



Instituto Politécnico Nacional
Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería
y Tecnologías Avanzadas
Ingeniería Mecatrónica



Protocolo de investigación

DTA-PPT-01.1

TÍTULO DEL PROTOCOLO					
Ortesis robótica para asistencia del movimiento de coxofemoral y rodilla en adultos con hemiplejia derecha					
INFORMACIÓN DEL PROTOCOLO					
Número de revisión:	Registro	Semestre:	2025/1	Fecha:	14/01/2025
Número de integrantes:	4	Grupo:	4MM6	Número de hojas:	31
Número de Proyecto:	6	Confidencialidad:	Público	Patrocinado:	
Patrocinador:					
ALUMNO 1			Firma		
Nombre del Alumno:	Balderas Reyes Diego Esaú				
Correo electrónico:	dbalderasr1600@alumno.ipn.mx				
Número de boleta:	2020360005	Teléfono:	5521949932		
ALUMNO 2			Firma		
Nombre del Alumno:	Martínez Maldonado Sebastián				
Correo electrónico:	smartinezm1701@alumno.ipn.mx				
Número de boleta:	2021640390	Teléfono:	5539253246		
ALUMNO 3			Firma		
Nombre del Alumno:	Piña Hernández Alberto				
Correo electrónico:	apinah1700@alumno.ipn.mx				
Número de boleta:	2021640398	Teléfono:	5614307752		
ALUMNO 4			Firma		
Nombre del Alumno:	Ramírez Sabino Luis Enrique				
Correo electrónico:	lramirezs1904@alumno.ipn.mx				
Número de boleta:	2020390571	Teléfono:	5528577021		
ASESOR 1			Firma de Vo Bo		
Nombre Asesor:	Arodi Rafael Carvallo Domínguez				
Grado Académico:	M. en C.	Cédula Profesional:			
Adscripción:	UPIITA	Academia:	Mecatrónica		
Correo electrónico:	acarvallo@ipn.mx				
ASESOR 2			Firma de Vo Bo		
Nombre Asesor:	Rafael Santiago Godoy				
Grado Académico:	Doctor	Cédula Profesional:			
Adscripción:	UPIITA	Academia:	Biónica		
Correo electrónico:	rsantiagog@ipn.mx				
ASESOR 3			Firma de Vo Bo		
Nombre Asesor:					
Grado Académico:		Cédula Profesional:			
Adscripción:		Academia:			
Correo electrónico:					
Profesores de Metodología de la Investigación			Grupo		
Profesor (a) de Humanidades	Jesús Cantera Fernández				
Correo electrónico:	jcanteraf@ipn.mx				
Profesor (a) de Mecatrónica	Juan Luis Mata Machuca				
Correo electrónico:	jmatam@ipn.mx				

¹ En caso de Asesores Externos, deberá incluirse copia de su Cédula Profesional y Curriculum Vitae resumido en un archivo anexo al Protocolo.

AVISO DE PRIVACIDAD: Los datos recabados serán protegidos, incorporados y tratados por el Departamento de Tecnologías Avanzadas de la UPIITA, cuya finalidad es el uso de los mismos exclusivamente para el proceso de registro de protocolos y proyectos de trabajo terminal y proyecto terminal, para la titulación por opción ejecular de las carreras de Ingeniería Biónica, Ingeniería Mecatrónica, Ingeniería Telemática e Ingeniería en Sistemas Autónomos. El responsable de los datos personales es el Departamento de Tecnologías Avanzadas, perteneciente a la Subdirección Académica de la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas del IPN, donde el interesado podrá ejercer los derechos de acceso y corrección en la dirección: Av. Instituto Politécnico Nacional No. Col. Barrio la Laguna Ticomán Gustavo A. Madero, México DF, CP. 07340, en el Edificio 1 primer piso. Lo anterior se informa en cumplimiento del Decimoseptimo de los Lineamientos de Protección de Datos Personales, publicados en el Diario Oficial de la Federación el 30 de septiembre de 2005.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

Protocolo de Investigación

**Ortesis robótica para asistencia del movimiento de
coxofemoral y rodilla en adultos con hemiplejia derecha**

Autores:

Balderas Reyes Diego Esaú
Martínez Maldonado Sebastián
Piña Hernández Alberto
Ramírez Sabino Luis Enrique

Asesores:

M. en C. Arodi Rafael Carvallo Domínguez
Dr. Rafael Santiago Godoy

Ing. Mecatrónica

28 de octubre de 2025

Resumen

Este proyecto propone el desarrollo de una ortesis robótica diseñada para asistir en la rehabilitación de pacientes con hemiplejia en la extremidad inferior derecha. La hemiplejia, causada por accidentes cerebrovasculares, afecta gravemente la movilidad, lo que requiere un proceso intensivo de fisioterapia para prevenir complicaciones como la atrofia muscular y contracturas articulares. La ortesis robótica tiene como objetivo replicar los movimientos de flexión, extensión, abducción y aducción en las articulaciones de cadera (coxofemoral) y rodilla, ajustando los parámetros en función de las necesidades de cada paciente. Este dispositivo automatizado aliviará la carga física del fisioterapeuta través de una rehabilitación optimizada y personalizada. El sistema emplea motores para controlar los movimientos, junto con un sistema de retroalimentación y seguimiento de trayectoria monitoreados a través de un interfaz humano máquina.

Palabras clave: Ortesis robótica, rehabilitación, hemiplejia, coxofemoral, rodilla, seguimiento de trayectoria.

Abstract

This project aims to develop a robotic orthosis designed to assist in the rehabilitation of patients with hemiplegia affecting the lower right limb. Hemiplegia, caused by strokes, severely impacts mobility, requiring intensive physiotherapy to prevent complications such as muscle atrophy and joint contractures. The robotic orthosis aims to replicate flexion, extension, abduction, and adduction movements in the hip (hip joint) and knee joints, adjusting parameters based on each patient's needs. This automated device will reduce the physical burden on the physiotherapist through an optimized and personalized rehabilitation. The system employs motors to control movements, along with a feedback and trajectory tracking system monitored through a human machine interface.

Key words: Robotic orthosis, rehabilitation, hemiplegia, hip joint, knee joint, trajectory tracking.

Tabla de contenidos

Resumen	1
1. Introducción	1
2. Planteamiento del problema	2
3. Justificación	2
4. Objetivos	3
4.1. Objetivo general	3
4.1.1. Objetivos particulares TT1	3
4.1.2. Objetivos particulares TT2	4
5. Antecedentes	4
6. Marco teórico	8
6.1. Planos anatómicos	8
6.2. Articulaciones	8
6.3. Movimientos del cuerpo humano	9
6.4. Hemiplejia	11
6.4.1. Diferencias entre hemiplejia y hemiparesia	12
6.5. Atrofia y distrofia muscular	12
6.6. Fisioterapia	12
6.7. Seguimiento de trayectoria	12
7. Propuesta de solución	13
7.1. Definición de metodología	13
7.2. Implementación de metodología VDI-2206	13
7.3. Descomposición por funciones	15
7.4. IDEF-0	16
7.5. Arquitectura física	17
7.6. Resultados esperados	19
7.7. Escenario de pruebas	20
8. Administración del proyecto	21
8.1. Presupuesto estimado e infraestructura	21
8.2. Planeación de actividades	23
Referencias	25

Listado de tablas

1.	Tabla de antecedentes	5
2.	Tabla de necesidades.	14
3.	Tabla de requerimientos.	14
4.	Recursos Humanos disponibles para el desarrollo del proyecto.	21
5.	Infraestructura para el desarrollo del proyecto.	21
6.	Presupuesto estimado para el desarrollo del proyecto.	22

Listado de figuras

1.	Planos anatómicos del cuerpo humano.	9
2.	Movimientos de flexión/extensión de rodilla.	10
3.	Movimientos de flexión/extensión de articulación de coxofemoral.	10
4.	Movimientos de abducción/aducción de articulación de coxofemoral.	11
5.	Diagrama de modelo del VDI-2206.	13
6.	Estructura FBS.	16
7.	Diagrama del nodo A0.	16
8.	Diagrama del nodo A0 extendido.	17
9.	Arquitectura física.	18
10.	Boceto preliminar del proyecto.	20
11.	Cronograma de actividades de TT1.	23
12.	Cronograma de actividades de TT2.	24

1. Introducción

La hemiplejia es una parálisis que afecta un lado del cuerpo, generalmente causada por un accidente cerebrovascular (ACV), también llamado ICTUS , lo que impacta significativamente la función motora y puede provocar déficits sensoriales, cognitivos y de coordinación, dependiendo de la gravedad y localización del daño cerebral [1]. Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) del año 2022, las enfermedades cerebrovasculares ocuparon el sexto lugar entre las principales causas de muerte en México, con un total de 18,632 personas fallecidas por esta causa [2].

En casos de hemiplejia por accidente cerebrovascular, la fisioterapia es esencial para evitar la atrofia muscular de la movilidad en la zona afectada, así como para evitar complicaciones adicionales, como contracturas o desvíos posturales. Uno de los principales riesgos asociados con la inmovilidad prolongada es el desarrollo del síndrome de inmovilidad, que deteriora la capacidad del paciente para interactuar con su entorno, generando dependencia de otras personas u objetos para realizar actividades cotidianas [3]. La fisioterapia, por lo tanto, juega un papel crucial en la reducción de las secuelas, como caídas y complicaciones musculoesqueléticas, cardiovasculares y, especialmente, neurológicas.

Durante el proceso de rehabilitación intervienen dos actores principales: el paciente, quien padece las consecuencias de la hemiplejia, y el fisioterapeuta, encargado de llevar a cabo el tratamiento. Aunque se espera que el fisioterapeuta realice su labor con la máxima eficiencia, siendo humano, puede enfrentar limitaciones físicas y fatiga al asistir continuamente a los pacientes. Por ello, surge la necesidad de herramientas complementarias que puedan optimizar este proceso.

Este enfoque no solo mejorará la calidad de vida de los pacientes al apoyarlos en su proceso de rehabilitación, sino que también beneficiará a los profesionales de la salud, permitiéndoles ofrecer una atención más efectiva. En particular, este proyecto se enfoca en la optimización del proceso de rehabilitación de la extremidad inferior derecha.

La importancia de la robótica en la rehabilitación es el aumento de intensidad y frecuencia de la terapia, de este modo se fomenta la neuroplasticidad, donde la capacidad del cerebro se adapta a nuevos ambientes por medio de estimulaciones sensoriales [4]. Realizando movimientos repetitivos continuos, los sistemas robóticos ayudan a mejorar la fuerza, resistencia y equilibrio de los pacientes, aumentando la motivación y esperanza de recuperación. Una de las ventajas de la robótica en la fisioterapia es apoyar el tratamiento convencional con un tratamiento asistido, haciendo mejoría de las condiciones osteoarticulares.

