

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**INVESTIGACIÓN SOBRE EL DISEÑO DE UN MECANISMO PARA EL
MOVIMIENTO DE LAS CADERAS EN EL PLANO FRONTAL DE UN
EXOESQUELETO DE MIEMBRO INFERIOR PARA LA MARCHA HUMANA**

**Trabajo de investigación para la obtención del grado académico de BACHILLER
EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**

AUTOR:

Juan Alejandro Mendoza Zapata

ASESORA:

MSc. Ing. Rocío Liliana Callupe Pérez

Lima, Agosto, 2020

Resumen

El objetivo del presente trabajo es el diseño preliminar de un mecanismo para el movimiento de las caderas en el plano frontal del exoesqueleto PUCP durante el ciclo de la marcha humana sobre el sitio. Debido a la considerable cantidad de personas con discapacidad esquelético-muscular en el Perú según el Consejo Nacional para la Integración de la Persona con Discapacidad y la necesidad de desarrollar tecnologías que mejoren los dispositivos de rehabilitación existentes. Así, la metodología aplicada es la regida por VDI 2206, donde se desarrolla: la identificación de la problemática; planteamiento del objetivo general y específicos y propuesta de solución; una revisión del estado del arte asociado al mecanismo teniendo en cuenta trabajos y estudios anteriores sobre dispositivos de asistencia en rehabilitación; presentación de las exigencias que requiere el diseño para determinar las funciones de la máquina en relación al movimiento de caderas en el plano frontal que contiene señales, uso de energía, componentes mecánicos, eléctricos y de control; una matriz morfológica de cada función con distintos principios de solución; finalmente, se proponen conceptos de solución en base a sus combinaciones para hallar el concepto de solución óptimo tomando en cuenta el dimensionamiento del sistema a través de un análisis técnico-económico; Como resultado, se obtuvo el diseño mecánico preliminar de un mecanismo para el movimiento de las caderas en el plano frontal del exoesqueleto PUCP durante el ciclo de la marcha humana sobre el sitio. Se concluye que el presente documento contribuye al desarrollo de nuevas tecnologías para los dispositivos de rehabilitación, en este caso en el diseño de un prototipo mecanismo de cadera que añada el movimiento en el plano frontal del Exoesqueleto PUCP.

Índice de contenido

	Pág.
Resumen	ii
Índice de tablas	v
Índice de figuras	vi
Introducción.....	vii
Capítulo 1 Antecedentes y problemática	1
1.1 Problemática	1
1.2 Propuesta de solución	3
1.2.1 Alcance	3
1.2.2 Limitaciones	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Metodología aplicada.....	4
1.5 Marco teórico.....	5
1.5.1 Fisiología de cadera.....	5
1.5.2 Marcha normal.....	6
1.5.3 Biomecánica de la cadera	7
1.6 Estado del arte.....	9
1.6.1 Exoesqueletos de marcha humana sobre el sitio	10
1.6.2 Exoesqueleto de marcha humana con desplazamiento.....	11
1.6.3 Tesis y patentes.....	12
1.6.4 Papers.....	19
1.6.5 Sensores.....	20
1.6.6 Actuadores.....	21
1.6.7 Controladores.....	23
Capítulo 2 Diseño conceptual.....	24

2.1	Lista de exigencias.....	24
2.2	Estructura de funciones.....	26
2.2.1	<i>Black box</i>	26
2.2.2	<i>Lista de funciones</i>	28
2.3	Matriz morfológica.....	31
2.4	Concepto de solución.....	34
2.5	Evaluación técnica-económica.....	39
	Conclusiones	43
	Bibliografía	44



Índice de tablas

Tabla 1. Tabla comparativa entre acelerómetros.....	21
Tabla 2. Tabla comparativa entre motor paso a paso y servomotor.....	22
Tabla 3. Tabla comparativa entre microcontrolador y PLC.....	23
Tabla 4.a Lista de exigencias.....	24
Tabla 4.b Lista de exigencias.....	25
Tabla 4.c Lista de exigencias.....	26
Tabla 5. Matriz Morfológica.....	31
Tabla 6. Evaluación técnica-económica.....	41



Índice de figuras

FIGURA 1. DISTRIBUCIÓN NACIONAL CON SOLO UNA DEFICIENCIA REGISTRADA POR EL CONADIS.	2
FIGURA 2. ARTICULACIÓN DE LA CADERA.	6
FIGURA 3. CICLO DE LA MARCHA.	8
FIGURA 4. ÁNGULO DE CADERA DURANTE UN CICLO DE MARCHA.	9
FIGURA 5. EXOESQUELETO LOCOMAT.	10
FIGURA 6. EXOESQUELETO HAL.	11
FIGURA 7. EXOESQUELETO REX.	12
FIGURA 8. LOCOMOTION ASSISTING DEVICE AND METHOD - US8096965B2.	13
FIGURA 9. EXOSKELETON AND METHOD FOR CONTROLLING A SWING LEG OF THE EXOSKELETON - US8801641B2.	15
FIGURA 10. EXOSKELETON LOAD HANDLING SYSTEM AND METHOD OF USE - EP2556009B1.	16
FIGURA 11. ORTHOPEDIC APPARATUS FOR WALKING AND REHABILITATING DISABLED PERSONS INCLUDING TETRAPLEGIC PERSONS AND FOR FACILITATING AND STIMULATING THE REVIVAL OF COMATOSE PATIENTS THROUGH THE USE OF ELECTRONIC AND VIRTUAL REALITY UNITS - US5961541A.	17
FIGURA 12. SUBSISTEMA TIPO EXOESQUELETO.	18
FIGURA 13. DESIGN ON MECHANISM OF LOWER LIMB REHABILITATION ROBOT BASED ON NEW BODY WEIGHT SUPPORT (BWS) SYSTEM.	20
FIGURA 14. BLACK BOX DEL SISTEMA.	28
FIGURA 15. ESTRUCTURA DE FUNCIONES.	30
FIGURA 16. CONCEPTO DE SOLUCIÓN 1.	35
FIGURA 17. CONCEPTO DE SOLUCIÓN 2.	37
FIGURA 18. CONCEPTO DE SOLUCIÓN 3.	38
FIGURA 19. GRÁFICO TÉCNICO-ECONÓMICO ENTRE LAS SOLUCIONES.	42

Introducción

La robótica en dispositivos para la rehabilitación de cadera es hoy en día una tecnología prometedora llena de retos por resolver. Se sabe que existen prototipos que ayudan en la rehabilitación de las personas, aunque muchos de ellos solo en el movimiento en el plano sagital. Sin embargo, es importante considerar el movimiento de las caderas en el plano frontal en dispositivos para rehabilitación de movimiento en extremidades inferiores como por ejemplo en la marcha humana, según Marco Zans “En el plano frontal, durante el periodo portante las acciones musculares estabilizadoras son imprescindibles y a nivel de la cadera hay una caída de la pelvis de unos 5 grados hacia el lado oscilante siendo necesaria la contracción potente de los **abductores**, para evitar un mayor descenso” (Marco Sanz).

El contenido de este trabajo se divide en 2 capítulos. En el primer capítulo se presentan: como la tecnología de rehabilitación de tipo robótica puede asistir a un paciente con discapacidad de miembros inferiores a realizar una marcha o caminata normal; la problemática social al identificar la población objetivo que puede usar tecnología de rehabilitación robótica; información de la fisiología y biomecánica de la cadera, específicamente el ángulo de la articulación de cadera en plano frontal; y el estado de arte que consistió en información actual de exoesqueleto de marcha humana sobre el sitio y con desplazamiento con énfasis en el estudio del movimiento de cadera humana. Donde se considera equipos comerciales y trabajos de investigación en diferentes universidades. Y en el segundo capítulo se presentan: los requerimientos del sistema a diseñar, las funciones que el sistema debe cumplir y la evaluación técnica-económica sobre 3 propuestas de solución para elegir la solución óptima sobre la cual se profundiza la investigación. Es importante mencionar que este trabajo se basa en el Exoesqueleto PUCP diseñado en el laboratorio LIBRA, por lo que la estructura general de este como los

soportes de los actuadores del plano sagital y los eslabones ya han sido seleccionados y su diseño no es parte de este proyecto.



Capítulo 1

Antecedentes y problemática

En este capítulo se presenta cómo la tecnología de rehabilitación de tipo robótica puede asistir a un paciente con discapacidad de miembros inferiores a realizar una marcha o caminata normal. Además, se presenta la problemática social identificando la población objetivo que puede usar este tipo de tecnología. Finalmente, se hace un estudio de la fisiología y biomecánica de la cadera, específicamente el ángulo de la articulación de cadera en plano frontal.

1.1 Problemática

En la industria de dispositivos de rehabilitación de la marcha robóticos comerciales se cuenta con varias empresas como Hocoma entre otras que solo consideran el movimiento de cadera en el plano sagital, de igual forma los diferentes estudios en laboratorios de Europa, América y Japón como es el caso del Exoesqueleto de miembro inferior PUCP, trabajo del laboratorio LIBRA PUCP, que ejecuta la caminata de una persona normal únicamente en el plano sagital. Esto se debe a que no dispone del movimiento de las caderas en el plano frontal. Como consecuencia, el movimiento de la marcha no es real debido a la ausencia del movimiento de la cadera en el plano frontal.

De al Consejo Nacional para la Integración de la Persona con Discapacidad De los pacientes identificados con deficiencias músculo-esqueléticas, el 58% se encuentra entre los 18 y 59 años (CONADIS Consejo Nacional para la Integración de la Persona con Discapacidad, 2018). Se puede observar de estas cifras que hay una gran cantidad de personas en edad laboral con deficiencias músculo-esqueléticas, lo cual genera un impacto socio-económico en el desarrollo del país.

Como se puede observar en la Figura 1, las deficiencias del tipo músculo-esqueléticas corresponden al grupo más grande de deficiencias, por ello se genera un interés social para desarrollar nuevas tecnologías que puedan ayudar al tratamiento médico de estas deficiencias.

POBLACIÓN INSCRITA EN EL REGISTRO NACIONAL DE LA PERSONA CON DISCAPACIDAD
CON SOLO UNA DEFICIENCIA, 2000-2017

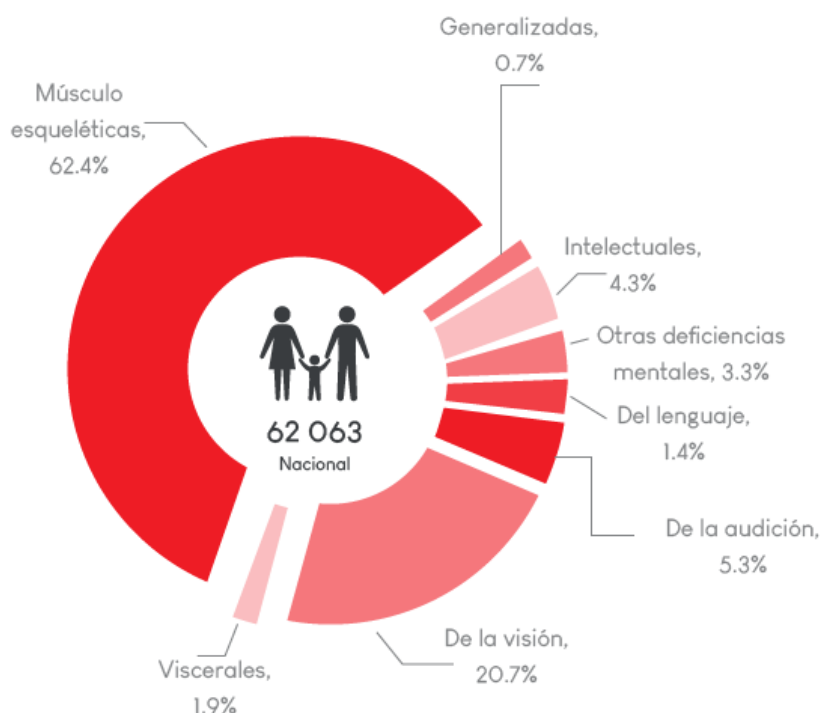


Figura 1. Distribución nacional con solo una deficiencia registrada por el CONADIS.

