáticamente la intensidad del movimiento de acuerdo con las condiciones del usuario, incrementando la seguridad del proceso de rehabilitación.

Como complemento, se propone desarrollar un sistema de registro automático de pacientes, mediante una base de datos que almacene la información de cada sesión, incluyendo

parámetros de terapia, rangos de movimiento alcanzados, número de repeticiones e historial de tratamientos. Esto facilitaría el seguimiento clínico y el análisis de la evolución de cada usuario.

Otra mejora, corresponde a la incorporación de funcionalidades de telemetría, permitiendo transmitir la información generada por el dispositivo hacia plataformas de monitoreo remoto o sistemas de gestión clínica. Esta característica facilitaría el seguimiento de las terapias por parte del profesional.

Las mejoras propuestas constituyen líneas de desarrollo futuras que permitirían incrementar el nivel de madurez tecnológica del prototipo y ampliar sus posibilidades de aplicación en el ámbito de la rehabilitación física, facilitando su futura validación clínica y eventual implementación en entornos asistenciales.

CONCLUSIONES

El desarrollo del presente trabajo de título permitió diseñar e implementar un sistema automatizado de rehabilitación de codo, integrando principios de control, instrumentación y automatización aplicados al ámbito clínico. Los objetivos generales y específicos planteados fueron cumplidos satisfactoriamente, logrando un dispositivo funcional, seguro y adaptable a las necesidades del entorno hospitalario.

Desde el punto de vista técnico, el sistema demostró ser capaz de controlar y medir el movimiento angular del codo de manera precisa, ofreciendo una interfaz intuitiva y la generación automática de reportes clínicos. En términos económicos, la utilización de tecnologías de bajo costo y software libre posiciona al proyecto como una alternativa viable y escalable para su implementación en centros de salud pública.

Finalmente, se concluye que el proyecto constituye una solución técnicamente factible y operativamente viable como sistema de apoyo a la rehabilitación de codo, aportando valor tecnológico al Hospital Carlos Van Buren y sentando las bases para futuras mejoras, tales como la incorporación de sensores adicionales, algoritmos inteligentes y una mayor integración con sistemas de información hospitalarios.

BIBLIOGRAFÍA

INFOFUSION3D: CURSO FUSION 3D [en línea]

< <https://www.udemy.com/course/fusion-360-ub/learn/lecture/45859561#overview> >

[Consulta: 15 de Septiembre 2025]

INFORASPBERRY: PINOUT RASPBERRY PI 5 [en línea]

< https://pinout.xyz/pinout/pin29_gpio5/ >

[Consulta: 09 de Octubre 2025]

INFORASPBERRY: SOFTWARE RASPBERRY PI OS [en línea]

< <https://www.raspberrypi.com/software/operating-systems/> >

[Consulta: 21 de Octubre 2025]

SERVICIO NACIONAL DE CAPACITACIÓN Y EMPLEO (SENCE): *Cursos en Línea* [en línea]

<<https://sence.gob.cl/personas/cursos-en-linea>>

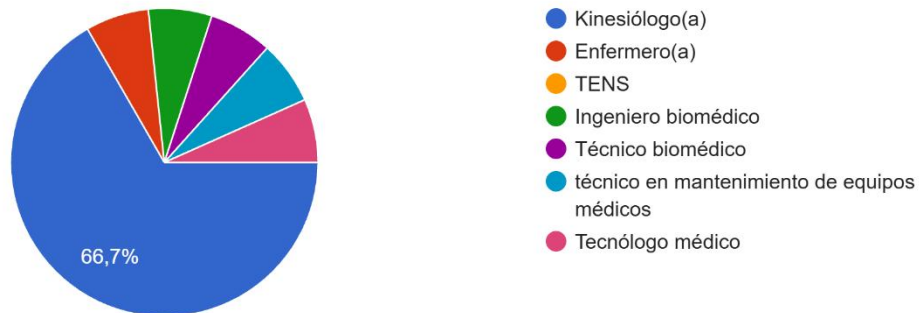
[Consulta: 10 de Abril de 2026].