La terapia robótica aporta beneficios a las secuelas de la enfermedad cerebrovascular, los que la han recibido se muestran más alegres, optimistas, realizan un mejor análisis de la actividad y su secuencia, mostrando mayor rapidez en actividades cognitivas y motoras [5].

2. Planteamiento del problema

Con base en una entrevista realizada al Licenciado en Terapia Física Mario Sánchez Aguirar, de la Unidad de Medicina Física y Rehabilitación del Norte – IMSS, ubicado en la alcaldía Gustavo A. Madero de la Ciudad de México, una de las fases cruciales en el proceso de rehabilitación de un paciente de hemiplejia es la fase de flacidez, en la cual el paciente no puede mover el hemicuerpo afectado, ya que los músculos se encuentran caídos y sin fuerza. En esta fase deben realizarse sesiones de rehabilitación que implican movimientos de flexión, extensión, abducción y aducción en las articulaciones de coxofemoral y rodilla. Estos movimientos se tienen que realizar de acuerdo con la sesión de rehabilitación y las necesidades de cada paciente, por esta razón surge la problemática de implementar un sistema mecatrónico que ayude al fisioterapeuta a realizar adecuadamente los movimientos mencionados, debido a que son esenciales para prevenir complicaciones en el paciente como la atrofia muscular, desvíos posturales y contracturas.

Para atender esta problemática se implementará una ortesis¹ robótica que asista al fisioterapeuta en las sesiones de rehabilitación, en la cual se ingresen los parámetros por el fisioterapeuta en cada inicio de sesión a través de una interfaz humano-máquina, además, se propone un diseño modular que permita adaptar la ortesis a diferentes pacientes, esto representa un gran desafío, ya que, las ortesis tienen que personalizarse según las necesidades individuales de cada paciente, lo que puede generar una gran variedad de configuraciones y diseños. Existen diversos retos que se involucran en el desarrollo de la ortesis, entre los cuales destacan:

- Implementar una ortesis robótica modular que se adapte a distintas estaturas promedio de personas adultas en México, que se encuentran en un rango de 150 cm a 170 cm.
- Diseñar y fabricar una estructura estable, que sea capaz de soportar un peso máximo de 80 kg de una persona adulta.
- Implementar sensores de retroalimentación, para ajustar los rangos de movimiento, la fuerza aplicada y la velocidad inducida durante las sesiones de rehabilitación.
- Diseñar un sistema de sujeción para retirar y montar la región inferior derecha sin complicaciones durante el proceso.
- Implementar un diseño ergonómico que sea cómodo para el paciente, protegiendo sus articulaciones y evitando lesiones por uso prolongado.
- Desarrollar una interfaz humano-máquina que permita ingresar y visualizar los diferentes parámetros de movimiento.

3. Justificación

En la fase flácida de la hemiplejia, donde la extremidad afectada carece de tono muscular y se encuentra sin movimiento activo, la intervención del fisioterapeuta se centra en evitar estas

¹Una ortesis es un dispositivo mecánico para sostener, corregir o asistir el movimiento de una parte del cuerpo, mejorando su funcionalidad [6].

complicaciones mediante movilizaciones pasivas controladas. En este contexto, la fisioterapia tradicional implementada con estos pacientes es altamente demandante desde el punto de vista físico para el fisioterapeuta. Las sesiones de rehabilitación requieren una atención exhaustiva y un gran esfuerzo físico dado que la terapia se da con el paciente recostado, lo que genera molestias para el fisioterapeuta como dolor de cintura por estar inclinado, y la necesidad de supervisión para garantizar una adecuada ejecución. Esta demanda, sumada a la falta de recursos en las clínicas, subraya la necesidad de soluciones alternativas que permitan una rehabilitación más eficiente, con mejores resultados y un uso optimizado de los recursos [7].

Por ello, la ortesis robótica para pacientes hemipléjicos se presenta como una solución innovadora, que integra la mecánica, programación, electrónica, sistemas de control y medicina física, además permitirá al fisioterapeuta realizar las sesiones de rehabilitación con facilidad. Para lograr esta propuesta de solución se requiere un mecanismo que realice los movimientos de flexión y extensión en la rodilla y coxofemoral, un mecanismo para controlar la abducción y aducción en la coxofemoral, una interfaz humano-máquina para ingresar y visualizar los parámetros, sistemas de seguridad para el paciente y una estructura mecánica donde se puedan integrar los mecanismos y componentes de la ortesis robótica.

Finalmente, la combinación de estos mecanismos y componentes otorga una ventaja considerable sobre otros dispositivos meramente mecánicos, ya que, permite ajustar los parámetros de las sesiones de rehabilitación en términos de fuerza, duración y rangos de movimiento, lo que posibilita un enfoque personalizado para cada paciente. Al automatizar el proceso de rehabilitación, se alivia la carga física del fisioterapeuta y se asegura una terapia consistente, continua y apegada a los objetivos terapéuticos definidos por los especialistas.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Desarrollar una ortesis robótica que asista en la rehabilitación de personas con hemiplejia derecha, realizando movimientos articulares de coxofemoral y rodilla para reducir la atrofia muscular.

4.1.1. Objetivos particulares TT1

- Diseñar y validar la estructura mecánica para realizar movimientos de flexión y extensión de coxofemoral y rodilla.
- Diseñar y validar la estructura mecánica para realizar movimientos de abducción y aducción de coxofemoral.
- Diseñar y validar la estructura mecánica de la cama para proporcionar reposo y estabilidad al paciente durante la rehabilitación.
- Diseñar y validar el sistema de seguridad mecánico para proteger al paciente de posibles fallas en el control del sistema.

- Diseñar y validar la etapa de potencia de energía del sistema.
- Diseñar y validar la etapa de acondicionamiento de energía para el sistema.
- Diseñar y validar la etapa de acondicionamiento de señales para obtener los parámetros de los sensores.
- Diseñar y validar el sistema de seguridad eléctrico para posibles fallas.
- Diseñar y validar el sistema de comunicación humano-máquina.
- Integrar computacionalmente los sistemas de la ortesis.

4.1.2. Objetivos particulares TT2

- Implementar y verificar la estructura mecánica para realizar movimientos de flexión y extensión de coxofemoral y rodilla.
- Implementar y verificar la estructura mecánica para realizar movimientos de abducción y aducción de coxofemoral.
- Implementar y verificar la estructura mecánica de la cama para proporcionar reposo y estabilidad al paciente durante la rehabilitación.
- Implementar y verificar el sistema de seguridad mecánico para proteger al paciente de posibles fallas en el control del sistema.
- Implementar y verificar la etapa de potencia de energía del sistema.
- Implementar y verificar la etapa de acondicionamiento de energía para el sistema.
- Implementar y verificar la etapa de acondicionamiento de señales para obtener los parámetros de los sensores.
- Implementar y verificar el sistema de seguridad eléctrico para posibles fallas.
- Implementar y verificar el sistema de comunicación humano-máquina.
- Ensamblar los sistemas de la ortesis.

5. Antecedentes

En el campo de la rehabilitación asistida por tecnología, se han desarrollado diversas soluciones robóticas y de ortesis para mejorar la calidad de vida de los pacientes que presentan limitaciones en el movimiento. Estos proyectos se han enfocado para asistir, corregir o potenciar el proceso de rehabilitación, utilizando desde sistemas mecánicos básicos hasta dispositivos mecatrónicos que integran sensores, actuadores y control inteligente. A continuación, se presenta una revisión de algunos de los proyectos más relevantes que han servido como base y referencia para el desarrollo de la ortesis robótica que se propone en este trabajo.

Tabla 1: Tabla de antecedentes.

Ítem	Nombre	Descripción	Características	País	Instituto	Tipo	Ref
1	Lokomat en la re-educación de la marcha en personas hemipléjicas post accidente cerebro vascular.	Sistema robótico diseñado para la rehabilitación funcional de la marcha en personas que sufren secuelas producidas por un daño neurológico tanto a nivel cerebral como en la médula espinal.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Módulo que mejora la terapia al permitir movimientos laterales y rotacionales de la pelvis. ■ Motores sincronizados a una computadora. ■ Ajuste en parámetros de entrenamiento. ■ Interfaz de fácil operación para el terapeuta. 	Ecuador	Universidad de Ambato.	Técnica	Informe de investigación [8]
2	Diseño de exoesqueleto de apoyo a la motricidad para la articulación de cadera.	Prototipo exoesquelético para apoyo en la articulación de la cadera, para guiar el movimiento en partes inferiores durante el ciclo de marcha y posición del usuario.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Actuadores lineales eléctricos. ■ Diseño biomecánico. ■ Piezas realizadas en nylamid. ■ Sistema de sujeción por ameses y correas. ■ Piezas fabricadas en máquinas CNC. 	México	Instituto Nacional	Politécnico	Tesis [9]
3	HipBot	Robot terapéutico diseñado para la rehabilitación de la articulación de la cadera, siendo capaz de realizar movimientos combinados de abducción/aducción y flexión/extensión de la cadera, replicando movimientos necesarios en fisioterapia.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Posee 5 grados de libertad. ■ Realiza movimientos combinados laterales y frontales. ■ Emplea controlador PID para seguimiento de trayectorias. ■ Cuenta con botones de emergencia y sensores de fuerza para detener el sistema en caso de anomalía. 	México	Departamento de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Politécnica de Zacatecas; Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).	Artículo científico [10]	

Ítem	Nombre	Descripción	Características	País	Instituto	Tipo	Ref
4	Ortesis activa de rodilla con una relación de transmisión variable a través de un embrague doble motorizado.	Ortesis activa de rodilla (AKO) destinada a asistir a personas con movilidad reducida.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Cuenta con un actuador que permite seleccionar entre dos modos: alta torsión y baja velocidad; y baja torsión y alta velocidad. ■ El diseño es simétrico y puede ser utilizado en ambas piernas (izquierda o derecha). ■ Incluye un resorte torsional co-mo actuador elástico en serie diseñado para soportar una torsión de 50Nm, y rigidez de 150 Nm/-rad. ■ Tiene una masa de 3.8 kg incluyendo unidad de control. ■ Posee un controlador adaptativo que ajusta el momento aplicado. 	Italia	Instituto de Bio-Róbótica y Departamento de Excelencia en Robótica e Inteligencia Artificial de la Escuela Superior Santa Ana	Artículo científico	[11]
5	Modelado y Control de un Exoesqueleto para la Rehabilitación de Extremidad Inferior con dos grados de libertad.	Exoesqueleto de dos grados de libertad diseñado para realizar ejercicios de rehabilitación de tobillo y rodilla, para las personas que, a causa de algún accidente, o enfermedad tienen movilidad reducida o nula.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Cuenta con actuadores tipo SEA (Series Elastic Actuator) que son utilizados para amplificar la fuerza humana con ayuda de algunos sensores. ■ Utiliza sensores para medir la posición y velocidad angular de las articulaciones, que se utilizan para controlar el movimiento de la pierna. 	México, Francia	Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Université de Technologie de Compiegne	Artículo científico	[12]

Ítem	Nombre	Descripción	Características	País	Instituto	Tipo	Ref
6	Ortesis robótica para rehabilitación bilateral para la mano izquierda para pacientes con hemiplejia.	Sistema para realizar rehabilitación bilateral en pacientes sobrevivientes a un accidente cerebro vascular o con dificultad de movimiento en la mano izquierda, basado en terapia espejo.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Entrega retroalimentación neuronal al imitar el movimiento de flexión-extensión de los dedos de la mano sana en la afectada. ■ Identifica el rango de movimiento de cada dedo de la mano derecha, midiendo la resistencia de sensores flex ubicados en todos ellos. ■ Replica el movimiento de cada dedo en la mano afectada guiados por servomotores acoplados a un sistema mecánico 	Ecuador	Universidad de Cuenca	Artículo científico	[13]

En conclusión, los proyectos revisados en este apartado han sido fundamentales para el avance en la creación de ortesis y sistemas robóticos orientados a la rehabilitación, sin embargo, siempre existirá la necesidad de desarrollar soluciones más adaptables, personalizadas y eficientes para abordar de manera integral las diversas patologías que afectan la movilidad de los pacientes.