Fuente: (CONADIS Consejo Nacional para la Integración de la Persona con Discapacidad, 2018).

1.2 Propuesta de solución

Teniendo en cuenta la problemática descrita en el inciso anterior, se requiere el diseño de un mecanismo que permita el movimiento de las caderas en el plano frontal del Exoesqueleto PUCP durante el ciclo de la marcha humana sobre el sitio.

1.2.1 Alcance

- Se realizará el diseño mecánico del prototipo mecanismo de cadera con movimiento en plano frontal.
- El diseño si incluye la selección de sensores y actuadores.
- Se propondrá una estrategia de control; sin embargo, no se realizará la obtención de los parámetros de control.

1.2.2 Limitaciones

- El diseño no incluye el código de programación del microcontrolador que dirige el control de los actuadores.
- El trabajo de investigación no incluye la implementación del diseño.

1.3 Objetivos

A continuación, se presentarán el objetivo general y los objetivos específicos del presente trabajo.

1.3.1 Objetivo general

Diseñar un prototipo mecanismo de cadera que añada el movimiento en el plano frontal de un exoesqueleto en sitio.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar un estudio y análisis de la información sobre exoesqueletos, fisiología, movimiento de cadera, sensores, actuadores y estrategia de control.
- Diseñar un mecanismo que añada un movimiento de cadera en el plano frontal en sitio.
- Evaluar el mecanismo que añada un movimiento de cadera en el plano frontal en base a las exigencias para determinar las funciones de la máquina que contiene señales, uso de energía, componentes mecánicos, eléctricos y de control.

1.4 Metodología aplicada

Para el presente proyecto se utilizarán las metodologías de diseño mecatrónico (VDI 2206). A continuación, se explicará cómo se desarrolla esta metodología.

- Definición de la problemática
- Planteamiento de hipótesis general, objetivo general, objetivos específicos y propuesta de solución.

- Revisar el estado del arte asociado al mecanismo teniendo en cuenta trabajos y estudios anteriores.
- Establecer las exigencias que requiere el diseño para determinar las funciones de la máquina que contiene señales, uso de energía, componentes mecánicos, eléctricos y de control.
- Realizar una matriz morfológica de cada función con distintos principios de solución.
- Proponer conceptos de solución en base a sus combinaciones y hallar el concepto de solución óptimo en base a un análisis técnico-económico.
- Realizar un diseño preliminar con el dimensionamiento del sistema analizando geometría, esquemas y planos.
- Elaborar estrategias de control y cálculos preliminares mecánicos y eléctricos.
- Seleccionar de forma aproximada y preliminar los materiales mecánicos, eléctricos (sensores y actuadores) y de control que cumplan con las exigencias del proyecto y los resultados de los cálculos y estrategias de control.
- Realizar el proyecto definitivo determinando los materiales definitivos del sistema.
- Elaborar los planos mecánicos, eléctricos y/o electrónicos.
- Simular el sistema para corroborar resultados teóricos y simulados

1.5 Marco teórico

1.5.1 Fisiología de cadera

La articulación de la cadera o articulación coxofemoral es una enartrosis de tipo esferoidal muy estable que se da entre la cabeza esférica del fémur y la cavidad cotiloidea o acetábulo del hueso coxal (ver Figura 2). Estas dos estructuras que la forman está muy

adaptadas la una a la otra, lo que confiere una gran estabilidad a la articulación, encajan a la perfección (ANATOMIAUI1, 2014).

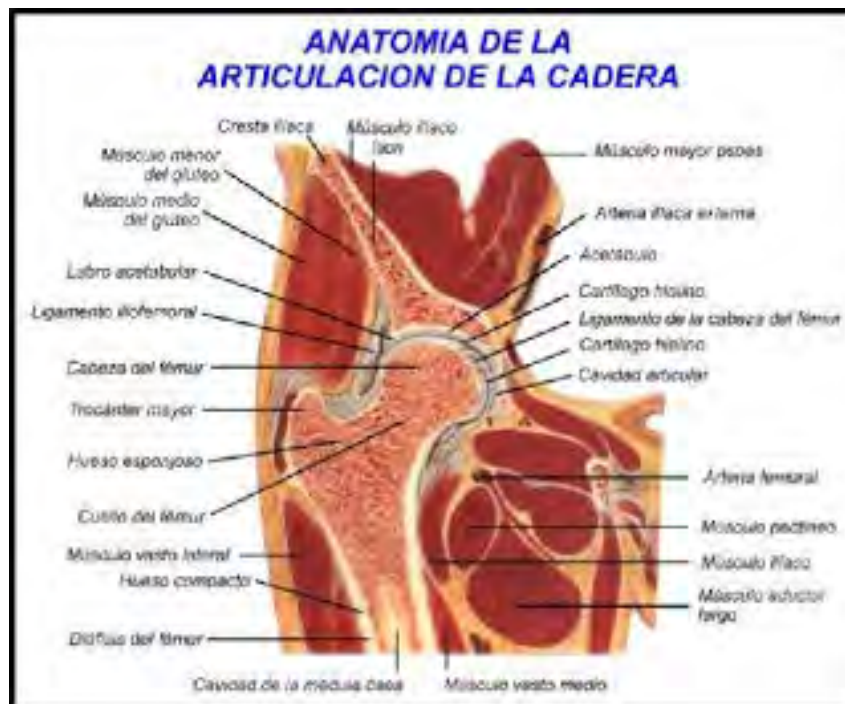


Figura 2. Articulación de la cadera.

Fuente: (El Húmero, 2011).

1.5.2 Marcha normal

La locomoción humana normal es estudiada por la literatura ampliamente. Este trabajo toma la definición del ciclo de la marcha según Marco Sanz:

La fase de apoyo constituye alrededor del 60% del ciclo y la fase de oscilación representa el 40% restante. Las fases del ciclo de marcha, para facilitar su estudio suelen dividirse, todavía, en componentes más pequeños o subfases, según la siguiente secuencia: El ciclo se inicia con el impacto de talón en el suelo; al 15% el antepié también contacta con el suelo, por lo que esta subfase se denomina "pie plano sobre el suelo" o media; al 40% del ciclo, el talón comienza a elevarse del suelo (subfase de despegue de talón o final), al 50%, despega el antepié, que culmina al 60% del ciclo con el despegue de los dedos, lo que indica también el comienzo de la fase de oscilación. La atribución de percentiles en esta fase es algo imprecisa,

- abducción/aducción
- rotación interna/externa.

Dentro de la investigación biomecánica del movimiento abducción/aducción de cadera se tienen trabajos que presentan el estudio de los ligamentos de la articulación de la cadera como los siguientes (Mazzucchelli, 2001):

- Ligamento pubofemoral con fibras que se tensan en los movimientos de abducción y extensión.
- Ligamento isquiofemoral que refuerza la capsula articular.

Otros estudios en la biomecánica de cadera se centran en el estudio del comportamiento de los músculos que intervienen en la articulación de cadera en el plano frontal como el trabajo de Hooglyet (1997), donde hizo el estudio de los movimientos de extremidades inferiores en el control de equilibrio en el plano frontal durante la postura de una pierna. Hooglyet menciona la estrategia compensatoria de la cadera, y la existencia de fuerzas de corte horizontal que son originadas por la rotación de la parte superior del cuerpo alrededor de la articulación de cadera, estas intervienen en el control del equilibrio.

En este trabajo es importante definir el movimiento de abducción de cadera. Así, según Reategui (2012) y basándose en el trabajo de Winter (1991): “En el plano frontal, instante del choque del talón, el ángulo de aducción es de 10° , el cual disminuye hasta alcanzar 5° en la fase de respuesta a la carga. Después de alcanzar la angulación neutra, inicia la fase de oscilación con 5° de abducción”. En la Figura 4 se puede observar el ángulo de abducción/aducción de la cadera durante un ciclo de marcha.

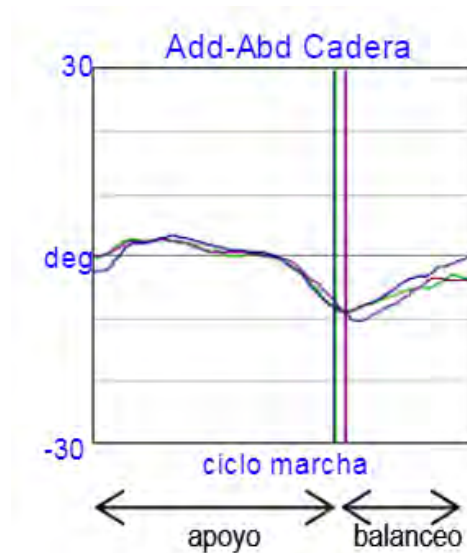


Figura 3. Ángulo de cadera durante un ciclo de marcha.

Fuente: (Villarroya, y otros, 2008).

Además de tener variables cinéticas: movimientos rotacionales de flexión/extensión de tobillo, rodilla y cadera; movimientos de abducción/aducción de cadera entre otros. También, es importante conocer los mecanismos de fuerza de transmisión y su control en el cuerpo humano. Los diseñadores de equipos asistidos de rehabilitación requieren entender bien las estructuras y mecanismos del cuerpo humano y saber sus límites para que el equipo contribuya en la mejora del desempeño humano o que sus especificaciones funcionales sean compatibles con los límites de seguridad (Ambrósio & Abrantes, 2007)

1.6 Estado del arte

En este capítulo, se presenta el estado del arte sobre el asunto de: estudio: exoesqueleto de marcha humana sobre el sitio y con desplazamiento. Donde se considera equipos comerciales y trabajos de investigación en diferentes universidades.

1.6.1 Exoesqueletos de marcha humana sobre el sitio

Lokomat

Entre los dispositivos de rehabilitación de la marcha con robótica comerciales se encuentra el dispositivo El Lokomat de Hocoma que es el más popular en 2016. Es un exoesqueleto fijo (o estacionario) que se usa sobre una cinta de correr. Lo que el Lokomat pierde al ser un dispositivo fijo que no puede salir de la habitación, lo compensa con creces por su versatilidad y capacidades (Exoskeleton Report LLC, 2019).

Es un dispositivo ortésico basado en la tecnología DGO, (driven gate ortosis o de conducción de la ortosis), que es capaz de simular la marcha fisiológica del usuario. Las adaptaciones del Lokomat se acoplan a las extremidades inferiores de los pacientes y, con ayuda mecánica, reproduce un patrón de marcha normalizado en el que el tronco queda suspendido de manera controlada (RoboticSpot, 2008).



Figura 4. Exoesqueleto Locomat.

Fuente: (Exoskeleton Report LLC, 2019).

Del presente exoesqueleto se puede obtener una estructura y acoples similares para el diseño del dispositivo encargado del movimiento de las caderas del exoesqueleto PUCP en el plano frontal.

1.6.2 Exoesqueleto de marcha humana con desplazamiento

HAL

HAL es un exoesqueleto robótico cuya finalidad es ayudar a las personas con discapacidad motora o a quienes requieren rehabilitación. Tras varios años de desarrollo, se logró que su peso fuera tan ligero que sea de fácil uso y ya puede comercializarse.

HAL no requiere de grandes esfuerzos para moverlo ni usarlo. Tiene sensores que por medio de las señales nerviosas provenientes del cerebro, se anticipa a los movimientos que el cuerpo quiere realizar y ayuda a realizar esa tarea (Penalva, 2008).