ANEXOS

ANEXO A: ENCUESTA REALIZADA AL PERSONAL CLÍNICO

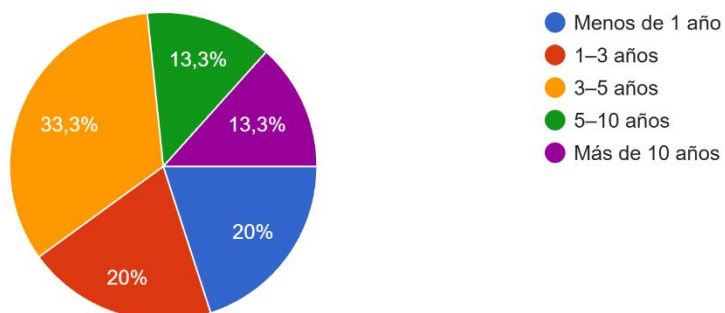
1. ¿Cual es su rol en el área clínica?

15 respuestas



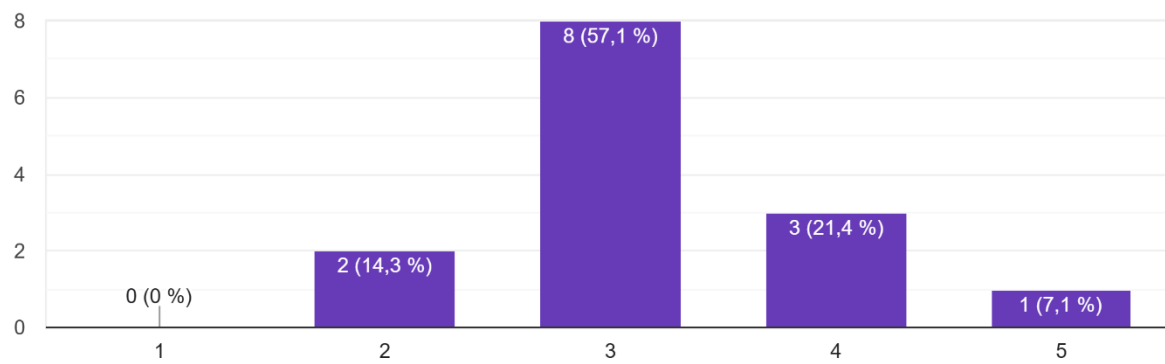
2. Años de experiencia en el área clínica

15 respuestas



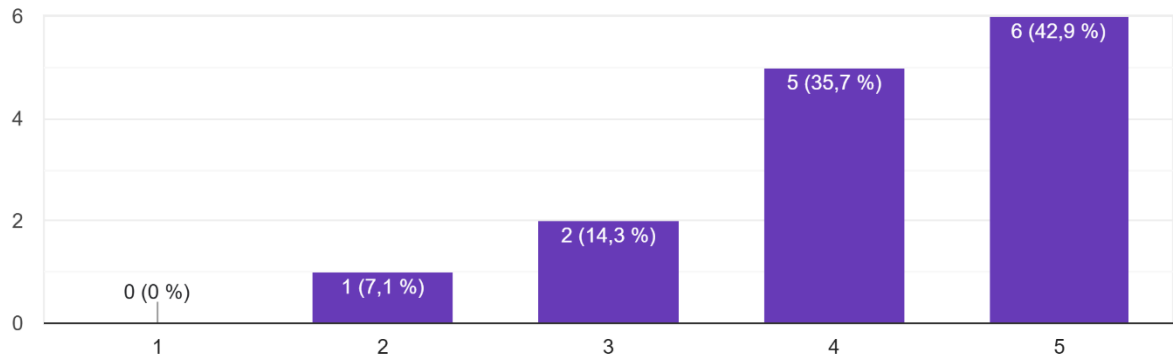
3. ¿Qué tan frecuente es que los pacientes tengan dificultades para realizar ejercicios de rehabilitación del codo de forma autónoma?