La ortesis robótica propuesta en este proyecto busca aprovechar los aprendizajes y avances de los trabajos previos para buscar un enfoque más preciso y eficaz en la rehabilitación del coxofemoral y rodilla. A través de la implementación de un diseño modular, motores, y un sistema de control. Este dispositivo pretende superar los retos existentes y ofrecer un apoyo para mejorar la calidad de vida de los pacientes.

6. Marco teórico

El desarrollo del proyecto abarca disciplinas más allá de los alcances de la ingeniería mecatrónica, de los cuales resulta importante tener una noción para poder ser aplicados en el desarrollo de la ortesis robótica.

6.1. Planos anatómicos

Al cuerpo humano se le realizan tres cortes imaginarios para poder ubicar las estructuras y órganos que los componen [14]. Dichos cortes son conocidos como planos anatómicos y se observan en la Figura 1. Estos planos son:

1. Sagital o medio sagital, el cual divide al cuerpo humano en mitad derecha e izquierda.
2. Frontal o coronal, que divide en mitad anterior y posterior.
3. Transversal u horizontal, que divide al cuerpo en mitad superior e inferior.

6.2. Articulaciones

Las articulaciones conectan los huesos del esqueleto y permiten el soporte y la ejecución de movimientos. Existen dos formas principales de clasificarlas. La primera es de acuerdo con su función, es decir, el rango de movimiento que permiten. La segunda clasificación se basa en el material que une los huesos [15].

Una de las articulaciones de interés para el proyecto es la articulación de la coxofemoral, también conocida como cadera, la cual es una articulación multiaxial sinovial que permite una gran variedad de movimientos, entre ellos la flexión, extensión, abducción, aducción, rotación interna y externa, así como la circunducción, lo que le otorga una amplia movilidad en diferentes direcciones [16].

Otra de las articulaciones con la cual se trabajará en el proyecto es la articulación de la rodilla, también conocida como la articulación femoro-tibio patelar, es una articulación de gran rango de movilidad, clasificada como sinovial o diartrodial, permitiendo principalmente los movimientos de flexión y extensión [17].

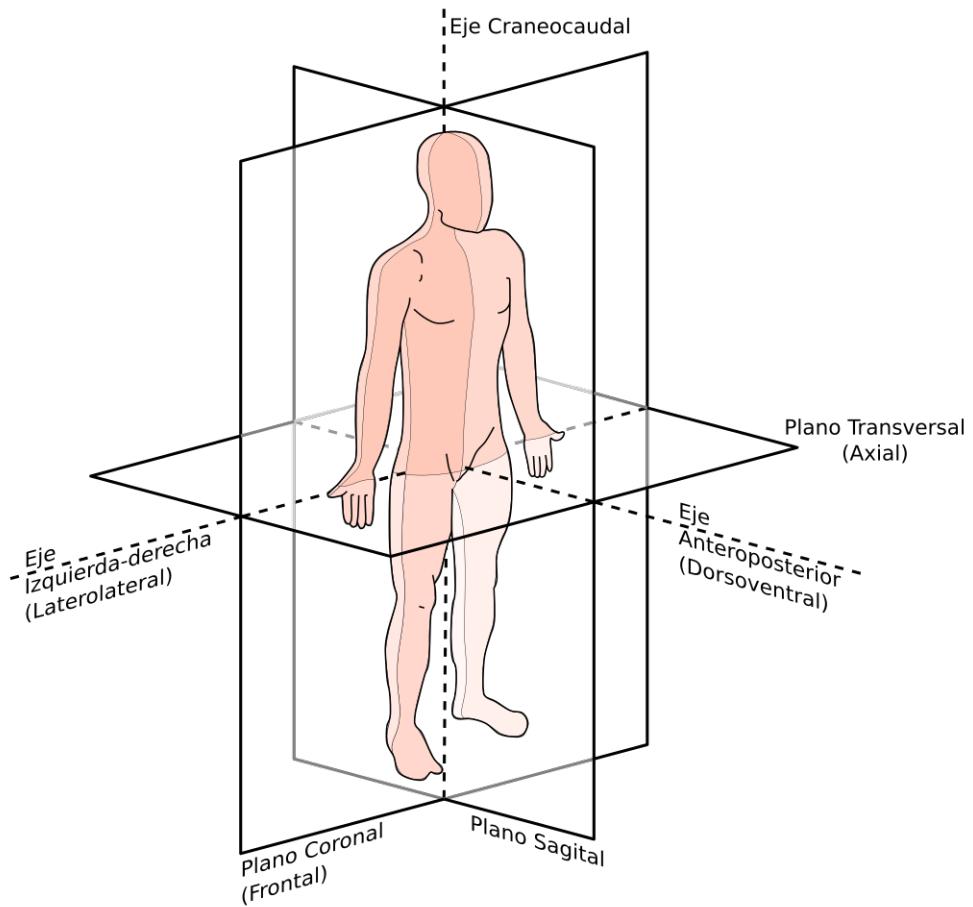


Figura 1: Planos anatómicos del cuerpo humano. Recuperado de [14].

6.3. Movimientos del cuerpo humano

En anatomía, el concepto de movimiento involucra el desplazamiento de huesos o partes del cuerpo alrededor de articulaciones fijas, en relación con los principales ejes anatómicos (sagital, coronal, transversal) o planos paralelos a estos [18]. Así, el esquema de los movimientos anatómicos se compone de lo siguiente:

1. Estructuras anatómicas que participan en el movimiento.
2. Ejes de referencia alrededor de los cuales ocurre el movimiento.
3. Dirección del movimiento, que en anatomía suele vincularse con un plano estándar, como el mediano, medial, sagital, o frontal.

Entre los movimientos del cuerpo humano se encuentra la flexión/extensión, los cuales son movimientos opuestos que tienen lugar en direcciones sagitales alrededor de un eje frontal/coronral. La flexión se refiere a la acción de reducir el ángulo entre dos estructuras que intervienen en el movimiento, como huesos o partes del cuerpo. En contraste, la extensión o el acto de enderezar implica aumentar el ángulo entre dichas estructuras. Este tipo de movimiento se presenta en la rodilla, donde la tibia de la pierna se mueve con relación al fémur del muslo, y ocurre en el plano

sagital. En el movimiento de flexión, la pierna se mueve hacia atrás, y durante la extensión, se mueve hacia adelante [18]. En la Fig. 2 se representan los movimientos de flexión y extensión de la articulación de la rodilla.

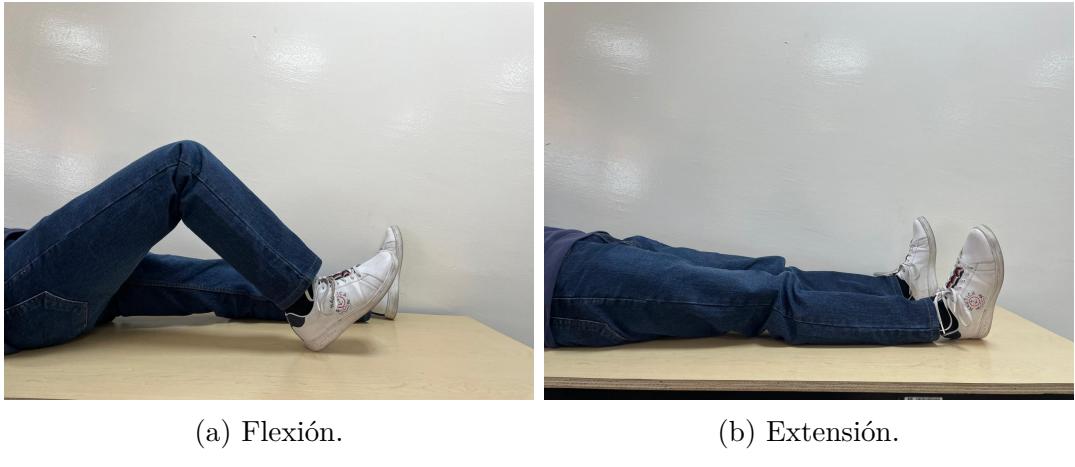


Figura 2: Movimientos de flexión/extensión de rodilla.

En la Fig. 3 se representan los movimientos de flexión y extensión que involucran únicamente la articulación del coxofemoral.

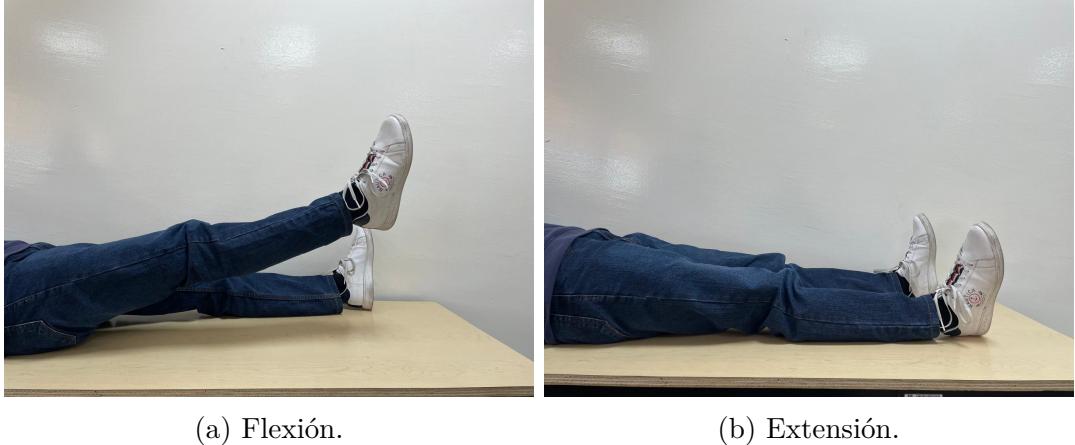


Figura 3: Movimientos de flexión/extensión de articulación de coxofemoral.