Figura 5. Exoesqueleto HAL.

Fuente: (Penalva, 2008).

Rex

Exoesqueleto desarrollado en Nueva Zelanda, por la empresa Rex Bionics. Funciona con una batería que le permite funcionar por 2 horas seguidas. Es comandado por el uso de un Joystick y un Pad. Tiene una limitación ya que solo puede ser usado en superficies estables y firmes, pero no en de terrenos accidentados como en nieve o terrenos pedregosos. (Serna, 2010)



Figura 6. Exoesqueleto Rex.

Fuente: (Serna, 2010).

Aunque estos exoesqueletos incluyen movimiento y el del diseño está fijo, se colocan para informar que existen en el mercado otros tipos de exoesqueletos de rehabilitación sobre la marcha humana.

1.6.3 Tesis y patentes

Patente “Locomotion assisting device and method” - US8096965B2

“Un sistema de refuerzo de exoesqueleto incluye: un soporte de tronco para fijar al tronco de una persona discapacitada y tirantes para las piernas para conectarse a las piernas de la persona, cada refuerzo de la pierna incluye tirantes de segmento de extremidades. Las

articulaciones motorizadas están adaptadas para proporcionar un movimiento angular relativo entre los apoyos del segmento de la extremidad de los apoyos de la pierna y entre los apoyos de la pierna y el soporte del tronco. Uno o más sensores de fuerza de tierra están diseñados para detectar la fuerza de tierra ejercida en cada uno de los apoyos para las piernas. El sistema también incluye un controlador para recibir señales detectadas de dicho uno o más sensores de fuerza de tierra, con un algoritmo para identificar una postura a partir de las señales detectadas y, en función de la postura identificada, activar las articulaciones motorizadas para realizar una acción relacionada con un modo de locomoción seleccionada de un conjunto de acciones predefinidas correspondientes a la postura identificada” (Estados Unidos Patente n° US8096965B2, 2008).

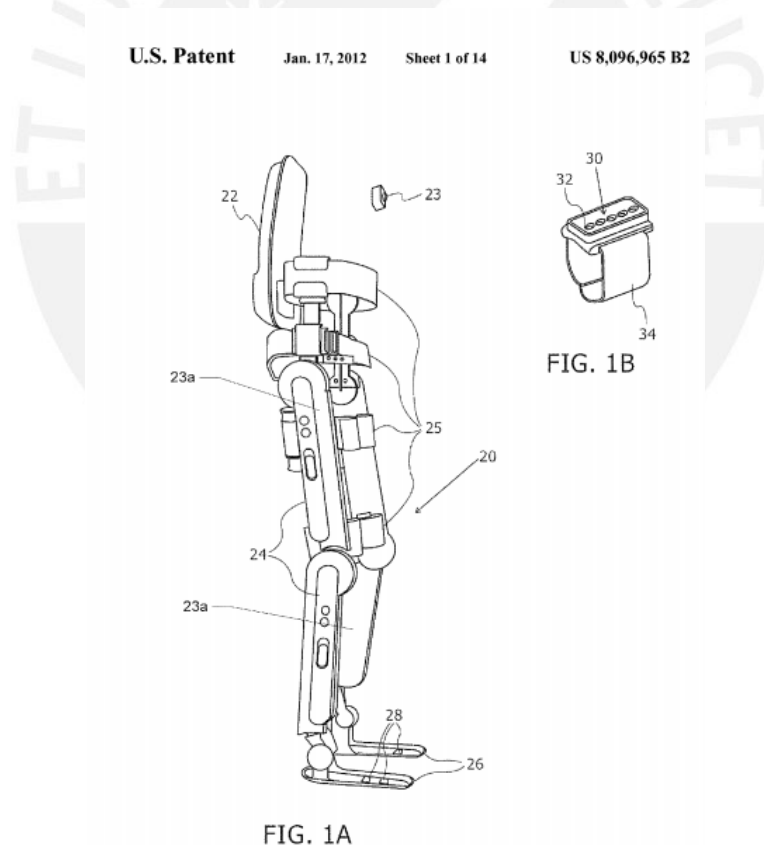


Figura 7. Locomotion assisting device and method - US8096965B2.

Fuente: (Estados Unidos Patente n° US8096965B2, 2008).

**Patente “Exoskeleton and method for controlling a swing leg of the exoskeleton” -
US8801641B2**

“Un exoesqueleto de la extremidad inferior, configurable para ser acoplado a una persona, incluye dos soportes para las piernas configurables para ser acoplados a las extremidades inferiores de la persona, un tronco de exoesqueleto configurable para ser acoplado a la parte superior del cuerpo de la persona, que se puede conectar de manera giratoria a los eslabones del muslo soportes para las piernas que permiten la flexión y la extensión entre los soportes para las piernas y el tronco del exoesqueleto, dos actuadores de cadera configurados para crear pares entre el tronco del exoesqueleto y los soportes para las piernas, y al menos una unidad de potencia capaz de proporcionar energía a los actuadores de la cadera en donde la potencia la unidad está configurada para hacer que el actuador de la cadera del soporte para las piernas en la fase de giro cree un perfil de torsión tal que la fuerza del soporte para las piernas del exoesqueleto en la extremidad inferior de la persona durante al menos una parte de la fase de giro sea en la dirección de la velocidad de giro de la extremidad inferior de la persona” (Estados Unidos Patente n° US8801641B2, 2009).

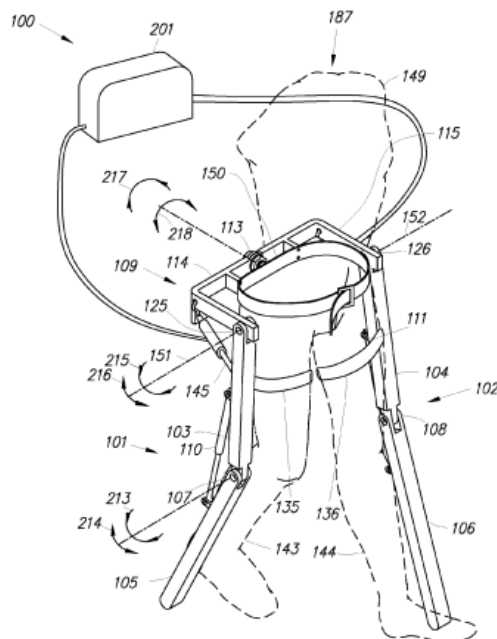


Fig. 1

Figura 8. Exoskeleton and method for controlling a swing leg of the exoskeleton - US8801641B2.

Fuente: (Estados Unidos Patente n° US8801641B2, 2009).

Patente “Exoskeleton load handling system and method of use” - EP2556009B1

“La presente invención se refiere a la técnica de los sistemas de manejo de materiales y, más particularmente, al campo de los exoesqueletos de las extremidades inferiores que lleva un usuario para permitir levantar y bajar cargas pesadas frente al usuario” (Europa Patente n° EP2556009B1, 2011).

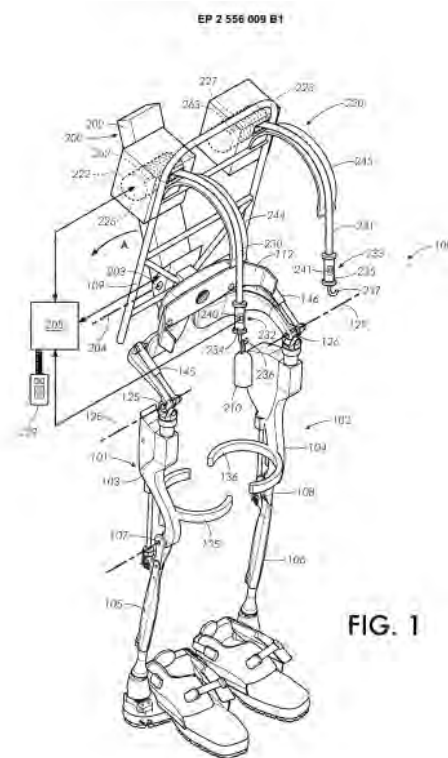


Figura 9. Exoskeleton load handling system and method of use - EP2556009B1.

Fuente: (Europa Patente n° EP2556009B1, 2011).

Patente “Orthopedic apparatus for walking and rehabilitating disabled persons including tetraplegic persons and for facilitating and stimulating the revival of comatose patients through the use of electronic and virtual reality units” - US5961541A

“Un exoesqueleto para el apoyo del cuerpo de un paciente se articula frente a las articulaciones de la cadera y la rodilla, y está provisto de una serie de pequeños actuadores que están diseñados para mover las partes articuladas del exoesqueleto de acuerdo con la marcha humana. Una unidad de control está programada para controlar el funcionamiento de los actuadores a fin de imprimir en el exoesqueleto los movimientos de la marcha humana. Un control remoto para el funcionamiento de la unidad de control permite al paciente transmitir comandos a la unidad para iniciar o detener las extremidades inferiores, así como para ajustar la velocidad del paso. Una unidad electrónica de realidad

virtual transmite al paciente, a través de un casco especial, imágenes de realidad virtual y estimulación interactiva con el movimiento de caminar que queda impresionado por el exoesqueleto en el cuerpo del paciente. Se puede usar un marco para estabilizar y apoyar a la persona y permitir que la persona camine al mismo tiempo, y tiene empuñaduras con botones de operación para la unidad de control remoto. Alternativamente, un riel está suspendido a una distancia del suelo más alto que la altura humana para soportar y guiar un rodamiento de bolas o una corredera deslizante dentro o sobre el riel. El cojinete de bolas o la corredera soportan una estructura metálica y están provistos de dos tirantes o varillas para sostener el exoesqueleto del paciente” (Estados Unidos Patente n° US5961541A, 1998).

U.S. Patent Oct. 5, 1999 Sheet 2 of 5 5,961,541

FIG. 2

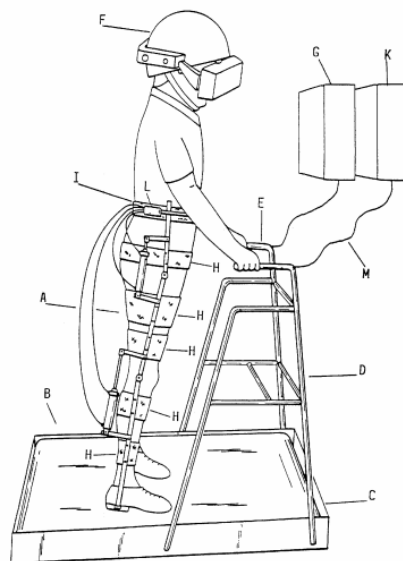


Figura 10. Orthopedic apparatus for walking and rehabilitating disabled persons including tetraplegic persons and for facilitating and stimulating the revival of comatose patients through the use of electronic and virtual reality units - US5961541A.

Fuente: (Estados Unidos Patente n° US5961541A, 1998).

Tesis “Diseño de un mecanismo del tipo exoesqueleto de miembros inferiores que permita reproducir patrones de movimiento”

En este trabajo de tesis de exoesqueleto desarrollado según Garcés: “se desarrolló el diseño de un mecanismo del tipo exoesqueleto de miembros inferiores que permita reproducir patrones de movimiento. Se enfocó en aquellas personas con deficiencia del sistema nervioso referido a la parálisis de extremidades inferiores.” (Garcés, 2017:i).

Además, Garcés menciona que el tipo de sistema diseñado: “incluye un subsistema de suspensión de peso corporal que permite a la persona suspender para poder realizar otros tipos de movimientos de asistidos dirigidos para la rehabilitación” (Garcés, 2017:i).