14 respuestas



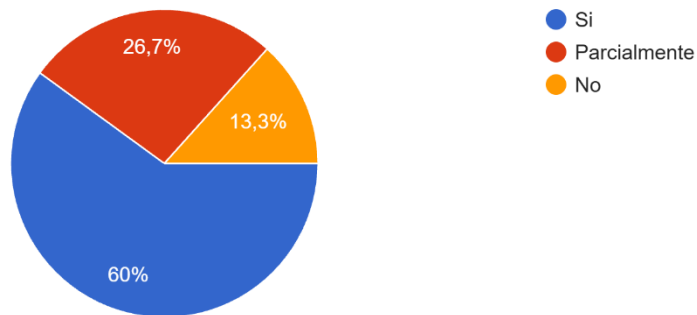
4. ¿Qué tan relevante considera la medición precisa del movimiento angular del codo durante la terapia?

14 respuestas



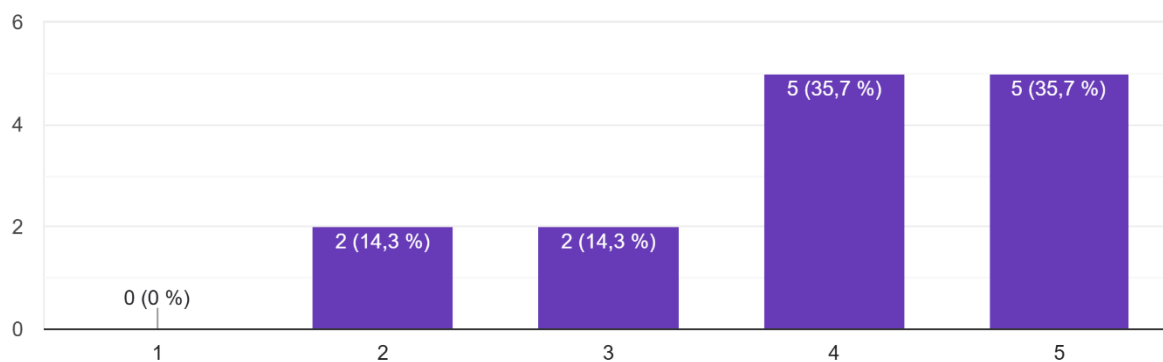
5. ¿Considera que la ausencia de monitoreo en tiempo real afecta la calidad del tratamiento?

15 respuestas



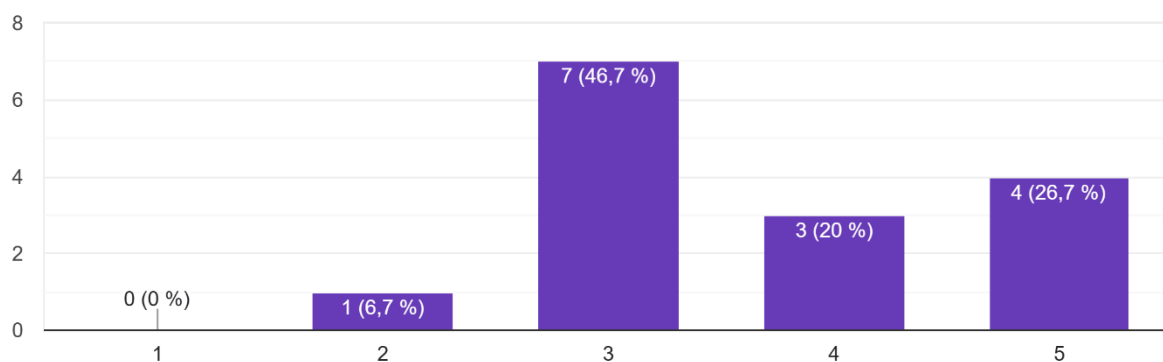
6. ¿Con qué frecuencia observa que los pacientes tienen dificultades para comprender o seguir instrucciones de movimiento?