Por su parte, los movimientos de abducción/aducción, los cuales están estrechamente relacionados con el plano medial del cuerpo. Ambos movimientos se desarrollan alrededor de un eje anteroposterior, lo que significa que se desplazan hacia adelante y hacia atrás. En términos anatómicos, estos movimientos son más fáciles de entender al observar las piernas y los brazos, ya que su dinámica es bastante similar. El brazo se mueve con respecto al tronco y al hombro, mientras que la pierna lo hace en relación con la articulación coxofemoral. El movimiento ocurre en el plano frontal [18]. Los movimientos de abducción y aducción se representan en la Fig. 4.

Los movimientos del cuerpo se ven afectados por condiciones neurológicas como la hemiplegia, la cual se define continuación.



(a) Abducción.

(b) Aducción.

Figura 4: Movimientos de abducción/aducción de articulación de coxofemoral.

6.4. Hemiplejia

La hemiplejia es un término general que se le otorga a una condición crónica que afecta al sistema nervioso central, provocando alteraciones principalmente en la sensibilidad y el control de la acción motora de un lado del cuerpo. Aunque esta afección impacta mayormente un hemicuerpo, también causa otros problemas en diferentes áreas del cuerpo que van más allá del lado afectado [19].

La hemiplejia consta de cuatro fases genéricas:

1. Etapa inicial o de ictus: Tras el evento, el paciente puede estar en coma o semicomía. La duración de esta fase es variable, ya que, se identifica el hemisferio cerebral afectado, pero no su alcance funcional.
2. Fase flácida: El hemisferio cerebral está inhibido, lo que provoca flacidez en el hemicuerpo afectado. El hombro cae, la cabeza se inclina, y el pie se arrastra. Los trastornos sensitivos como la hipoestesia y la hiperestesia también están presentes. Esta fase finaliza con el inicio de la hipertonia.
3. Etapa espástica: Aparece la hipertonia, lo que conduce a posturas fijas debido a la rigidez de los músculos. En el miembro inferior afecta la articulación del coxofemoral y el pie. También pueden presentarse alteraciones vegetativas y afasia.
4. Fase de secuelas: En torno a los dos años de la primera fase se ha producido toda la recuperación espontánea posible. En esta fase el paciente debe adaptarse a las secuelas buscando mejorar su funcionalidad a pesar de que no se esperan más avances significativos. Esta fase es sometida a tratamientos con el propósito de mitigar las secuelas y maximizar la autonomía del paciente.

6.4.1. Diferencias entre hemiplejia y hemiparesia

La hemiplejia se caracteriza por una parálisis total de uno de los lados del cuerpo a causa de una lesión o alteración en el cerebro o sistema nervioso. Mientras que la hemiparesia se refiere a una debilidad o disminución del control muscular en la mitad del cuerpo, pero sin llegar a una parálisis completa. Una persona con hemiparesia aún conserva cierto grado de movilidad en la parte afectada [21].

6.5. Atrofia y distrofia muscular

La atrofia muscular se refiere a una disminución en la masa del músculo, lo que puede llevar a una pérdida parcial o total del tejido muscular. Esta condición puede ser provocada por diversas enfermedades comunes como el cáncer, la diabetes y la insuficiencia renal, así como por quemaduras graves, desnutrición o la falta de uso de los músculos. También puede ser causada por lesiones en la médula espinal, como la paraplejia, que afecta la función motora o sensorial de las extremidades inferiores [22].

Por su parte, la distrofia muscular es un conjunto de enfermedades que provocan una debilidad progresiva y pérdida de masa muscular. En esta condición, los genes anormales (mutaciones) afectan la producción de proteínas necesarias para la formación y el mantenimiento de músculos sanos [22].

Las condiciones médicas descritas son atendidas por tecnologías de rehabilitación y asistencia, entre los cuales se encuentra las ortesis y fisioterapias.

6.6. Fisioterapia

La fisioterapia, también conocida como terapia física, se enfoca en aliviar el dolor, mejorar la movilidad y fortalecer los músculos debilitados a través de ejercicios, masajes y tratamientos con estímulos físicos como calor, frío, corrientes eléctricas y ultrasonido. Además de su aplicación en la clínica, uno de sus objetivos clave es enseñar a los pacientes a mejorar su salud de manera independiente, fomentando la práctica de ejercicios en casa [23]. Esta terapia incluye tanto movimientos activos realizados por el paciente, como movimientos pasivos guiados por el terapeuta, y utiliza diversas técnicas para tratar síntomas y prevenir problemas futuros.

6.7. Seguimiento de trayectoria

Es el proceso de diseñar un sistema de control que guíe a un objeto, máquinas o robot para que siga una trayectoria dada [24]. Es comúnmente utilizado en aplicaciones de robótica, sistemas de control de vehículos, brazos mecánicos, y particularmente para este proyecto, busca ser aplicado en la ortesis robótica. A través del seguimiento de trayectoria el sistema alcanza una serie de puntos, o trayectoria cartesiana, minimizando el error entre la posición deseada y la posición real. Para lograr esto, se utilizan controladores como el control PID (Proporcional Integral Derivativo) [25].

7. Propuesta de solución

7.1. Definición de metodología

La metodología seleccionada para el desarrollo del proyecto es la metodología VDI 2206, la cual es una guía flexible diseñada específicamente para el desarrollo de sistemas mecatrónicos, que integra disciplinas como la mecánica, electrónica, control y tecnologías de la información, ayudando a gestionar la complejidad y heterogeneidad de diseños mechatrónicos a través de un modelo adaptable a las necesidades del proyecto [26]. La metodología consta de un diseño en dos niveles:

- Micro nivel: Centrado en el proceso de resolución de problemas a nivel individual, apoyando en tareas específicas del diseño.
- Macro nivel: Utiliza un modelo en “V”, que combina un enfoque de arriba hacia abajo para el diseño del sistema (descomponiendo en funciones), y de abajo hacia arriba para la integración del sistema, lo que permite la validación y verificación continua.

7.2. Implementación de metodología VDI-2206

En la Fig. 5 se muestra el diagrama de modelo VDI-2206 con etapas enfocadas en el desarrollo de la ortesis robótica.

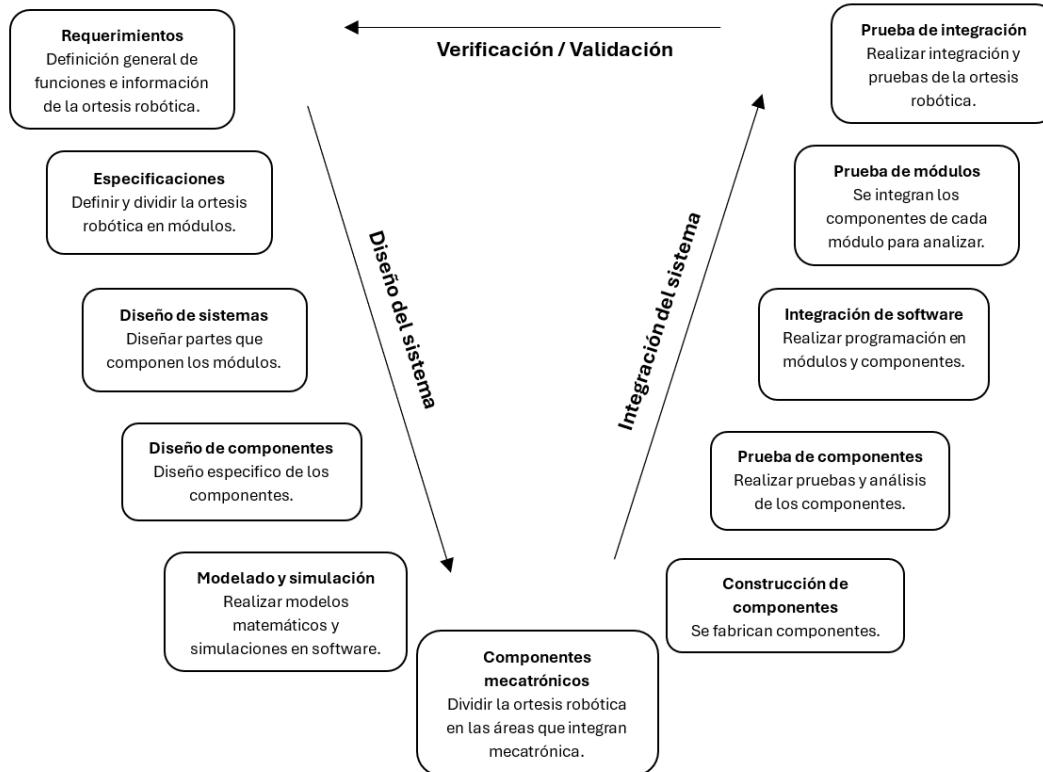


Figura 5: Diagrama de modelo del VDI-2206. Recuperado de [27].

En una primera exploración se indagó acerca de las necesidades existentes para un sistema como el planteado en el presente proyecto. En la tabla 3 se clasifican las necesidades en

funcionales y no funcionales, las cuales fueron identificadas con base en la entrevista realizada al Licenciado en Terapia Física Mario Sánchez Aguilar, de la Unidad de Medicina Física y Rehabilitación del Norte– IMSS en la alcaldía Gustavo A. Madero de la Ciudad de México.

Tabla 2: Tabla de necesidades.

Necesidades funcionales	Necesidades no funcionales
Realizar movimientos de las articulaciones de coxo-femoral y rodilla para rehabilitar la región inferior derecha.	Contar con modularidad en estructura mecánica para adaptarla a diferentes pacientes.
Ajustar y asignar los movimientos que determine el fisioterapeuta, de acuerdo con cada sesión.	Visualizar parámetros de salida con ayuda de una interfaz humano-máquina.
Ingresar los parámetros de movimiento por medio de una interfaz humano-máquina.	Contar con ergonomía y comodidad para el paciente.
Realizar personalización de parámetros como la velocidad y rango de movimiento de la ortesis.	
Registrar información por cada sesión de rehabilitación.	
Establecer límites al sistema para la seguridad del paciente.	
Implementar un botón de paro general en caso de emergencia.	
Mantener una postura rígida en el tobillo.	

A partir de las necesidades descritas, se plantean bajo un enfoque funcional los requerimientos del proyecto, los cuales se presentan en la tabla 3.

Tabla 3: Tabla de requerimientos.