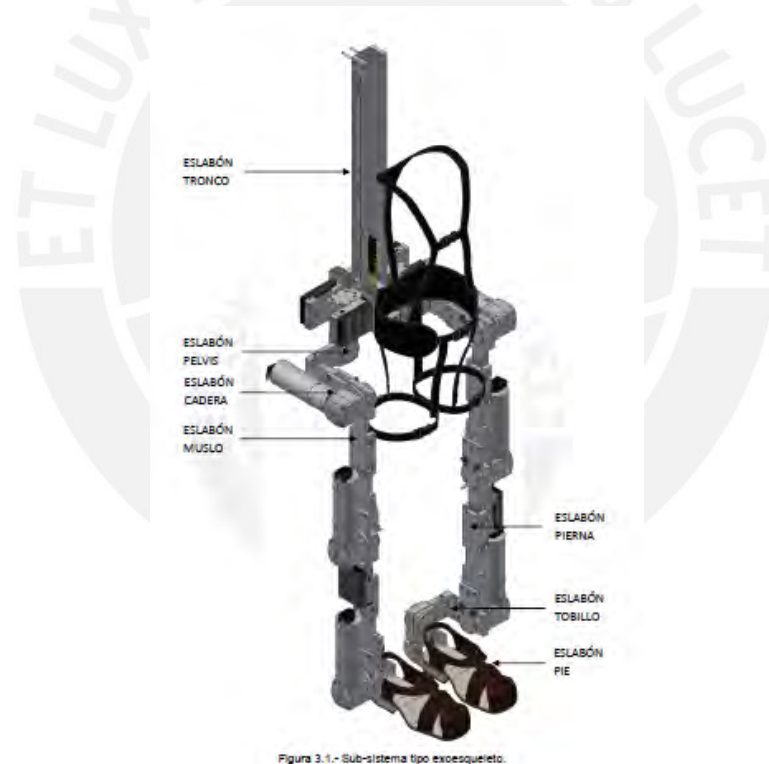


Figura 11. Subsistema tipo Exoesqueleto.

Extraído de (Garcés, 2017).

Las tesis y patentes encontradas servirán de referencia, pues su estructura se utilizará para el posterior diseño de los conceptos de solución.

1.6.4 Papers

Design on mechanism of lower limb rehabilitation robot based on new body weight support (BWS) system

El presente exoesqueleto para miembros inferiores está basado en un sistema de soporte de peso corporal “*body weight support*” (BWS). Posee grados de libertad para flexión/extensión para las caderas y rodillas en el plano sagital y abducción/aducción de la cadera en el plano coronal. Su movimiento principal es la flexión/extensión de las articulaciones de las caderas y rodillas en el plano sagital. El rango de movimiento de centro de masa es de ± 25 mm izquierda/derecha. Utiliza mecanismo biela-manivela para los movimientos de las caderas y tobillos en el plano sagital. La abducción y la aducción en el plano coronal de la cadera es una articulación de movimiento pasivo, que está soportada por un cilindro de compresión de resorte. (Qiangyong, Xiaodong , Jiangcheng , & Yuanjun, 2014)

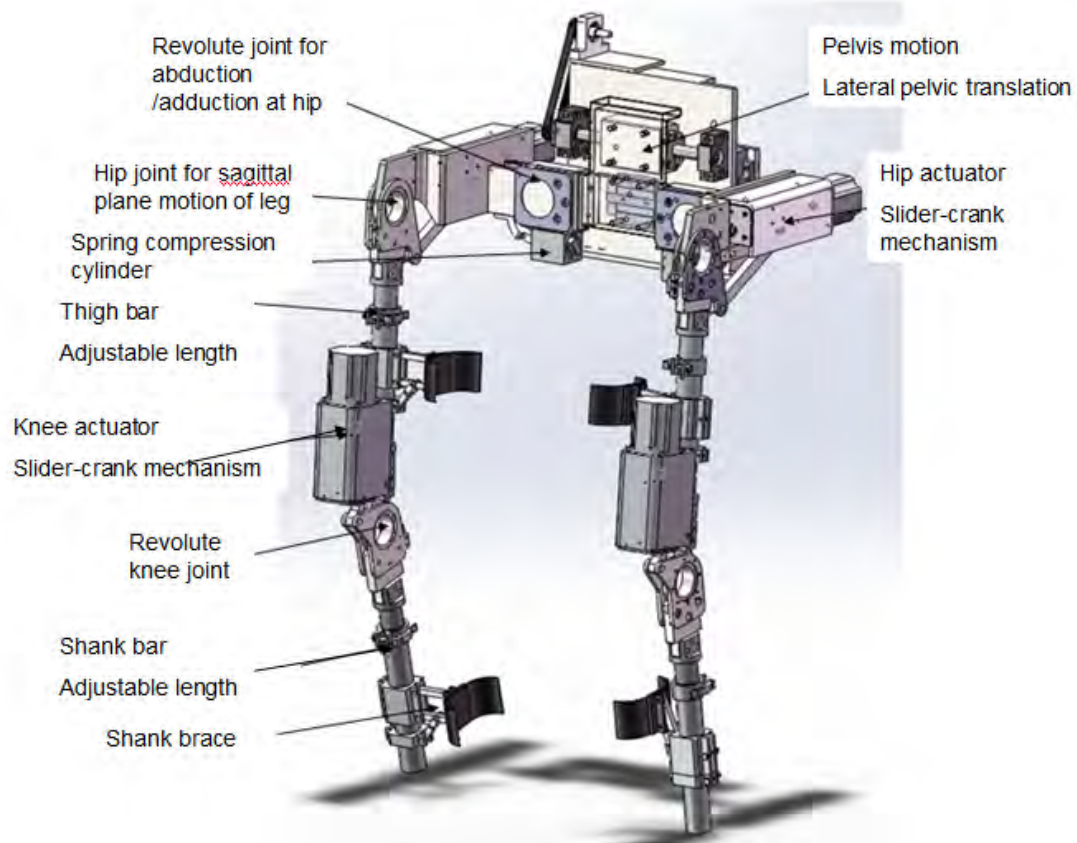


Figura 12. Design on mechanism of lower limb rehabilitation robot based on new body weight support (BWS) system.

Fuente: Extraído de (Qiangyong, Xiaodong , Jiangcheng , & Yuanjun, 2014).

Del *paper* encontrado se identifican los actuadores a utilizar en el diseño de los conceptos de solución.

1.6.5 Sensores

1.6.5.1 Acelerómetros

La función de los acelerómetros será determinar el ángulo de abducción durante la marcha humana sobre el sitio.

Existen diferentes modelos que combinan las diferentes tecnologías existentes, siendo principalmente acelerómetros piezorresistivos, acelerómetros piezoeléctricos y

acelerómetros capacitivos. A continuación, se realiza una comparación de las ventajas y desventajas de las 3 opciones.

Tabla 1. Tabla comparativa entre acelerómetros.

Fuente: Elaborado con (Sensing S.L. , s.f.).

	Piezorresistivos	Piezoeléctricos	Capacitivos
Ventajas	Salida amplificada y una alta precisión.	Son acelerómetros pensados para la medida de medias y altas frecuencia. Poseen un elevado ancho de banda de frecuencias.	Son muy insensibles a interferencias y radiaciones electromagnéticas.
Desventajas	Se limitan a aplicaciones de baja o muy baja frecuencia.	Sensible a las oscilaciones térmicas.	Se limitan a aplicaciones de baja o muy baja frecuencia.

1.6.6 Actuadores

1.6.6.1 Motores

La función de los motores será realizar el movimiento de la cadera en el plano frontal durante la marcha humana.

Una opción es el motor paso a paso cuyo principio de funcionamiento es la conversión de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares.

Otra opción es el servomotor cuyo principio de funcionamiento es la presencia de un circuito de control y potenciómetro. A continuación, se realiza una comparación de las ventajas y desventajas entre ambas opciones.

Tabla 2. Tabla comparativa entre motor paso a paso y servomotor.

Fuente: Elaborado con (SonRobots.com, s.f.).

	Motor Paso a paso	Servomotor
Ventajas	Gran capacidad de toque. Rotación precisa.	Se puede controlar su velocidad y posición. No consume mucha energía
Desventajas	Requiere de un circuito de control. Velocidad baja.	Más caro que motor paso a paso y DC.

1.6.7 Controladores

En la presente sección se analiza y compara las características más resaltantes de los microcontroladores y los PLC.

Tabla 3. Tabla comparativa entre microcontrolador y PLC.

Fuente: Elaborado con (Electrotec, s.f.).

Microcontrolador	PLC
<ul style="list-style-type: none"> • Utilizados generalmente para realizar tareas repetitivas y específicas. • No tienen interfaces como la pantalla y los conmutadores integrados. • Implementa todo en un solo circuito integrado. • Interactúan con sensores y actuadores para tareas específicas. • Presentan una baja resistencia, ya que ya que sus chips son frágiles y pueden dañarse fácilmente. • Diseñados para ser integrados dentro de un sistema. • Utilizados para sistemas de confiabilidad menor a los PLC debido a su fragilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizado para sistemas de alta confiabilidad. • Capaz de automatizar cualquier proceso. • Orientado hacia procesos industriales debido a su robustez para soportar condiciones adversas. • Diseñados para interactuar con sensores y actuadores industriales, por lo que son capaces de soportar valores de voltaje altos. • Pueden ser considerados dispositivos independientes.

Capítulo 2 Diseño conceptual

En el presente capítulo se presentan los requerimientos del sistema a diseñar, las funciones que el sistema debe cumplir y la evaluación técnica-económica sobre 3 propuestas de solución para elegir la solución óptima.

2.1 Lista de exigencias

Para comenzar con el diseño del sistema, primero se debe definir los requerimientos que este debe cumplir, por esta razón se realizó una lista de exigencias, la cual fija las bases sobre la cual se determinará el concepto de solución óptimo, ver Tabla 4.a-Tabla 4.c.

Tabla 4.a Lista de exigencias. Fuente: Elaboración propia.

LISTA DE EXIGENCIAS	
Proyecto	Diseño de un mecanismo para el movimiento de las caderas en el plano frontal del exoesqueleto PUCP durante el ciclo de la marcha humana sobre el sitio.
Deseo o exigencia	Descripción
E	FUNCIÓN PRINCIPAL Simular el movimiento de cadera en la marcha humana en el plano frontal. Este sistema mecánico forma parte de un exoesqueleto de marcha en el sitio.
E	GEOMETRÍA No debe exceder de 60 cm x 60 cm x 70 cm.
E	MATERIAL El material de los componentes debe ser capaz de soportar las cargas sometidas y no ser dañino para el paciente.
E	CINEMÁTICA El sistema permitirá el movimiento de la cadera en el plano frontal de 5° durante la simulación de la marcha humana del paciente.
E	FUERZAS Se usará energía eléctrica a fin de evitar contaminar el ambiente de operación.

Tabla 5.b Lista de exigencias. Fuente: Elaboración propia.

Proyecto	Diseño de un mecanismo para el movimiento de las caderas en el plano frontal del exoesqueleto PUCP durante el ciclo de la marcha humana sobre el sitio.
Deseo o exigencia	Descripción
E	ENERGÍA Se usará principalmente energía eléctrica a fin de evitar contaminar el ambiente de operación.
D	SOFTWARE El controlador debe garantizar el correcto funcionamiento de todas las etapas del proceso. Los softwares usados serán de código abierto.
E	COMUNICACIÓN La comunicación entre el sistema y el paciente debe ser intuitiva con el fin de evitar errores en el uso. La comunicación entre componentes no debe alterar el funcionamiento del sistema, deben tener protección y estar aislados.
E	SEÑALES El sistema recibirá y enviará señales al controlador del Exoesqueleto PUCP y al usuario además de recibir señales de los sensores.
E	USO El funcionamiento del sistema debe ser correcto en ambientes de rehabilitación tales como hospitales o centros médicos. Dado que su uso está destinado hacia ambientes clínicos, se evitará la generación de contaminantes y ruido en exceso.
E	CONTROL El sistema se informará de las posiciones lineales y angulares debido a los sensores. En todos los casos contará con realimentación
E	SEGURIDAD Se limitará el ángulo de movimiento en el plano frontal mediante topes mecánicos con el fin de evitar lesiones en el paciente.
E	MONTAJE El diseño debe permitir el desmontaje para el mantenimiento de los componentes que lo requieran.