14 respuestas



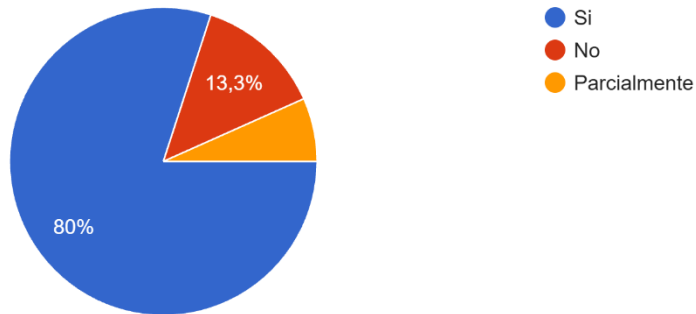
7. ¿Qué tan necesario considera automatizar algunos ejercicios repetitivos de flexo-extensión?

15 respuestas



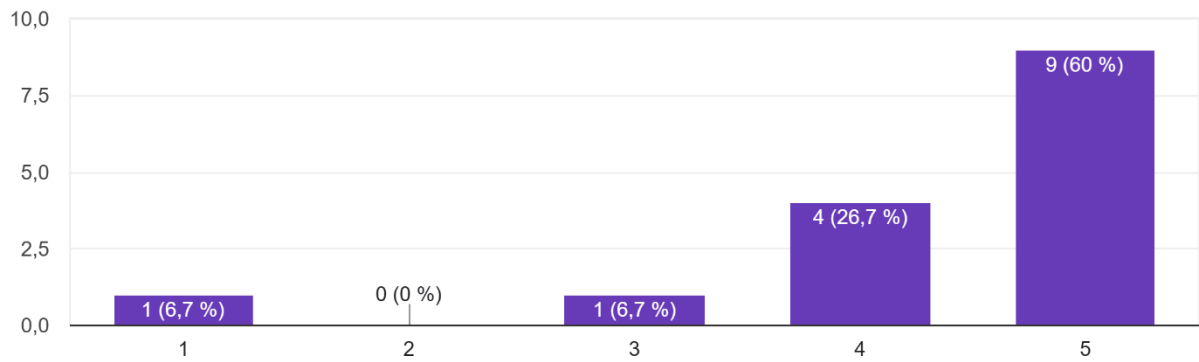
8. ¿Cree que un sistema automatizado podría mejorar la adherencia del paciente al tratamiento?

15 respuestas



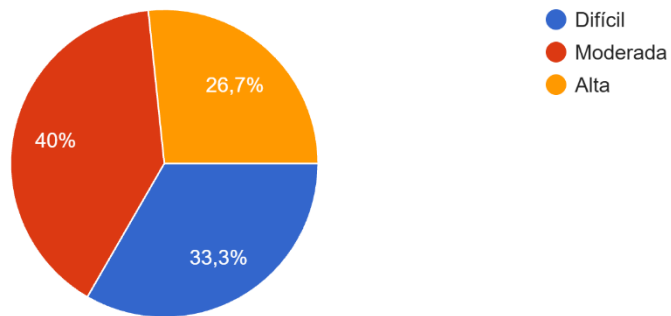
9. ¿Qué tan útil sería una interfaz visual que muestre parámetros como ángulo, progreso y tiempos de terapia?

15 respuestas



10. ¿Qué tan factible considera implementar un sistema automatizado de rehabilitación en su unidad clínica?

15 respuestas



ANEXO B: MANUAL DE USUARIO

MANUAL DE USUARIO

Sistema de Rehabilitación de Codo Automatizado

Introducción

Este sistema permite realizar terapias de movilidad controlada del codo mediante un dispositivo automatizado.

Está diseñado para:

- Uso clínico supervisado
- Rehabilitación controlada
- Movimientos repetitivos seguros y progresivos

El equipo ejecuta movimientos entre dos ángulos definidos, respetando límites de seguridad para evitar sobre extensión o daño al paciente.

Encendido

1. Encender la Raspberry Pi con switch encendido.
2. Ejecutar el programa en Thonny
3. Esperar a que aparezca la interfaz

⚠ Importante:

Antes de iniciar, asegúrese de que el brazo del paciente esté correctamente posicionado y el sistema libre de obstrucciones.