Item	Requerimiento	Variable	Valores
R1	Dimensiones de la cama		
R1.1	Largo	X	180cm – 220cm
R1.2	Ancho	Y	80cm – 120cm
R1.3	Alto	Z	50cm – 80cm
R2	Dimensiones del mecanismo de flexión y extensión		
R2.1	Dimensión del fémur	D1	20cm – 60cm
R2.2	Dimensión de la tibia	D2	20cm – 60cm
R2.3	Largo total	X1	40cm – 120cm
R2.4	Ancho total	Y1	15cm – 40cm
R3	Dimensiones del mecanismo de abducción y aducción		
R3.1	Ángulo de movimiento	θ	$\leq 50^\circ$
R4	Movimiento lineal de flexión y extensión		
R4.1	Masa de extremidad inferior derecha en movimiento horizontal	Masa	10 kg - 25 kg
R4.2	Masa de extremidad inferior derecha en movimiento vertical	Masa	10 kg - 25 kg
R5	Movimiento rotativo de abducción y aducción		
R5.1	Masa de extremidad inferior derecha	Masa	10 kg - 25 kg
R6	Interfaz		
R6.1	Computadora	-	-
R7	Fuente de alimentación		
R7.1	Suministro eléctrico	V	127 V

7.3. Descomposición por funciones

Con base en los requerimientos descritos se muestra a continuación la descomposición de funciones con las cuales se plantea la propuesta de solución, siendo la función global **mover la extremidad inferior derecha**.

F0.0. Mover extremidad inferior derecha.

F1.0. Soportar peso del paciente.

F2.0. Realizar movimientos de articulaciones.

F2.1. Realizar movimientos de articulaciones en el plano sagital.

F2.1.1. Accionar motores lineales.

F2.1.1.1. Realizar flexión de articulación coxofemoral.

F2.1.1.2. Realizar extensión de articulación coxofemoral.

F2.1.1.3. Realizar flexión de articulación de la rodilla.

F2.1.1.4. Realizar extensión de articulación de la rodilla.

F2.2. Realizar movimientos de articulaciones en el plano coronal.

F2.2.1. Accionar motor rotativo.

F2.2.1.1. Realizar abducción de articulación coxofemoral.

F2.2.1.2. Realizar aducción de articulación coxofemoral.

F3.0. Seguir trayectorias.

F4.0. Comunicar al usuario con el sistema.

F4.1. Acceder a modos trabajo.

F4.1.1. Programar ejercicios.

F4.1.2. Iniciar rutina de ejercicios.

F4.1.3. Monitorear progreso de ejercicios.

F4.1.4. Mostrar trayectoria de actuadores.

F4.1.5. Finalizar rutina de ejercicios.

F5.0. Administrar energía al sistema.

F5.1. Implementar etapa de potencia.

F5.2. Implementar acondicionamiento de energía para el sistema.

F5.3. Implementar paro de emergencia.

F6.0. Comunicar internamente los subsistemas del sistema.

Se tienen seis funciones principales para el desarrollo de la ortesis; la función F1.0 se centra en que el sistema debe ser capaz de soportar el peso del paciente durante la sesión de rehabilitación; la función F2.0 indica que el sistema debe permitir la ejecución de movimientos en las articulaciones de la extremidad inferior derecha, cubriendo tanto los movimientos en el plano sagital como en el plano coronal; la función F3.0 hace referencia a que el sistema debe seguir las trayectorias predefinidas para los movimientos de las articulaciones, y que los movimientos se realicen de acuerdo con los parámetros establecidos por el fisioterapeuta; la función F4.0 señala que el sistema debe proporcionar una interfaz para que el fisioterapeuta pueda controlar y monitorear el proceso de rehabilitación; la función F5.0 indica que el sistema debe gestionar la energía necesaria para operar los actuadores y sensores; y por último, la función F6.0 para contar con un sistema de comunicación interna que permita la coordinación entre los diferentes componentes (actuadores, sensores y controlador).

En la Figura 6 se presenta el modelo FBS que representa de forma gráfica y jerárquica las funciones descritas.

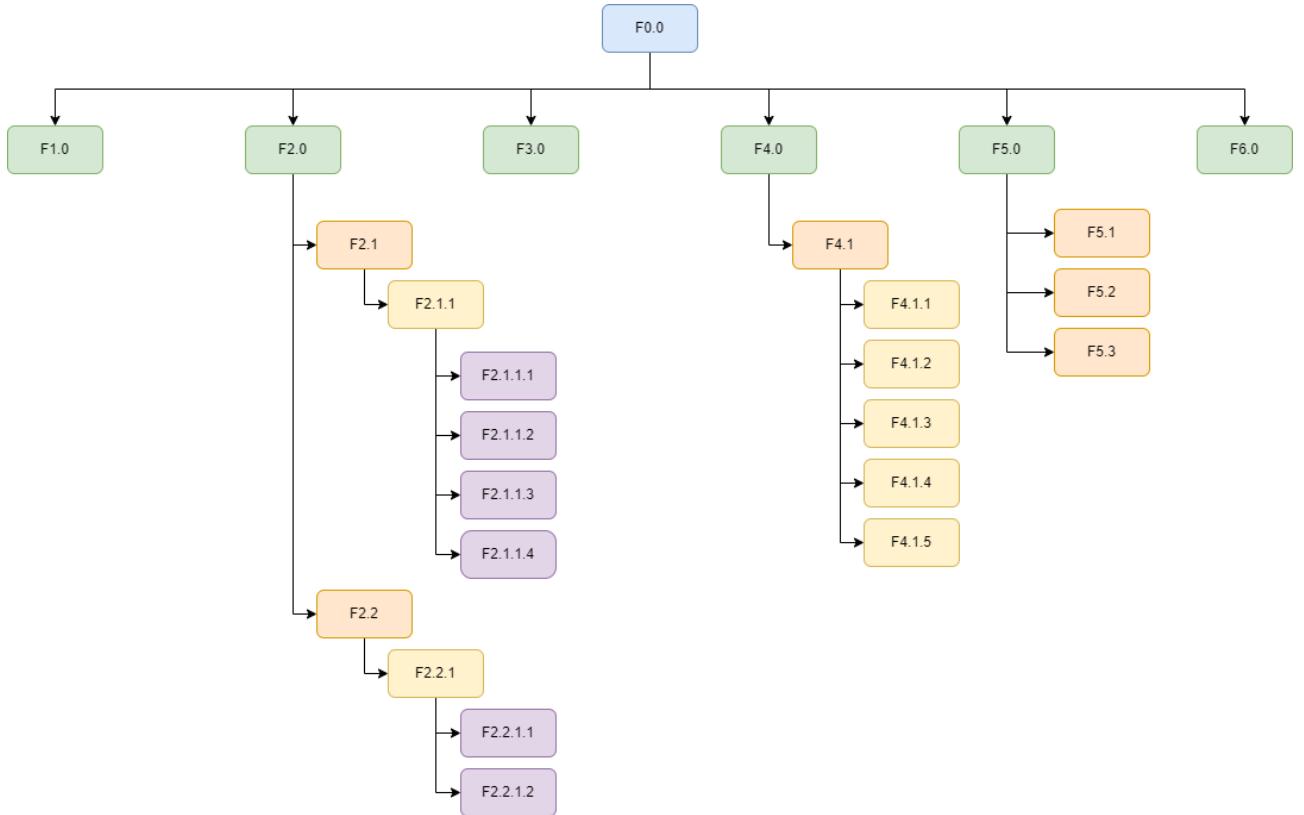


Figura 6: Estructura FBS.

7.4. IDEF-0

Esta herramienta se utiliza para analizar las funciones del sistema, lo que permite comprender las interacciones entre ellas, así como descomponerlas y representarlas en diagramas sencillos que muestran entradas, salidas, controles y mecanismos en cada función.

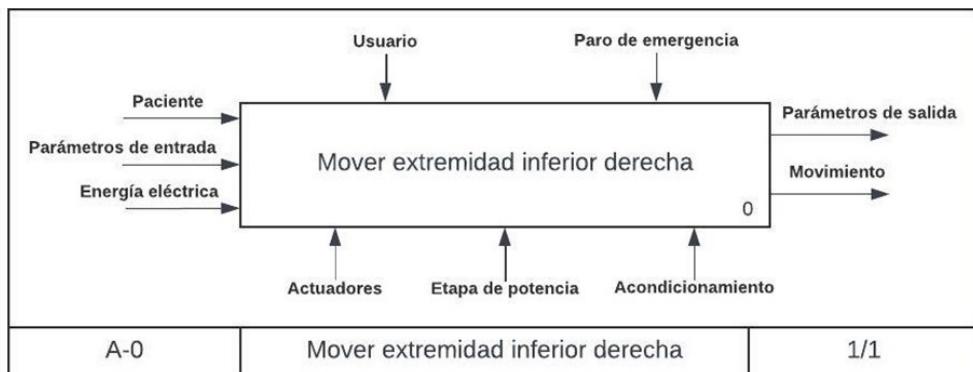


Figura 7: Diagrama del nodo A0.

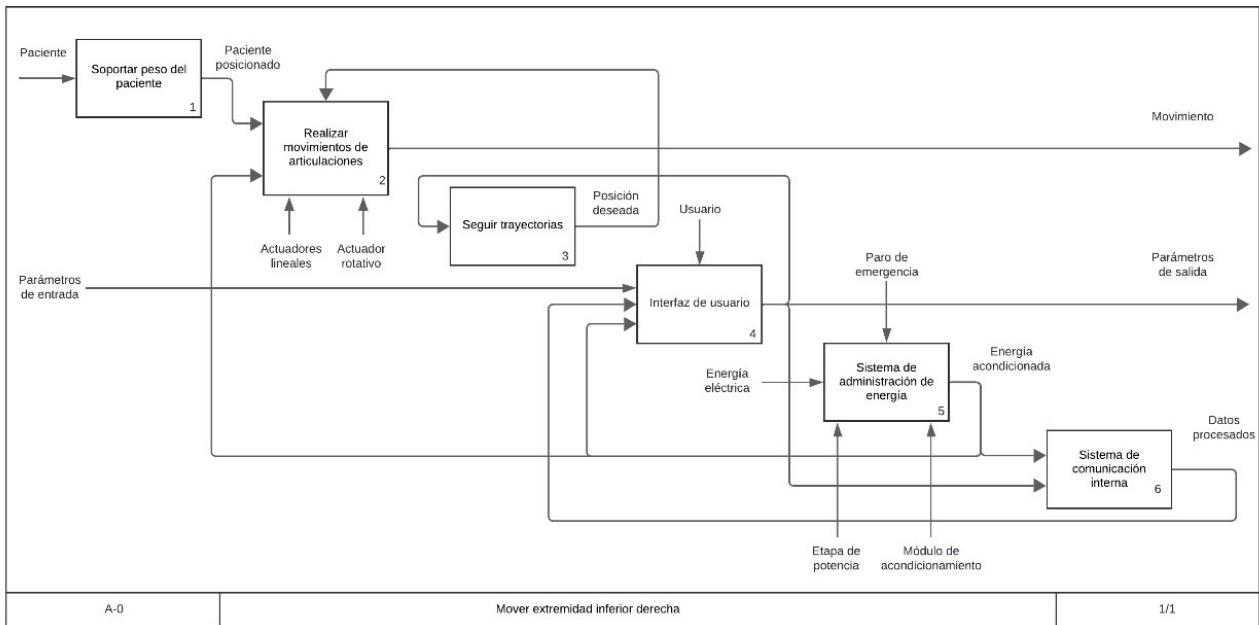


Figura 8: Diagrama del nodo A0 extendido.