Tabla 6.c Lista de exigencias. Fuente: Elaboración propia.

Proyecto	Diseño de un mecanismo para el movimiento de las caderas en el plano frontal del exoesqueleto PUCP durante el ciclo de la marcha humana sobre el sitio.
Deseo o exigencia	Descripción
E	MANTENIMIENTO Se propone un mantenimiento semanal para asegurar el bienestar del paciente y que el sistema funcione correctamente.
D	FABRICACIÓN La fabricación de los componentes mecánicos se debe realizar en localidades que faciliten el transporte.
D	COSTOS El proyecto no debe superar el costo estimado de S/.10.000 para su futura implementación.
E	PLAZO DE ENTREGA El proyecto debe ser terminado en los plazos de entrega establecidos según el cronograma acordado finalizando el 15 de agosto del 2020.

2.2 Estructura de funciones

2.2.1 Black box

La función principal del sistema como un todo es simular el movimiento de cadera en la marcha humana en el plano frontal.

Las entradas del proceso son:

- Señales:
 - Señal de activación del proceso: señal que activa el funcionamiento del sistema.
 - Señal de parada de emergencia: señal que será enviada al controlador para que este último detenga todo el proceso.
 - Señal de la velocidad del movimiento: señal que informa al controlador sobre la velocidad deseada por el usuario.

- Energía:
 - Energía eléctrica: Tipo de energía que se obtiene de una red eléctrica.
- Materia:
 - Una persona con discapacidad sin movimiento de cadera que debe realizar una marcha normal sobre el sitio.

Las salidas del proceso son:

- Señales:
 - Señal del ángulo de la cadera: señal que informa al usuario el ángulo de la cadera en el plano frontal durante el funcionamiento del proceso.
 - Alarmas: señal en caso de mal funcionamiento o parada de emergencia
 - Señal del controlador del exoesqueleto PUCP: señal que determina en que momento de la marcha humana normal se encuentra el exoesqueleto.
- Energía:
 - Energía mecánica: vibraciones que se generan en los procesos y se transmiten al entorno.
 - Energía sonora: ruido emitido por los actuadores durante el proceso.
 - Energía térmica: Calor emitido por los actuadores y sensores durante el funcionamiento del sistema.
 - Energía luminosa: luz emitida por las alarmas, pantallas u otros indicadores físicos.

- Materia:
 - Una persona con discapacidad sin movimiento de cadera realizando una marcha normal sobre el sitio.
 - Exoesqueleto PUCP: exoesqueleto sobre el cual se acopla el presente sistema para añadirle el movimiento de las caderas en el plano frontal.

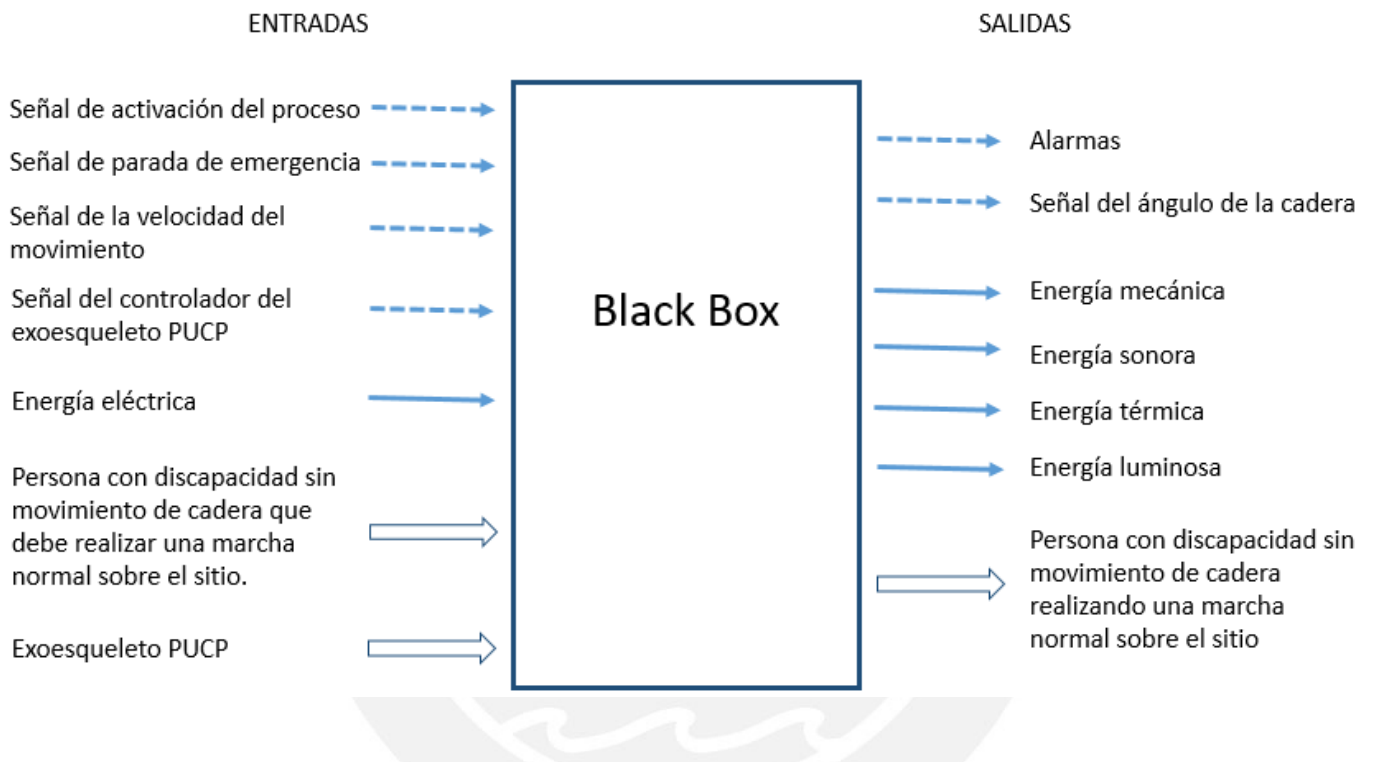


Figura 13. Black Box del sistema.

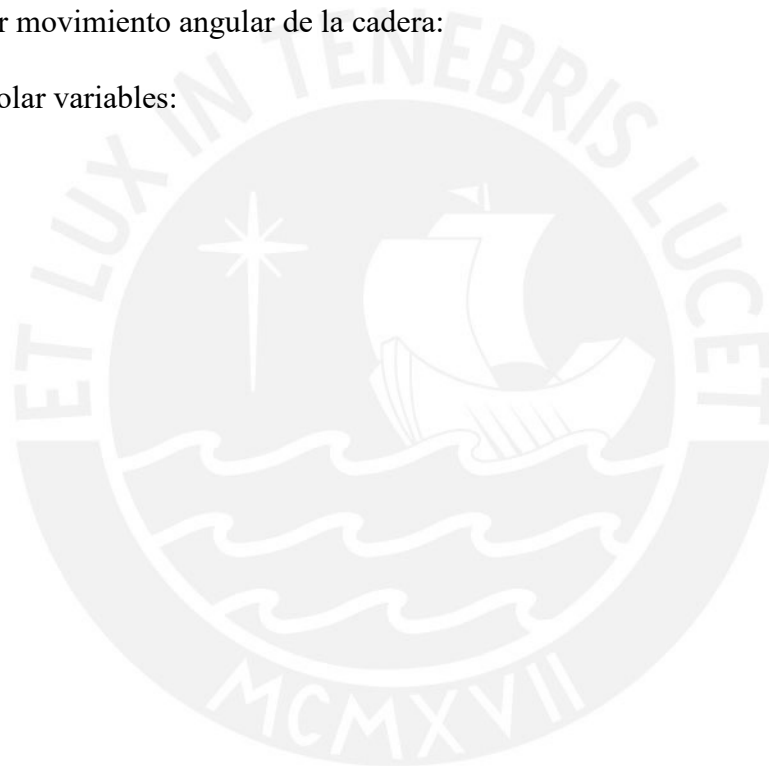
Fuente: Elaboración propia

2.2.2 Lista de funciones

En la presente sección, se enlistan y explican las funciones que contiene el sistema. Además, se muestra la estructura de funciones que integra los conceptos mostrados en esta sección.

- Ingresar e identificar datos:
- Realizar el movimiento del paciente en el plano frontal:
- Acoplar en el exoesqueleto PUCP:

- Accionar movimiento de la cadera en el plano frontal:
- Energizar:
- Visualizar estado de proceso, alarmas e indicadores:
- Acondicionar energía para control:
- Acondicionar energía para sensores:
- Acondicionar energía para actuadores:
- Sensor parada de emergencia:
- Sensor movimiento angular de la cadera:
- Controlar variables:



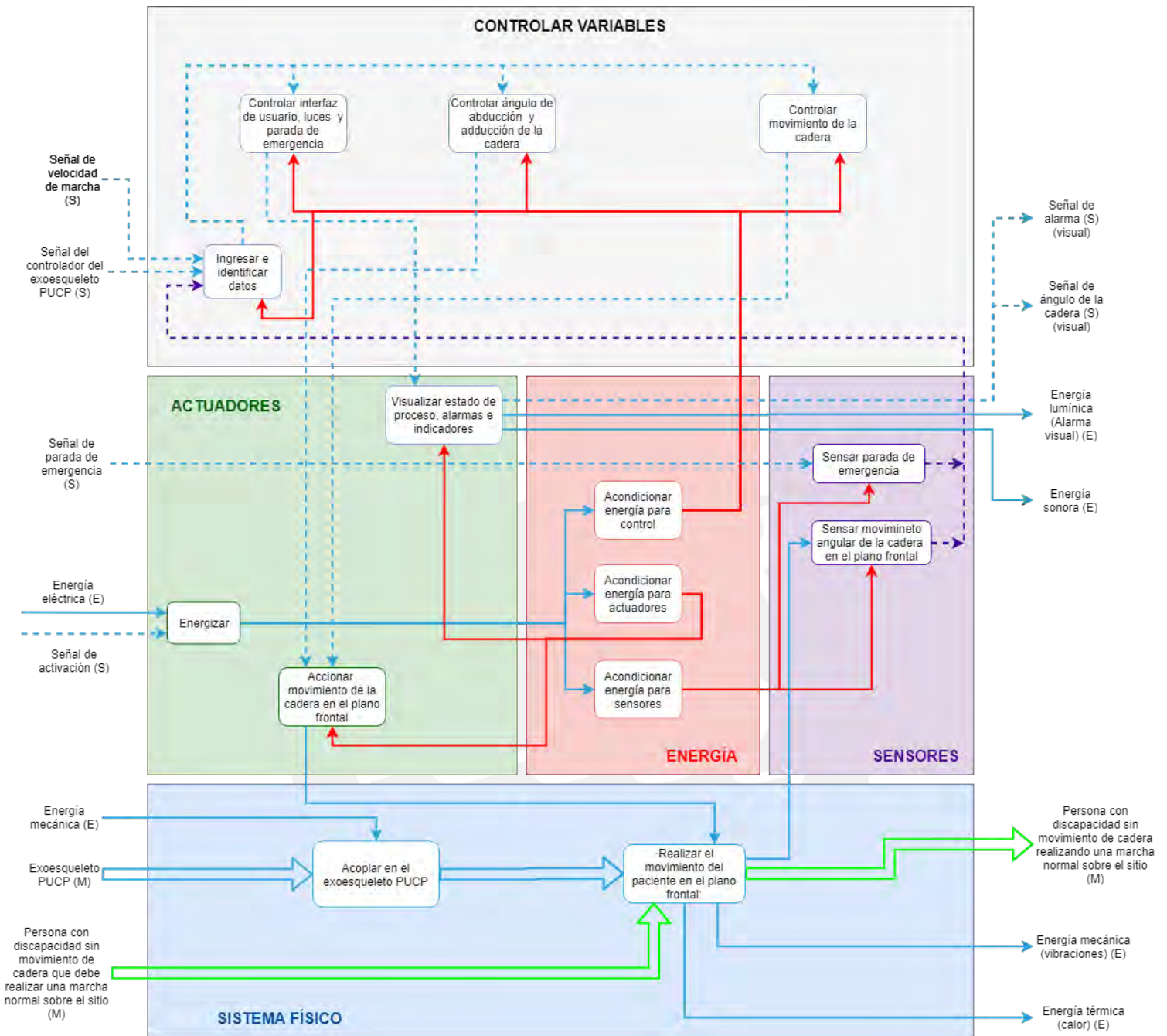


Figura 14. Estructura de funciones

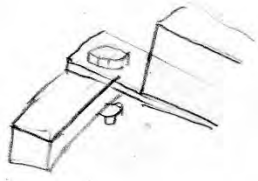
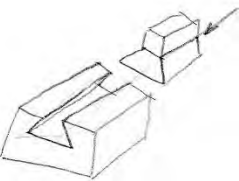
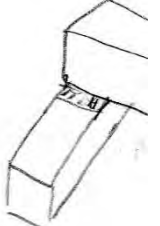
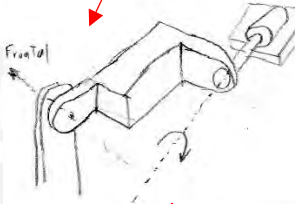
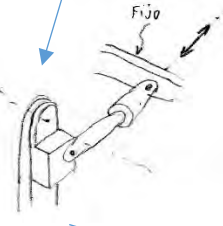
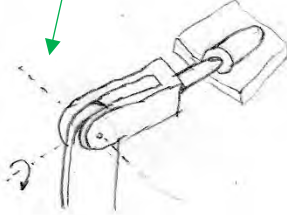






Fuente: Elaboración propia.





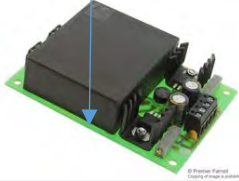





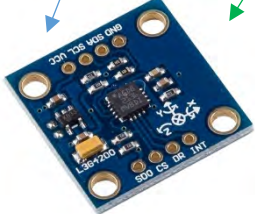
2.3 Matriz morfológica


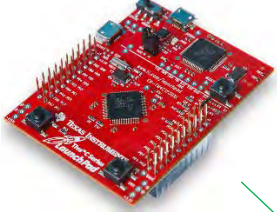



En la Tabla 5 se desarrolla tres soluciones para cada función del sistema en base a la tecnología encontrada en el estado de arte de este trabajo.

Tabla 7. Matriz Morfológica.

Fuente: Elaboración propia.

FUNCIONES	PORTADORES DE SOLUCIÓN		
	1	2	3
Acoplar en el exoesqueleto PUCP	 <p>Tornillos</p>	 <p>Cola de Milano</p>	 <p>Soldadura</p>
Realizar el movimiento del paciente en el plano frontal	 <p>Frontal</p>	 <p>Fija</p>	
Accionar movimiento de la cadera en el plano frontal	 <p>Servomotor</p>	 <p>Motor a pasos</p>	 <p>Actuador lineal</p>
Energizar	 <p>Interruptor rotativo</p>	 <p>Interruptor automático</p>	 <p>Interruptor basculante</p>

FUNCIONES	PORTADORES DE SOLUCIÓN		
	1	2	3
Acondicionar energía para control	 Fuente conmutada	 Fuente lineal	 Transformador con rectificador
Acondicionar energía para sensores	 Fuente conmutada	 Fuente lineal	 Transformador con rectificador
Acondicionar energía para actuadores	 Fuente conmutada	 Fuente lineal	 Transformador con rectificador
Sensar movimiento angular de la cadera	 Acelerómetro	 Giroscopio	

FUNCIONES	PORTADORES DE SOLUCIÓN		
	1	2	3
Controlar variables	 <p>PLC</p>	 <p>Microcontrolador</p>	
Visualizar estado de proceso, alarmas e indicadores	 <p>HMI</p>	 <p>Pantalla TFT</p>	 <p>Pantalla LCD</p>

Solución 2

Solución 1

Solución 3

2.4 Concepto de solución

- Concepto de Solución 1

El primer concepto de solución plantea el uso de un motor a pasos para ejecutar el movimiento de las caderas en el plano frontal mientras se acopla al exoesqueleto PUCP mediante el uso de una cadena para la transmisión de movimiento. El diseño contempla la transmisión del movimiento desde los servomotores hacia el eslabón abductor por medio de cadenas, lo cual permite al exoesqueleto realizar los movimientos de abducción y aducción de las caderas. Se propone la adición de un eslabón abductor en cada pierna del exoesqueleto para logra añadir el movimiento de cadera en el plano normal.

El microcontrolador determina el momento que debe activar el movimiento en el plano frontal durante la marcha normal mediante señales de entrada que recibe del exoesqueleto PUCP y el valor que entrega cada sensor acelerómetro en cada pierna que mide el ángulo de cadera en el plano frontal.

Además, todas las variables de control serán modificadas para obtener el ángulo de aducción/abducción deseado al accionar el motor a pasos. Y dicho ángulo será mostrado en una interfaz con el usuario es una pantalla TFT.

El material seleccionado para los eslabones será acero inoxidable AISI 304, aluminio para las estructuras y las planchas utilizadas.

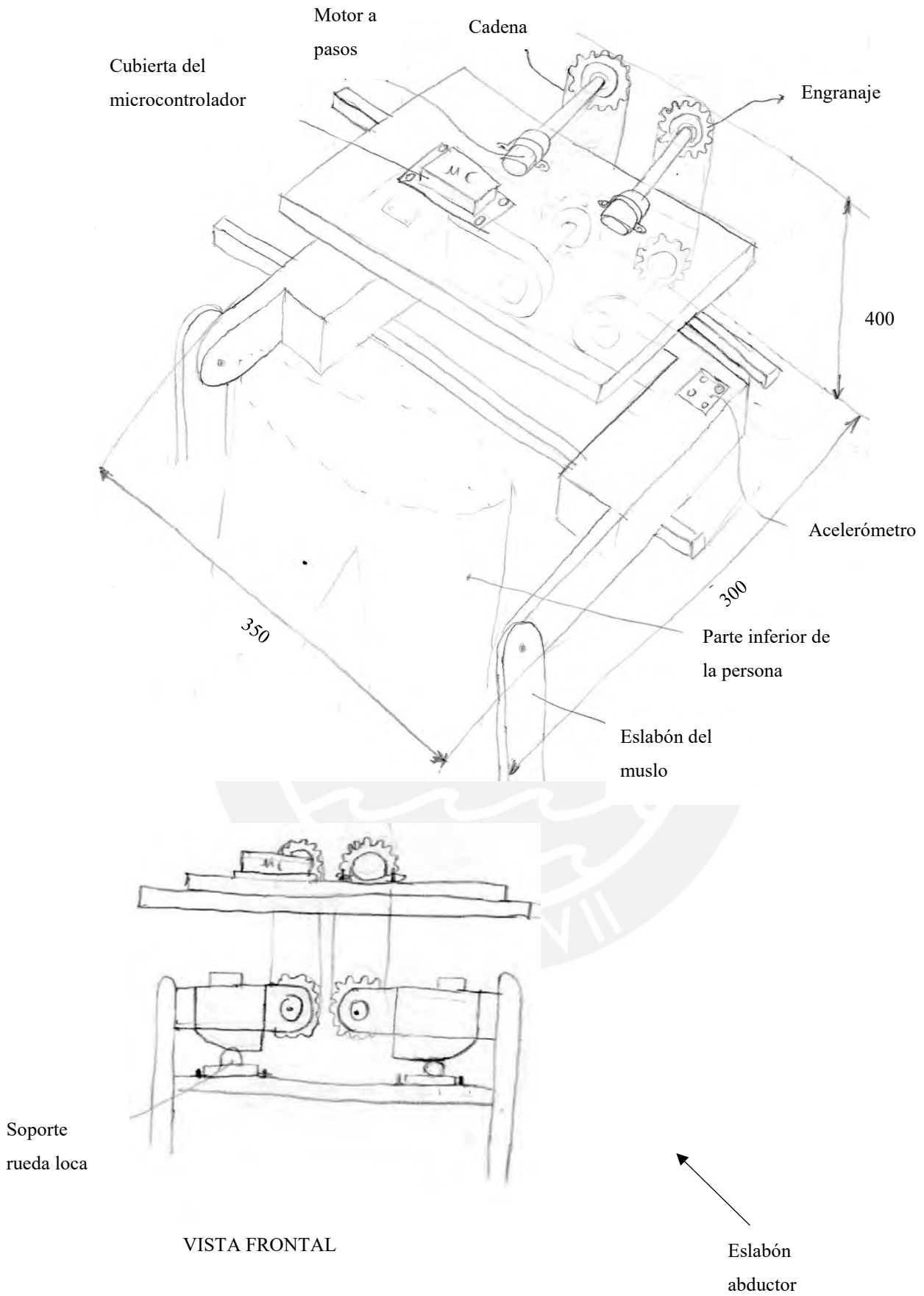


Figura 15. Concepto de solución 1.

Fuente: Elaboración propia

- Concepto de solución 2

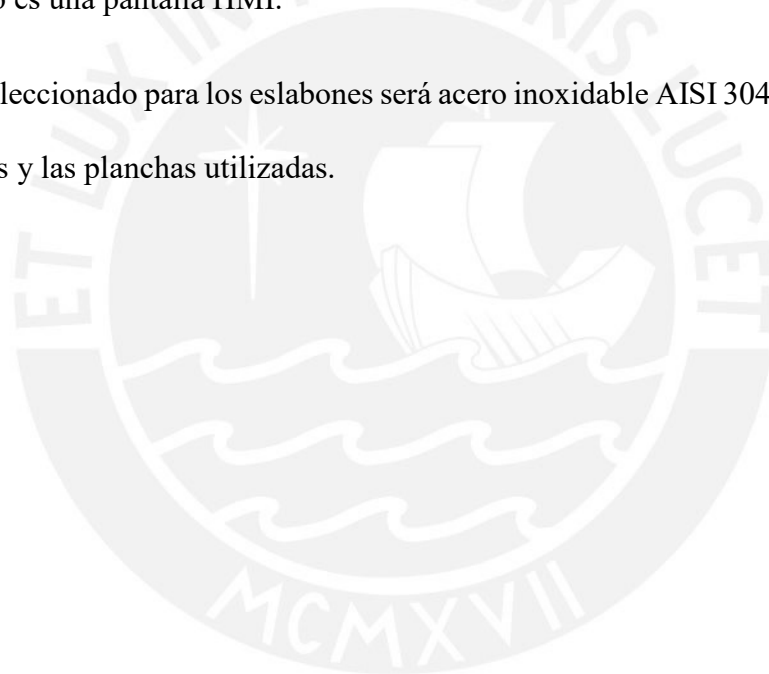
El segundo concepto de solución plantea el uso de un actuador lineal para ejecutar el movimiento de las caderas en el plano frontal mientras se acopla al exoesqueleto PUCP.