Ingreso de Datos

Complete los campos:

- **Nombre / RUT / Edad:** Identificación del paciente
- **Ángulo inicial:** Posición desde donde comenzará el movimiento
- **Ángulo final:** Posición máxima a alcanzar
- **Repeticiones:** Número de ciclos por serie

- **Series:** Número total de ciclos completos
- **Límite máximo:** Restricción de seguridad (recomendado: 90°)

⚠ Importante:

- El sistema nunca superará el límite máximo, aunque se ingresen valores mayores.
- Se recomienda trabajar dentro de rangos clínicos seguros (ej: 30° a 90°).

Ingresar valores incorrectos puede generar movimientos no deseados.

Iniciar Terapia

1. Presionar **“Iniciar”**

El sistema realizará:

- Posicionamiento inicial **suave**
- Inicio automático de ciclos de movimiento
- Movimiento progresivo

⚠ Importante:

El primer movimiento puede tardar unos segundos mientras el sistema se posiciona correctamente.

Modo Manual

Permite controlar el movimiento directamente.

Controles:

- ← Disminuye el ángulo
- → Aumenta el ángulo
- Mantener presionado = movimiento continuo

⚠ Importante:

- **Ajuste fino de posición del paciente**
- **Verificación del rango antes de iniciar terapia**

Para salir:

→ Presionar “Salir”

⚠ No iniciar terapia mientras el modo manual esté activo.

Botón de Emergencia

Funcionamiento

- Tipo: interruptor con enclavamiento (queda activado)
- Conectado físicamente al equipo

Uso:

Activar (ON):

- Detiene inmediatamente el movimiento
- Bloquea completamente el sistema
- No permite reanudar mientras esté activado

Desactivar (OFF):

- El sistema solicitará confirmación en pantalla
- Solo tras confirmar se reanuda la terapia

⚠ Importante

- **Es necesario liberarlo físicamente para continuar**

Detener desde Software

Botón DETENER

- Detiene el movimiento inmediatamente
- Funciona como parada controlada dentro del programa

Recomendaciones de Uso

- Verificar siempre el rango de movimiento antes de iniciar
- Comenzar con rangos pequeños y aumentar progresivamente

- Supervisar constantemente al paciente
- No dejar el equipo funcionando sin supervisión

Seguridad

No usar si:

- Existe dolor agudo durante el movimiento
- Se observa resistencia mecánica
- El sistema presenta comportamiento irregular

Siempre:

- Tener acceso inmediato al botón de emergencia
- Validar posición anatómica correcta
- Supervisión por personal capacitado

Problemas Comunes

Problema	Posible causa	Solución
No se mueve	Falta de energía o conexión	Revisar alimentación
Se detiene solo	Emergencia activada	Verificar botón físico
Movimiento brusco	Parámetros incorrectos	Revisar ángulos
No reanuda	Botón físico activo	Liberar switch

Finalización

Al terminar:

1. Esperar mensaje “Terapia completada” y generación de reporte
2. Verificar posición final del paciente
3. Cerrar el programa
4. Apagar sistema si corresponde

Uso Responsable

Este sistema es una herramienta de apoyo terapéutico y **no reemplaza la evaluación ni supervisión médica.**

Su uso indebido puede provocar lesiones.

Limpieza

- Apagar completamente el sistema y desconectar la alimentación eléctrica antes de realizar cualquier procedimiento de limpieza.
- Limpiar las superficies de contacto con un paño suave ligeramente humedecido con una solución desinfectante compatible con equipos electrónicos o con alcohol isopropílico al 70 %.
- Evitar que líquidos ingresen al interior de la carcasa, la Raspberry Pi, el servomotor o las conexiones eléctricas.
- No utilizar productos abrasivos, solventes, cloro ni elementos que puedan dañar las piezas impresas en 3D o los componentes electrónicos.

Inspección antes del uso

Antes de cada sesión, verificar que:

- El servomotor funcione sin ruidos o vibraciones anormales.
- Los cables y conectores estén correctamente instalados y sin daños visibles.
- El botón de emergencia opere correctamente.
- La estructura mecánica no presente fisuras, deformaciones ni piezas sueltas.
- El brazo de soporte se desplace libremente dentro del rango de movimiento establecido.