7.5. Arquitectura física

En esta sección se proponen los distintos sistemas y módulos que se asocian a las funciones.

- S1. Sistema estructural.
 - M1. Módulo de seguridad mecánico.
 - S2. Sistema de energía.
 - M2. Paro de emergencia.
 - M3. Módulo de etapa de potencia.
 - M4. Módulo de acondicionamiento de energía.
 - S3. Sistema de movimiento.
 - M5. Módulo de controladores.
 - M6. Actuadores lineales.
 - M7. Actuador rotativo.
 - S4. Sistema de información.
 - M8. Interfaz Humano-Máquina.
 - M9. Módulo de acondicionamiento de señales.
 - M10. Módulo almacenamiento de datos.
 - M11. Módulo de procesamiento de datos.
 - S5. Sistema de replicación de movimiento.
 - M12. Módulo de seguimiento de trayectoria.

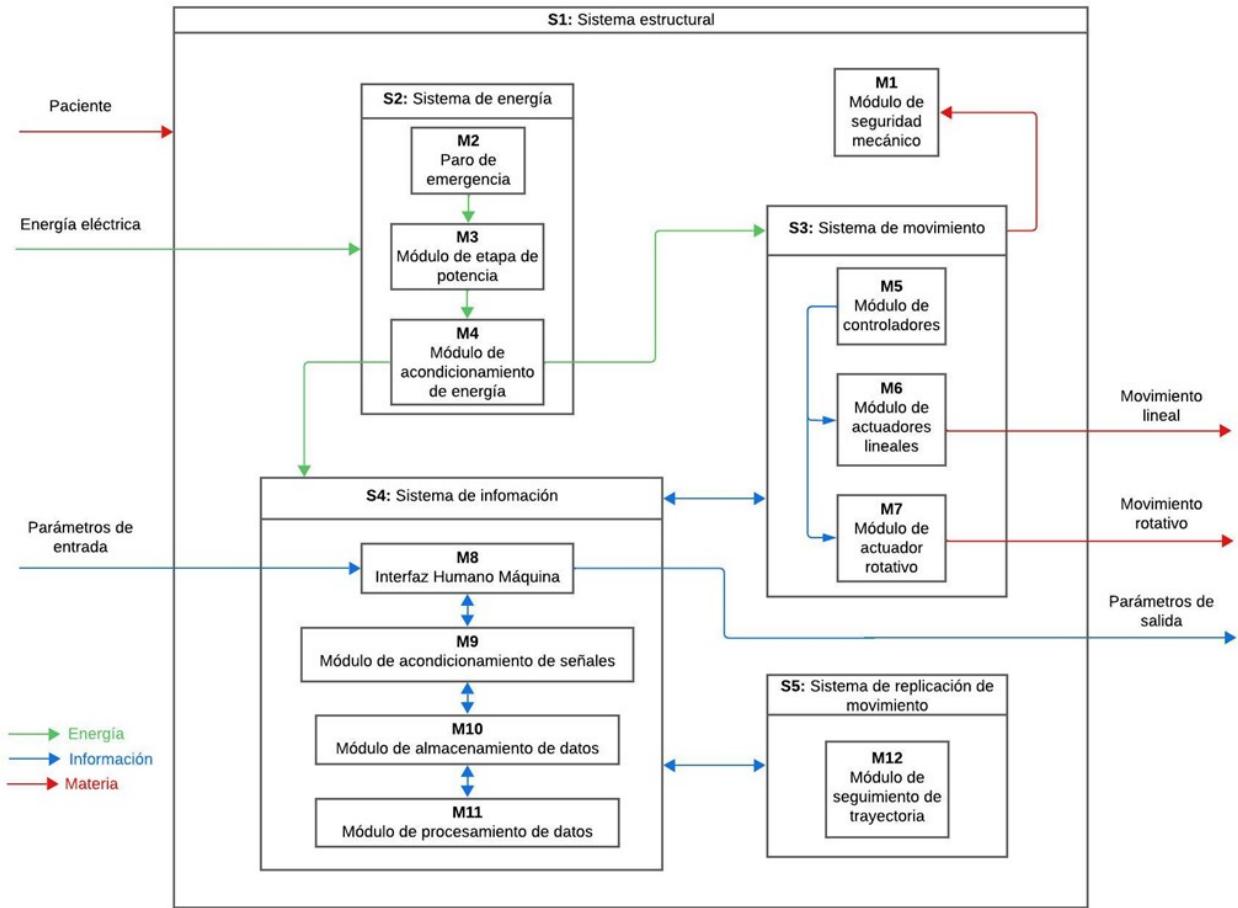


Figura 9: Arquitectura física.

En el diagrama de la Figura 9 se muestra la interacción entre los sistemas y módulos que realizarán las funciones generales de la ortesis.

Para la arquitectura física, se tienen cinco sistemas que componen el desarrollo de la ortesis robótica; el sistema S1 es el que compone toda estructura de la ortesis, dentro de este sistema se encuentra el módulo M1, en el cual se establecen las diferentes medidas de seguridad para el paciente, como topes mecánicos, cinturones de seguridad.

De igual forma, dentro del sistema S1 se encuentran los sistemas S2, S3, S4 y S5; el sistema S2 cuenta con el módulo M2 que es el encargado de proporcionar un mecanismo para el paciente en caso de presentarse alguna situación de emergencia, ya que interrumpe el suministro de energía y se detiene por completo el movimiento de la ortesis. El módulo M3 que es el encargado de generar la potencia necesaria para el correcto funcionamiento de la ortesis, y el módulo M4 que acondiciona la energía para suministrarlala correctamente a los distintos componentes de la ortesis.

El sistema S3 cuenta con el módulo M5 que realiza el control necesario para activar los actuadores de manera conjunta o separada para cumplir con las trayectorias establecidas, mientras que el módulo M6 se encarga de realizar los movimientos de flexión y extensión en las articulaciones de coxofemoral y rodilla, y el módulo M7 que realiza los movimientos de abducción y aducción de coxofemoral.

El sistema S4 cuenta con el módulo M8 que se encarga de crear una comunicación entre el fisioterapeuta y la ortesis mediante una interfaz humano-máquina, para que el fisioterapeuta pueda definir las trayectorias adecuadas durante cada sesión de rehabilitación y pueda monitorear la ejecución de las mismas, mientras que el módulo M9 acondiciona las señales del sistema para poder visualizarlas. El módulo M10 guarda aquellos datos que serán utilizados para el funcionamiento óptimo de la ortesis, y el módulo M11 se encarga de procesar los datos guardados dentro del módulo M10.

Por último, el sistema S5 que cuenta con el módulo M12 para replicar aquellas trayectorias definidas por el fisioterapeuta.

7.6. Resultados esperados

Al concluir la etapa de desarrollo dentro de un tiempo establecido en trabajo terminal II, se espera que el prototipo de la ortesis robótica sea capaz de realizar movimientos de flexión y extensión de la articulación de rodilla, así como también realizar movimientos de flexión, extensión, abducción y aducción de la articulación coxofemoral, mismos que podrán ser ajustados en cada sesión de rehabilitación que se lleve a cabo, e incluso sean ajustables los parámetros de velocidad, fuerza, y ángulos que se requieran. Para lograrlo, se contará con una interfaz humano-máquina que sea capaz de seleccionar distintos modos de operación:

- Programar ejercicios: Grabar las trayectorias que ejecutará la ortesis durante cada sesión de rehabilitación, por ejemplo, establecer el orden de realización de cada movimiento y el número de repeticiones de cada movimiento. De igual manera en este apartado se definen las velocidades de realización de cada movimiento.
- Iniciar rutina de ejercicios: En este apartado se iniciará la rutina de ejercicios que fueron establecidos por el fisioterapeuta.
- Monitorear progreso de ejercicios: Se podrán monitorear los movimientos que se ejecuten durante las sesiones, para verificar el correcto funcionamiento de los actuadores y llevar un control de todos los movimientos realizados.
- Mostrar trayectoria de actuadores: Con ayuda de la interfaz se podrán visualizar las diferentes gráficas correspondientes que muestren el movimiento realizado por los distintos actuadores de la ortesis, para verificar el cumplimiento de las trayectorias establecidas.
- Finalizar rutina de ejercicios: En caso de ser necesario se podrá finalizar la rutina de ejercicios en el momento deseado.

7.7. Escenario de pruebas

Para comprobar el funcionamiento óptimo de la ortesis robótica, se utilizarán diferentes maniquís articulados que emulen las características físicas de las personas, como el peso y la estatura, con esto se simulará un ambiente muy cercano a la realidad.

Con los maniquís se realizarán distintas pruebas de seguimiento de trayectoria que incluirán los movimientos de flexión y extensión de rodilla, y flexión, extensión, abducción y aducción de coxofemoral, esto para verificar que la ortesis pueda realizar todos los movimientos ingresados con diferentes pacientes, debido a que en cada sesión de rehabilitación se necesitan realizar diferentes movimientos de acuerdo con las características de cada uno, además se verificará el funcionamiento de todos los modos de operación integrados en la interfaz, comprobando el funcionamiento óptimo de la ortesis robótica.

En la Figura 10 se muestra el boceto preliminar del proyecto planteado en el presente protocolo de investigación.