El PLC determina el momento que debe activar el movimiento en el plano frontal durante la marcha normal mediante señales que recibe del exoesqueleto PUCP

El sensor giroscopio controla el ángulo de cadera en el plano frontal.

Además, todas las variables de control son modificadas mediante un PLC y la interfaz con el usuario es una pantalla HMI.

El material seleccionado para los eslabones será acero inoxidable AISI 304, aluminio para las estructuras y las planchas utilizadas.



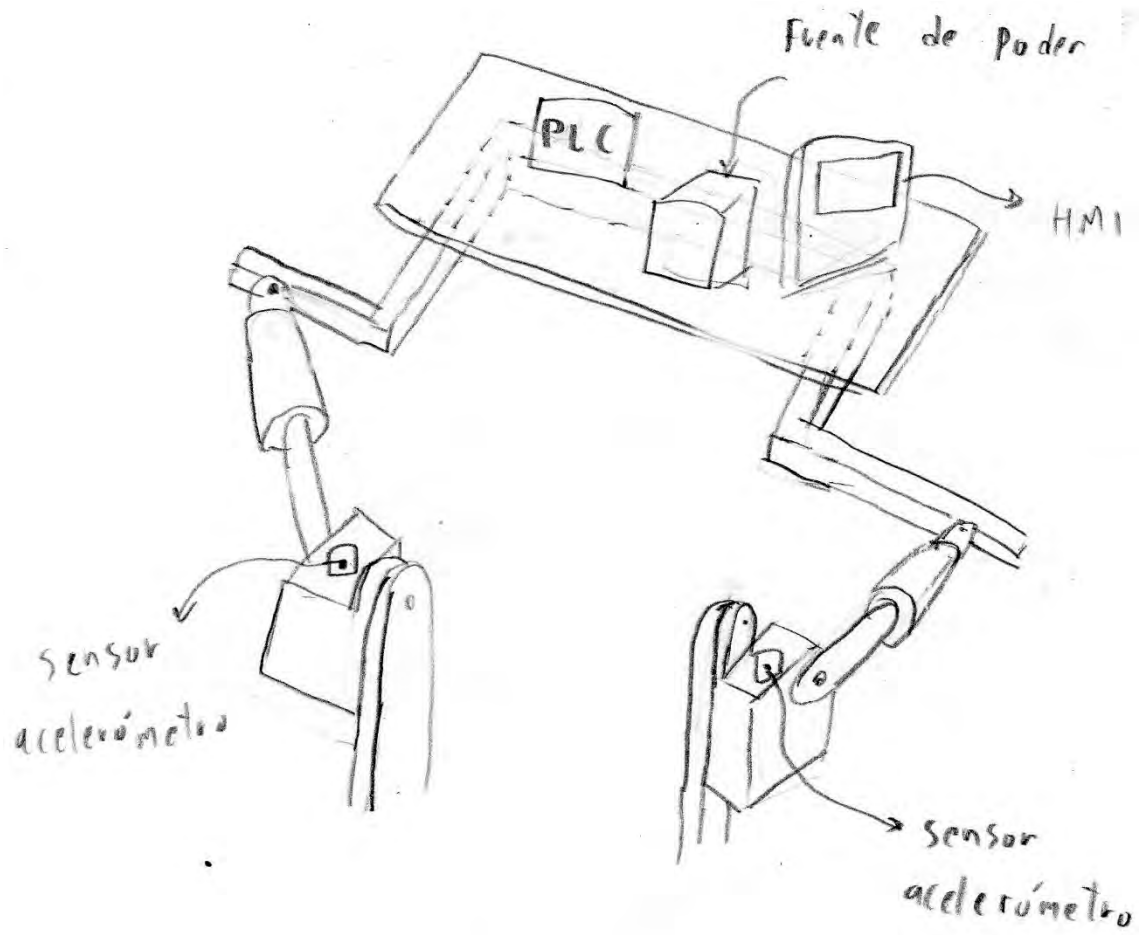


Figura 16. Concepto de solución 2.

Fuente: Elaboración propia.

- Concepto de solución 3:

El tercer concepto de solución plantea el uso de un servomotor para ejecutar el movimiento de las caderas en el plano frontal mientras se acopla al exoesqueleto PUCP.

El microcontrolador determina el momento que debe activar el movimiento en el plano frontal durante la marcha normal mediante señales que recibe del exoesqueleto PUCP

El sensor giroscopio controla el ángulo de cadera en el plano frontal.

Además, todas las variables de control son modificadas mediante un microcontrolador y la interfaz con el usuario es una pantalla LCD.

El material seleccionado para los eslabones será acero inoxidable AISI 304, aluminio para las estructuras y las planchas utilizadas.

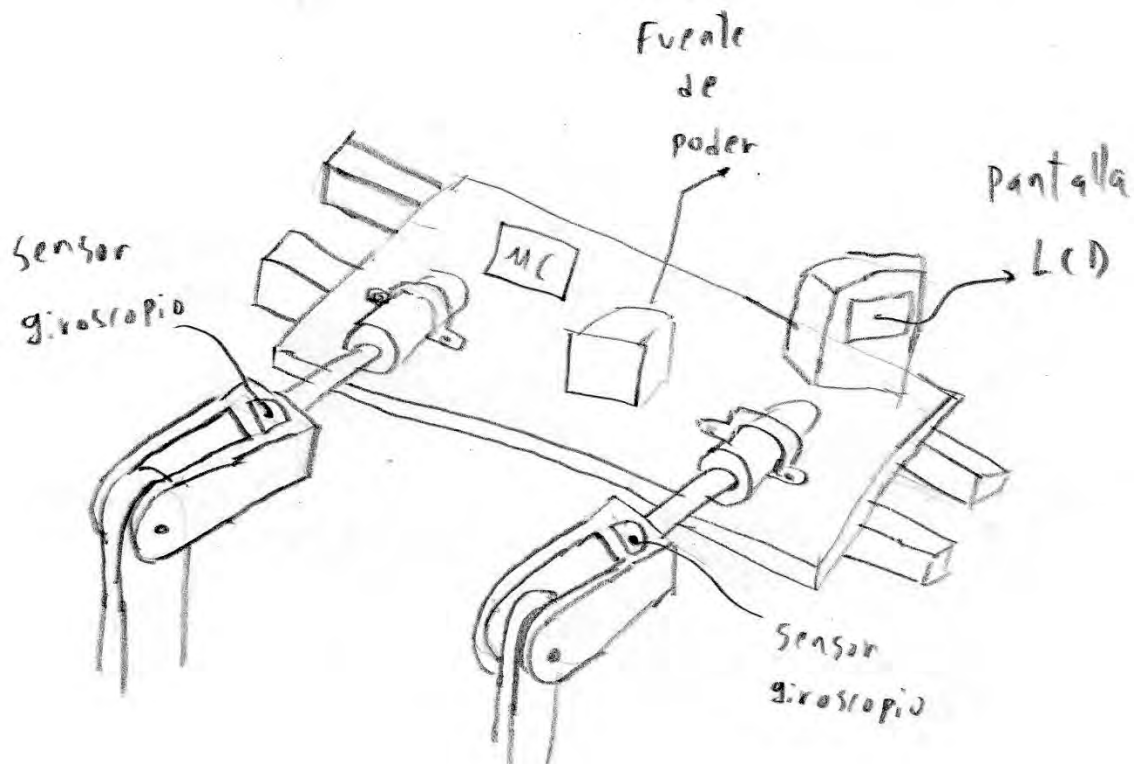


Figura 17. Concepto de solución 3.

Fuente: Elaboración propia.

2.5 Evaluación técnica-económica

Se realiza una evaluación de carácter técnico y económico a cada uno de los 3 conceptos de solución planteados. A cada solución se le asigna un puntaje entre 1 y 3, además, cada puntaje es multiplicado por un peso asignado según el criterio de evaluación, el cual lo determina el diseñador. En la Tabla 6 se detallan los puntajes asignados y se muestran los promedios de cada solución con respecto al puntaje ideal al cual se le asigna 4 en cada criterio.

Se utilizarán los siguientes criterios para la realización de la evaluación técnico-económica de las soluciones propuestas:

Criterios técnicos:

- **Uso de energía:** Indica si la solución tiene un uso eficaz de la energía durante el proceso.
- **Seguridad:** Indica si la solución es segura para el usuario.
- **Rapidez:** indica si el sistema de la solución tiene capacidad para a elevadas velocidades de uso
- **Confiabilidad:** Indica que tan confiable es la solución para la ejecución del proceso.
- **Facilidad de manejo:** Indica que tan fácil resulta el uso de la solución para el usuario.
- **Complejidad:** Indica que tan sofisticado es el nivel tecnológico de la solución propuesta.
- **Lista de Exigencias:** Indica que tanto cumple la lista de exigencias la solución propuesta.

- **Silencioso:** Indica que tan silenciosa es la solución a fin de incomodar a otros usuarios en el ambiente clínico al que está destinado.

Criterios económicos:

- **Número de piezas:** Indica si el número de piezas de la solución es bajo.
- **Fácil adquisición:** Indica si los materiales y componentes de la solución son de fácil adquisición.
- **Fácil montaje:** Indica si la solución es de fácil montaje para su implementación.
- **Fácil mantenimiento:** Indica si la solución resultará con un fácil mantenimiento.
- **Productividad:** Indica que tan productivo será el proceso realizado por la solución respecto a su costo energético.
- **Costo de la tecnología:** Indica si la solución tendrá un bajo costo de la tecnología utilizada.

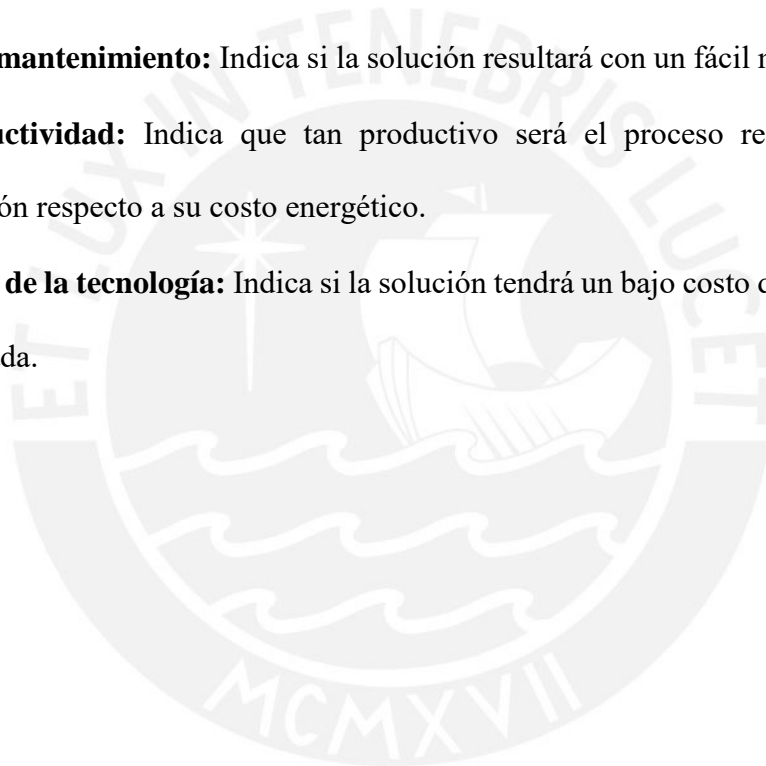


Tabla 8. Evaluación técnica-económica. Fuente: Elaboración propia.