Mantenimiento Preventivo

Se recomienda realizar una revisión periódica del sistema para comprobar:

- Estado de las uniones mecánicas y tornillos de fijación.
- Correcto funcionamiento del servomotor.
- Integridad de los cables eléctricos y conectores.
- Funcionamiento del software y de los sistemas de seguridad.
- Calibración del rango de movimiento cuando sea necesario.

En caso de detectar fallas mecánicas, eléctricas o de funcionamiento, suspender el uso del equipo hasta que haya sido inspeccionado y reparado por personal capacitado.

ANEXO C: PAUTA DE MANTENIMIENTO**PROTOCOLO REHABILITADOR DE CODO**

INGENIERÍA BIOMEDICA
 MANTENIMIENTO INTEGRAL
 PROFESIONAL A CARGO:
 CONTACTO:
[MAIL:](#)

Establecimiento:

Marca:

Servicio:

Modelo:

Inventario:

Serie:

Fecha:

Revisión General	Apto	No apto	N/A
Revisión del pantalla y teclado			
Software			
Revisión Cable de Poder			
Comprobación de funcionamiento			
Comprobación de posición 0			
Prueba movilidad			
Revisión de botón de seguridad			
Revisión modos de funcionamiento			
Revisión de memoria del equipo			
Limpieza integral interna y externa			

Seguridad eléctrica	Medición	Observación
Resistencia a tierra ($\leq 0.3 \Omega$)		
Corriente de fuga de chasis ($300 \mu A$)		

OBSERVACIONES

-
-
-

INGENIERO

CLIENTE

RESPONSABLE DE EQUIPAMIENTO

FIRMA

NOMBRE Y FIRMA

ANEXO D: CARTA DE RECOMENDACIÓN

Carta de recomendación profesional

Valparaíso, 22 de abril de 2026

Por medio de la presente, yo, **Sebastián Andrés González Madrid**, Kinesiólogo, ex profesional del Servicio de Medicina Física y Rehabilitación del Hospital Carlos Van Buren de Valparaíso, expreso mi opinión profesional respecto al proyecto de título denominado "**Diseño e implementación de un sistema para rehabilitación de codo**", desarrollado por el estudiante **Jaime Mauricio Guita Donoso**, de la carrera de Ingeniería en Ejecución en Control e Instrumentación Industrial. La presente opinión se basa en la revisión de los objetivos, el diseño y las características técnicas del prototipo desarrollado, sin constituir una validación clínica del dispositivo ni una certificación para su uso en pacientes.

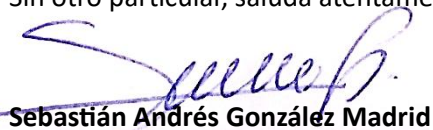
Tras conocer los objetivos, el funcionamiento y las características técnicas del dispositivo, considero que constituye una propuesta innovadora orientada a apoyar el desarrollo de tecnologías aplicadas a la rehabilitación del miembro superior mediante la automatización de ejercicios de flexión y extensión de codo. El sistema incorpora parámetros configurables de terapia, control del rango de movimiento y elementos de seguridad, características que representan una base técnica adecuada para futuras etapas de desarrollo.

Desde la perspectiva de la rehabilitación kinésica, este tipo de tecnologías puede constituir una herramienta de apoyo para el profesional tratante, siempre que su utilización se encuentre respaldada por los procesos de validación clínica, las autorizaciones regulatorias y la normativa vigente aplicable a dispositivos médicos.

Cabe señalar que el presente proyecto corresponde al desarrollo de un prototipo funcional, por lo que cualquier aplicación clínica futura deberá estar precedida por las evaluaciones técnicas, clínicas, éticas y regulatorias correspondientes.

Por lo anterior, considero que este proyecto posee mérito técnico y representa una base sólida para continuar su desarrollo, recomendando avanzar hacia futuras etapas de validación técnica y clínica que permitan evaluar su desempeño y eventual aplicación como herramienta de apoyo en procesos de rehabilitación de la extremidad superior.

Sin otro particular, saluda atentamente,



Sebastián Andrés González Madrid

Kinesiólogo - Mg. Inclusión de Personas con Discapacidad