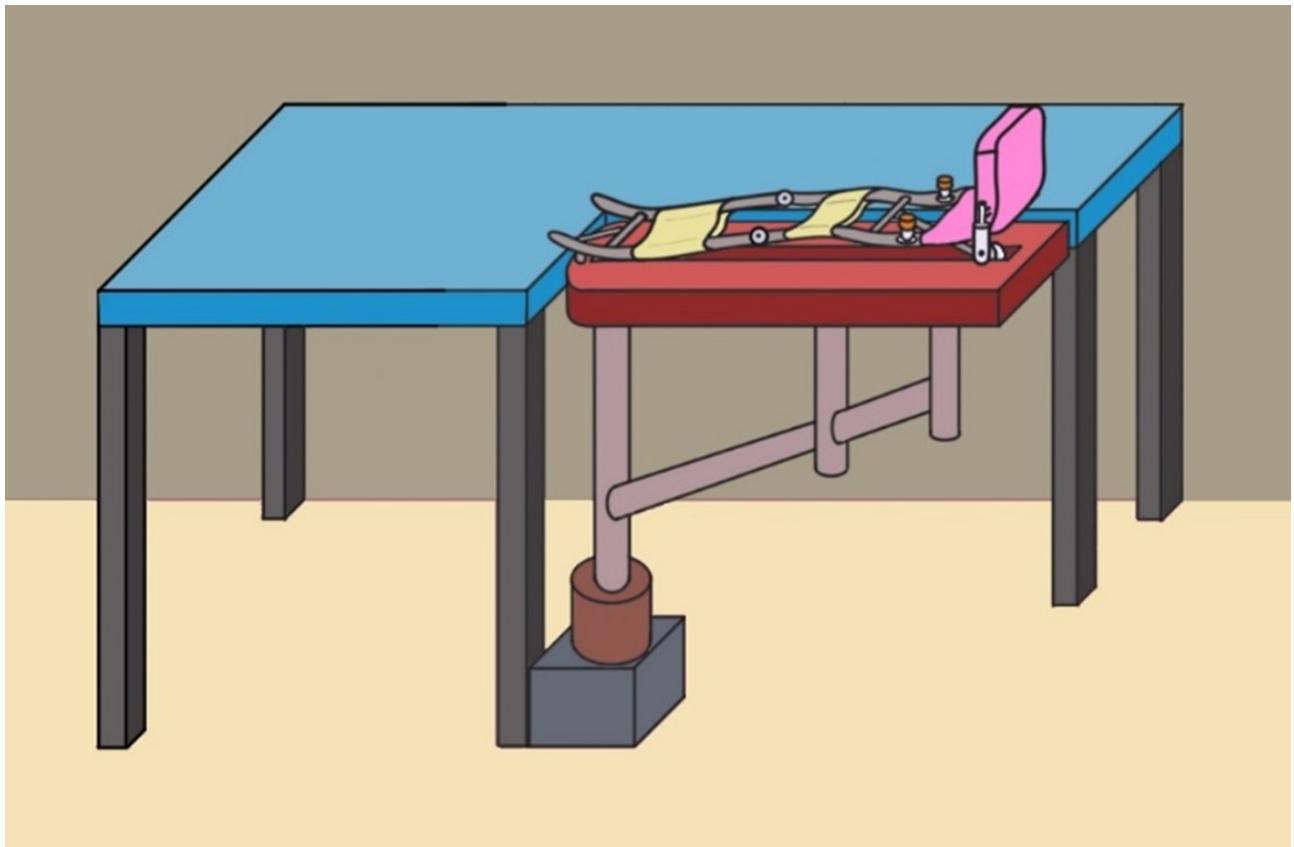


Figura 10: Boceto preliminar del proyecto.

8. Administración del proyecto

8.1. Presupuesto estimado e infraestructura

Tabla 4: Recursos Humanos disponibles para el desarrollo del proyecto.

Recursos Humanos	STEM	Instituto	Tiempo destinado
Estudiante Balderas Reyes Diego Esaú	STEM	UPIITA - IPN	810 horas
Estudiante Martínez Maldonado Sebastián	STEM	UPIITA – IPN	810 horas
Estudiante Piña Hernández Alberto	STEM	UPIITA – IPN	810 horas
Estudiante Ramírez Sabino Luis Enrique	STEM	UPIITA – IPN	810 horas
Asesor M. en C. Carvallo Domínguez Arodi Rafael	STEM	UPIITA - IPN	81 horas
Asesor Dr. Santiago Godoy Rafael	STEM	UPIITA - IPN	81 horas
		Tiempo total	3402 horas

Tabla 5: Infraestructura para el desarrollo del proyecto.

Infraestructura	Descripción	Cantidad	Uso
Laboratorio de Sistemas Digitales II	Fuente de alimentación, osciloscopio, generador de funciones	1	Verificar el funcionamiento de los circuitos electrónicos de la ortesis robótica
Laboratorios de Manufactura Básica y Manufactura Avanzada	Maquinaria industrial y herramientas	1	Maquinado de piezas de la ortesis robótica
Escenario de pruebas	Maniquí articulado	1	Validar el funcionamiento de la ortesis robótica

Tabla 6: Presupuesto estimado para el desarrollo del proyecto.

Sistema/Módulo	Recurso Material	Cantidad	Costo (MXN)	Fuente de Financiamiento
S1. Sistema estructural	Material para construir la estructura	-	\$8,000.00	Propio
M1. Módulo de seguridad mecánico	Material para construir el sistema de seguridad mecánico	-	\$1,000.00	Propio
M2. Paro de emergencia	Sistema de paro de emergencia	1	\$600.00	Propio
M3. Etapa de potencia	Circuito regulador de voltaje	1	\$2,500.00	Propio
M4. Acondicionamiento de energía	Circuito convertidor	1	\$1,500.00	Propio
	CA-CD			
M5. Controladores	Sistema de control	1	\$3,000.00	Propio
M6. Actuadores lineales	Motor lineal	2	\$5,000.00	Propio
M7. Actuador rotativo	Motor rotativo	1	\$4,000.00	Propio
M8. Interfaz	Cables de comunicación	1	\$500.00	Propio
M9. Acondicionamiento de señales	Circuito de acondicionamiento de señales	1	\$2,500.00	Propio
M10. Almacenamiento de datos	Sistema de control	1	\$500.00	Propio
M11. Procesamiento de datos	Sistema de control	1	\$500.00	Propio
M12. Seguimiento de trayectoria	Sistema de control	1	\$500.00	Propio
		Costo total	\$30,100.00	

8.2. Planeación de actividades

(**EB** - Balderas Reyes Diego Esaú, **SM** - Martínez Maldonado Sebastián, **AP** - Piña Hernández Alberto, **LR** - Ramírez Sabino Luis Enrique)

No.	Actividad	Responsables	CRONOGRAMA TRABAJO TERMINAL 1																	
			Mes 1		Mes 2		Mes 3		Mes 4		Mes 5									
			Semanas	Semanas	Semanas	Semanas	Semanas	Semanas	Semanas	Semanas	Semanas	Semanas	Semanas	Semanas	Semanas	Semanas	Semanas	Semanas	Semanas	Semanas
1	DISEÑO DEL DOMINIO ESPECÍFICO		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1.1	Diseñar mecanismo de flexión y extensión																			
1.1.2	Analizar características fisiológicas	EB, AP																		
1.1.3	Seleccionar sensores y actuadores	EB, AP, SM, LR																		
1.1.4	Modelar mecanismo mediante CAD	EB, AP																		
1.1.5	Seleccionar materiales	EB, AP, SM, LR																		
1.2	Diseñar mecanismo de abducción y aducción																			
1.2.1	Analizar características fisiológicas	EB, AP																		
1.2.2	Seleccionar sensores y actuadores	EB, AP, SM, LR																		
1.2.3	Modelar mecanismo mediante CAD	EB, AP																		
1.2.4	Seleccionar materiales	EB, AP, SM, LR																		
1.3	Diseñar la estructura mecánica de la cama																			
1.3.1	Definir medidas de la estructura base	EB, AP, SM, LR																		
1.3.2	Analizar las cargas en la estructura	EB, AP																		
1.3.3	Modelar mecanismo mediante CAD	EB, AP																		
1.3.4	Analizar uniones y sujetaciones en la base	EB, AP																		
1.3.5	Seleccionar materiales	EB, AP, SM, LR																		
1.4	Diseñar sistema de seguridad mecánico																			
1.4.1	Analizar las zonas de riesgo	EB, AP																		
1.4.2	Modelar topes mecánicos mediante CAD	EB, AP																		
1.4.3	Seleccionar materiales	EB, AP, SM, LR																		
1.5	Diseñar sistema de energía																			
1.5.1	Seleccionar tipo de alimentación	SM, LR																		
1.5.2	Seleccionar componentes	EB, AP, SM, LR																		
1.5.3	Diseñar circuito eléctrico	SM, LR																		
1.6	Diseñar etapa de control																			
1.6.1	Analizar modelos matemáticos	EB, AP, SM, LR																		
1.6.2	Diseñar modelos dinámicos	SM, LR																		
1.6.3	Definir ecuaciones de movimiento	EB, AP, SM, LR																		
1.7	Diseñar etapa de potencia																			
1.7.1	Seleccionar componentes	EB, AP, SM, LR																		
1.7.2	Desarrollar circuito eléctrico	SM, LR																		
1.8	Diseñar etapa de acondicionamiento																			
1.8.1	Seleccionar componentes	EB, AP, SM, LR																		
1.8.2	Desarrollar circuito eléctrico	SM, LR																		
1.9	Diseñar sistema de seguridad eléctrico																			
1.9.1	Analizar medios de riesgo	SM, LR																		
1.9.2	Seleccionar componentes	EB, AP, SM, LR																		
1.9.3	Desarrollar circuito eléctrico	SM, LR																		
2	Planificar la interfaz de control																			
2.0.1	Seleccionar lenguaje de programación	SM, LR																		
2.0.2	Seleccionar componentes para la interfaz de control	SM, LR																		
3	INTEGRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS SISTEMAS																			
3.1	Ensamblaje de los componentes mecánicos	EB, AP, SM, LR																		
3.2	Validación de los sistemas eléctricos	EB, AP, SM, LR																		
3.3	Validación de los sistemas de seguridad	EB, AP, SM, LR																		
3.4	Validación de los modelos dinámicos	EB, AP, SM, LR																		
3.5	Validación de la interfaz de control	EB, AP, SM, LR																		
3.6	Validación de sistemas de la ortesis robótica	EB, AP, SM, LR																		
4	DOCUMENTACIÓN DEL PROYECTO																			
4.1	Redacción de reporte de TT1	EB, SM, AP, LR																		
5	PRESENTACIÓN DEL PROYECTO																			
5.1	Presentación final del proyecto TT1	EB, SM, AP, LR																		

Figura 11: Cronograma de actividades de TT1.