TÉCNICOS			Solución 1			Solución 2		Solución 3		Ideal	
N°	Criterio	g	p	p x g	p	p x g	p	p x g	p	p x g	
1	Uso de energía	1	3	3	2	2	2	2	4	4	
2	Seguridad	4	3	12	2	8	3	12	4	16	
3	Rapidez	2	2	4	3	6	2	4	4	8	
4	Confiabilidad	3	3	9	2	6	3	9	4	12	
5	Facilidad de manejo	2	3	6	2	4	3	6	4	8	
6	Complejidad	2	3	6	3	6	3	6	4	8	
7	Lista de exigencias	4	2	8	1	4	2	8	4	16	
8	Silencioso	3	2	6	1	3	2	6	4	12	
Suma			21	54	16	39	20	53	32	84	
Promedio				0.643		0.464		0.631		1	
ECONÓMICOS			Solución 1			Solución 2		Solución 3		Ideal	
N°	Criterio	g	p	p x g	p	p x g	p	p x g	p	p x g	
1	Número de piezas	2	2	4	1	2	2	4	4	8	
2	Fácil adquisición	3	2	6	2	6	2	6	4	12	
3	Fácil montaje	2	3	6	2	4	2	4	4	8	
4	Fácil mantenimiento	3	2	6	2	6	2	6	4	12	
5	Productividad	4	3	12	2	8	3	12	4	16	
6	Costo de la tecnología	3	3	9	3	9	2	6	4	12	
Suma			15	43	12	35	13	38	24	68	
Promedio				0.632		0.515		0.559			

Los promedios son plasmados en un gráfico de dispersión presentado en la Figura 19. Se observa que la solución 1 está más cerca de la línea de equivalencia de ponderación entre los aspectos técnicos y económicos. Además, al estar más a la derecha en el gráfico de dispersión, se determina que tiene un mayor promedio en la evacuación económica. Por lo tanto, la solución óptima es la solución 1.

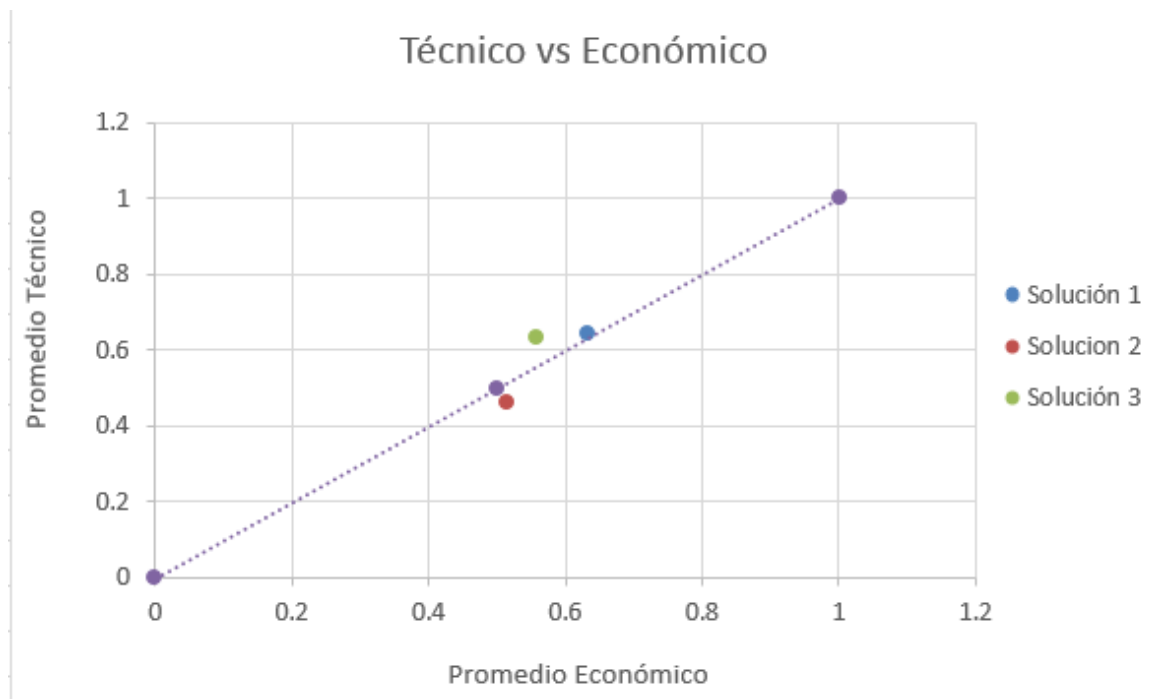


Figura 18. Gráfico técnico-económico entre las soluciones.

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

- Se propone una solución sobre el diseño de un mecanismo para el movimiento de las caderas en el plano frontal de un exoesqueleto durante el ciclo de la marcha humana sobre el sitio que cumple las exigencias establecidas y que está basado en el análisis de información sobre exoesqueletos de miembros inferiores, fisiología y movimiento de cadera, mecanismos de rotación aplicados a articulaciones de cadera en exoesqueletos y su estrategia de control con la que se añade un eslabón adicional con un rodamiento interno en cada pierna del exoesqueleto para así añadir el movimiento de caderas en el plano normal, movimientos de abducción/aducción.
- Según la problemática, la cantidad de personas con discapacidad esquelético-muscular en el Perú es considerable, por lo que se añade un plano de movimiento extra a los dispositivos que no incluyen movimiento en el plano frontal como es el caso del Exoesqueleto PUCP con el fin de mejorar la rehabilitación de los usuarios tanto en el plano sagital como en el plano normal.
- Este proyecto de investigación contribuye al diseño de un prototipo mecanismo de cadera que añada el movimiento en el plano frontal del Exoesqueleto PUCP que es parte de una línea de investigación en el grupo GIRAB (Grupo de Investigación de Robótica Aplicada y Biomecánica).
- Se concluye que la evaluación técnica-económica permitió elegir el mejor concepto de solución, que optimiza la relación entre nivel de tecnología y costo de tecnología.

Bibliografía

- Ambrósio, J., Abrantes, J. (2007). Developments in Biomechanics of Human Motion for Health and Sports. In: Pereira M.S. (eds) A Portrait of State-of-the-Art Research at the Technical University of Lisbon. Springer, Dordrecht.
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5690-1_33
- ANATOMIAUI1. (7 de Diciembre de 2014). *Articulación Coxofemoral*. Recuperado el 31 de Marzo de 2019, de
<https://anatomiaui1.wordpress.com/2014/12/07/articulacion-coxofemoral/>
- CONADIS Consejo Nacional para la Integración de la Persona con Discapacidad. (2018). Anuario Estadístico del Registro Nacional de la Persona con Discapacidad 2000-2017. Lima, Perú.
- El Húmero*. (14 de Enero de 2011). Recuperado el 14 de Abril de 2019, de <http://el-humero.blogspot.com/2011/01/anatomia-basica-de-la-cadera.html>
- Electrotec. (s.f.). *Diferencias entre microcontrolador y PLC*. Recuperado el 20 de Abril de 2019, de <https://electrotec.pe/blog/microcontroladorvsplc>
- Exoskeleton Report LLC. (2019). *Lokomat*. Recuperado el 10 de Abril de 2019, de <https://exoskeletonreport.com/product/lokomat/>
- Ferrati, B. (8 de Setiembre de 1998). *Estados Unidos Patente n° US5961541A*.
- Garcés Beltrán, A. E. (2017). DISEÑO DE UN MECANISMO DEL TIPO EXOESQUELETO DE MIEMBROS INFERIORES QUE PERMITA REPRODUCIR PATRONES DE MOVIMIENTO. Lima.
- Goffer, A., & ZILBERSTEIN, C. (13 de Octubre de 2008). *Estados Unidos Patente n° US8096965B2*.

Harding, N., Amundson, K., Burns, J., Angold, R., Zoss, A., & Kazerooni, H. (8 de Abril de 2011). *Europa Patente n° EP2556009B1*.

Hoogvliet, P. Lower Extremity Movements in Frontal Plane Balance Control during One-Leg Stance, Erasmus University, Rotterdam, Netherlands, 1997. Recuperado el 14 de agosto de 2020, de https://repub.eur.nl/pub/18019/970326_HOOGVLIET,%20Pieter.pdf

Kazerooni, H., Amundson, K., Angold, R., & Harding, N. (23 de Julio de 2009). *Estados Unidos Patente n° US8801641B2*.

Marco Sanz, C. (s.f.). *Marcha humana: Cinesiología De La Marcha Humana Normal. Material Didactico de la materia CINESIOLOGIA Y BIOMECANICA HUMANAS en e Grado de Terapia Ocupacional, Universidad de Zaragoza*. Recuperado el 31 de Marzo de 2019, de <http://wzar.unizar.es/acad/cinesio/Documentos/Marcha%20humana.pdf>

Mazzucchelli, R., Capítulo 1 Anatomía y Biomecánica. Villa, L., Pérez, A., Monografías médico-quirúrgicas del aparato locomotor: La Cadera. Tomo I. Barcelona: MASSON S. A., 2001

Mechanical and Materials Engineering (2010). Gait Analysis. Recuperado el 16 de Abril de 2019, de <https://me.queensu.ca/People/Deluzio/Gait.html>

Penalva, J. (13 de Abril de 2008). *HAL, traje-esqueleto desde Japón*. Recuperado el 16 de Abril de 2019, de <https://www.xataka.com/robotica-e-ia/hal-traje-esqueleto-desde-japon>

- Qiangyong, S., Xiaodong, Z., Jiangcheng, C., & Yuanjun, C. (2014). Design on mechanism of lower limb rehabilitation robot based on new body weight support (BWS) system. Haikar, China.
- Reategui, N. (2012). Guía de análisis de movimiento patológico para evaluación post tratamiento quirúrgico de fractura de fémur. Tesis de licenciatura en Ingeniería Electrónica. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- RoboticSpot. (2008). *Robot Lokomat*. Recuperado el 16 de Abril de 2019, de <http://www.roboticspot.com/robots.php?id=58>
- Sensing S.L. . (s.f.). *Acelerómetros*. Recuperado el 20 de Abril de 2019, de <https://sensores-de-medida.es/medicion/sensores-y-transductores/acelerometros-sensores-de-aceleracion/>
- Serna, A. (2010). *Rex, un exoesqueleto que le dice adiós a las sillas de ruedas*. Recuperado el 16 de Abril de 2019, de <https://www.fayerwayer.com/2010/07/rex-un-exoesqueleto-que-le-dice-adios-a-las-sillas-de-ruedas/all-comments/>
- SonRobots.com. (s.f.). *Motores, servomotores y motores paso a paso*. Recuperado el 20 de Abril de 2019, de <http://sonrobots.com/arduinos/motores-servomotores-y-motores-paso-a-paso/>
- Universidad de Antioquia. (16 de Febrero de 2016). *BIOMECÁNICA DE LA CADERA*. Recuperado el 31 de Marzo de 2019, de <http://aprendeenlinea.udea.edu.co/lms/moodle/mod/page/view.php?id=164182>
- Villarroya, A., Ángeles, M., Alonso-Vazquez, A., Ramírez-Escurdero, N., García, I., & Calvo, B. (2008). *Sensibilidad a la colocación de los marcadores en el modelo*

convencional de análisis cinemático de la marcha. Recuperado el 17 de Abril de 2019, de

https://www.researchgate.net/publication/39434164_Sensibilidad_a_la_colocacion_de_los_marcadores_en_el_modelo_convencional_de_analisis_cinematico_de_la_marcha

Winter, D. A. (1991). *The biomechanics and motor control of human gait: Normal, elderly and pathological*. Waterloo: Waterloo Biomechanics.