No.	Actividad	Responsables	CRONOGRAMA TRABAJO TERMINAL 2																	
			Mes 1				Mes 2				Mes 3				Mes 4				Mes 5	
			Semanas		Semanas		Semanas		Semanas		Semanas		Semanas		Semanas		Semanas		Semanas	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
6	INTEGRACIÓN FÍSICA DE LOS MÓDULOS																			
6.1	Fabricar el mecanismo de flexión y extensión																			
6.1.1	Adquirir componentes del mecanismo	EB, AP, SM, LR																		
6.1.2	Manufacturar componentes	EB, AP																		
6.1.3	Ensamblar los componentes	EB, AP																		
6.1.4	Validar el funcionamiento	EB, AP																		
6.2	Fabricar mecanismo de abducción y aducción																			
6.2.1	Adquirir componentes del mecanismo	EB, AP, SM, LR																		
6.2.2	Manufacturar componentes	EB, AP																		
6.2.3	Ensamblar los componentes	EB, AP																		
6.2.4	Validar el funcionamiento	EB, AP																		
6.3	Fabricar la estructura mecánica de la cama																			
6.3.1	Adquirir componentes de la estructura	EB, AP, SM, LR																		
6.3.2	Manufacturar componentes	EB, AP																		
6.3.3	Ensamblar componentes de la estructura	EB, AP																		
6.3.4	Validar medidas de la estructura	EB, AP																		
6.4	Desarrollar el sistema de seguridad mecánico																			
6.4.1	Adquirir componentes del sistema	EB, AP, SM, LR																		
6.4.2	Manufacturar componentes	EB, AP																		
6.4.3	Integrar componentes al sistema	EB, AP																		
6.4.4	Validar funcionamiento	EB, AP																		
6.5	Desarrollar sistema de energía																			
6.5.1	Adquirir componentes	EB, AP, SM, LR																		
6.5.2	Fabricar placa de componentes	SM, LR																		
6.5.3	Integrar los componentes	SM, LR																		
6.5.4	Validar funcionamiento	SM, LR																		
6.6	Desarrollar etapa de control																			
6.6.1	Adquirir componentes	EB, AP, SM, LR																		
6.6.2	Integrar los componentes	SM, LR																		
6.6.3	Programar las ecuaciones de movimiento	SM, LR																		
6.6.4	Validar el funcionamiento	EB, AP, SM, LR																		
6.7	Fabricar etapa de potencia																			
6.7.1	Adquirir componentes	EB, AP, SM, LR																		
6.7.2	Fabricar placa de componentes	SM, LR																		
6.7.3	Integrar los componentes	SM, LR																		
6.7.4	Validar funcionamiento	SM, LR																		
6.8	Fabricar etapa de acondicionamiento																			
6.8.1	Adquirir componentes	EB, AP, SM, LR																		
6.8.2	Fabricar placa de componentes	SM, LR																		
6.8.3	Integrar los componentes	SM, LR																		
6.8.4	Validar funcionamiento	SM, LR																		
6.9	Fabricar sistema de seguridad eléctrico																			
6.9.1	Adquirir componentes	EB, AP, SM, LR																		
6.9.2	Fabricar placa de componentes	SM, LR																		
6.9.3	Integrar los componentes	SM, LR																		
6.9.4	Validar funcionamiento	SM, LR																		
7	Desarrollar la interfaz de control																			
7.0.1	Adquirir componentes	EB, AP, SM, LR																		
7.0.2	Integrar los componentes	SM, LR																		
7.0.3	Programar la interfaz de control	EB, AP, SM, LR																		
7.0.4	Validar funcionamiento	EB, AP, SM, LR																		
8	INTEGRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODULOS FÍSICOS																			
8.1	Montaje de los componentes mecánicos en la estructura	EB, AP																		
8.2	Integrar el sistema eléctrico a la estructura	SM, LR																		
8.3	Integrar el sistema de seguridad a la estructura	EB, AP, SM, LR																		
8.4	Integrar la interfaz de control	EB, AP, SM, LR																		
8.5	Validar funcionamiento del sistema mecánico del ensamblaje	EB, AP, SM, LR																		
8.6	Validar funcionamiento del sistema eléctrico del ensamblaje	EB, AP, SM, LR																		
8.7	Validar funcionamiento del sistema de seguridad del ensamblaje	EB, AP, SM, LR																		
8.8	Validar funcionamiento de la interfaz de control del ensamblaje	EB, AP, SM, LR																		
8.9	Validar funcionamiento de los sistemas en conjunto	EB, AP, SM, LR																		
9	DOCUMENTACIÓN DEL PROYECTO																			
9.1	Redacción de reporte de TT2	EB, SM, AP, LR																		
10	PRESENTACIÓN DEL PROYECTO																			
10.1	Presentación final del proyecto TT2	EB, SM, AP, LR																		

Figura 12: Cronograma de actividades de TT2.

Referencias

- [1] G. Cioni, G. Sgandurra, S. Muzzini, P. B. Paolicelli y A. Ferrari, “Forms of hemiplegia”, en The Spastic Forms of Cerebral Palsy. Milano: Springer Milan, 2010, pp. 331–356. Accedido el 1 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible: https://doi.org/10.1007/978-88-470-1478-7_16
- [2] INEGI, “Estadística de defunciones registradas de enero a junio de 2022 (preliminar)”, Ciudad de México, 29/23, 24 de enero de 2023. Accedido el 1 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/DR/DR-Ene-jun2022.pdf>
- [3] Estela. “Efectos de la inmovilización y tratamiento con fisioterapia”. Fisalia. Accedido el 1 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://fisalia.es/efectos-inmovilizacion-tratamiento-fisioterapia/>
- [4] Ú. Costa y S. Díez, “Robótica para la rehabilitación”, Sobreruedas, vol. 102, pp. 16–20, 2020. Accedido el 22 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible: https://siidon.guttmann.com/files/sr_102_robotica_costa_diez.pdf
- [5] B. Y. Noa, M. Torres y J. Nodarse, “Terapia robótica en la rehabilitación del miembro superior hemipléjico en pacientes con enfermedad cerebrovascular”, Medimay, p. 6, 2021. Accedido el 22 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.medigraphic.com/pdfs/revciemedhab/cmh-2021/cmh211n.pdf>
- [6] Patrick, D. (2014). Orthotics. En A comprehensive guide to geriatric rehabilitation (pp. 497–500). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7020-4588-2.00069-3>
- [7] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, “Riesgos en trabajos de fisioterapia”, Erga Form. Prof., n.º 73, 2011. Accedido el 1 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.insst.es/documents/94886/160640/N%C3%BAmero+73.+RIESGOS+EN+TRABAJOS+DE+FISIOTERAPIA.pdf>
- [8] A. S. Muñoz Pinto, “Lokomat en la re-educación de la marcha en personas hemipléjicas post accidente cerebro vascular”, Trabajo de grado, Univ. Tec. Ambato, Ambato, Ecuador, 2016. Accedido el 1 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/22862/2/PROYECTO%20DE%20INVESTIGACION%20LOKOMAT.pdf>
- [9] E. Jiménez Vázquez, “Diseño de exoesqueleto de apoyo a la motricidad para la articulación de cadera”, Trabajo de grado, Inst. Politec. Nac., Ciudad de México, 2014. Accedido el 28 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/17893/1/Diseno%20de%20exoesqueleto%20de%20apoyo%20a%20la%20motricidad%20para%20la%20articulacion%20de%20cadera.pdf>
- [10] C. H. Guzmán Valdivia, A. Blanco Ortega, M. A. Oliver Salazar, F. A. Gómez Becerra y J. L. Carrera Escobedo, “HipBot – The design, development and control of a therapeutic robot for hip rehabilitation”, Mechatronics, vol. 30, pp. 55–64, septiembre de 2015. Accedido el 1 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.06.007>

- [11] C. B. Sanz-Morère et al., “An active knee orthosis with a variable transmission ratio through a motorized dual clutch”, Mechatronics, vol. 94, p. 103018, octubre de 2023. Accedido el 1 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2023.103018>
- [12] López, R., Aguilar, H., Salazar, S., Lozano, R., & Torres, J. A. (2014). Modelado y Control de un Exoesqueleto para la Rehabilitación de Extremidad Inferior con dos grados de libertad. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, 11(3), 304–314. Accedido el 1 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.ria.2014.02.008>
- [13] X. L. Albornoz Tepán, “Robotic orthosis for bilateral rehabilitation of left hand for patients with hemiplegia”, I+T+C Investig. Tecnol. Cienc., vol. 1, no. 13, pp. 10–15, Dec. 2019. Accedido el 1 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible: https://revistas.unicomfacauca.edu.co/ojs/index.php/itc/article/view/itc2019_pag_10_15
- [14] Alianza B@UNAM, CCH & ENP ante la pandemia. (2024, 18 de febrero). Planos anatómicos y términos direccionales. <https://alianza.bunam.unam.mx/enp/planos-anatomicos-y-terminos-direccionales/>
- [15] Articulaciones y ligamentos. (2024). Visible Body. <https://www.visiblebody.com/es/learn/skeleton/joints-and-ligaments>
- [16] Azucar, R. (2023, 30 de octubre). Articulación coxofemoral. Kenhub. <https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/articulacion-coxofemoral>
- [17] Saldívar Paredes, M. (2018). Descripción morfológica y biomecánica de la articulación de la rodilla del canino (*Canis lupus familiaris*). CES Medicina Veterinaria y Zootecnia, 13(3), 294–307. <https://doi.org/10.21615/cesmvz.13.3.1>
- [18] Navarro, B. (2023, 30 de octubre). Tipos de movimientos del cuerpo humano. Kenhub. <https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/tipos-de-movimientos-del-cuerpo-humano>
- [19] Junquera, M. (2013, 18 de abril). Fases de la hemiplejia. FisiOnline. <https://www.fisioterapia-online.com/articulos/fases-de-la-hemiplejia>
- [20] American Stroke Association. (2019, 7 de abril). Hemiparesis. www.stroke.org. <https://www.stroke.org/en/about-stroke/effects-of-stroke/physical-effects/hemiparesis>
- [21] Con la EM. (s.f.). ¿Qué es la hemiparesia? Causas, síntomas y tratamiento. Esclerosis Múltiple: Todo lo que debes saber. <https://www.conlaem.es/esclerosis-multiple/glosario/hemiparesia>
- [22] Panzhinskiy, E., Culver, B., Ren, J., Bagchi, D., & Nair, S. (2019). Role of mammalian target of rapamycin in muscle growth. En Nutrition and enhanced sports performance (pp. 251–261). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813922-6.00022-9>

- [23] Muscular dystrophy - Symptoms & causes. (2022, 11 de febrero). Mayo Clinic. <https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/muscular-dystrophy/symptoms-causes/syc-20375388>
- [24] Nagy, P. V. (1989). Trajectory tracking control for industrial robots. *Journal of Mechanical Working Technology*, 20, 273–281. [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(89\)90037-5](https://doi.org/10.1016/0378-3804(89)90037-5)
- [25] Siciliano, B., Villani, L., & Sciavicco, L. (2009). *Robotics: Modelling, planning and control*. Springer.
- [26] Gausemeier, J., & Moehringer, S. (2002). VDI 2206- A new guideline for the design of mechatronic systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 35(2), 785–790. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)34035-1](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)34035-1)
- [27] InformedHealth.org. (2024, 19 de marzo). In brief: Physical therapy. National Center for Biotechnology Information. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK561514/>
- [28] Bonaldo, P., & Sandri, M. (2012). Cellular and molecular mechanisms of muscle atrophy. *Disease Models & Mechanisms*, 6(1), 25–39. <https://doi.org/10.1242/dmm.010389>
- [29] Panzhinskiy, E., Culver, B., Ren, J., Bagchi, D., & Nair, S. (2019). Role of mammalian target of rapamycin in muscle growth. En Nutrition and enhanced sports performance (pp. 251–261). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813922-6.00022-9>
- [30] Sun, X., Xu, K., Shi, Y., Li, H., Li, R., Yang, S., Jin, H., Feng, C., Li, B., Xing, C., Qu, Y., Wang, Q., Chen, Y., & Yang, T. (2021). Discussion on the rehabilitation of stroke hemiplegia based on interdisciplinary combination of medicine and engineering. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2021, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2021/6631835>