

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PUCP**

**PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN DISPOSITIVO TIPO  
EXOESQUELETO PARA ASISTIR A LA ARTICULACIÓN DE LA  
RODILLA AL CORRER**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de BACHILLER EN  
CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**AUTOR:**

**DIEGO RODRIGO TORRES RICALDE**

**ASESOR:**

**DANTE ÁNGEL ELÍAS GIORDANO**

**Lima, diciembre 2020**

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se ha realizado el diseño conceptual (en base a la norma VDI 2221) de un exoesqueleto para asistir y proteger la articulación de la rodilla al correr. Este diseño ha sido seleccionado entre varias alternativas de solución luego de una evaluación técnica-económica basada en criterios considerados importantes para un exoesqueleto de este tipo.

Se ha realizado una breve revisión de la anatomía, fisiología y biomecánica de los miembros inferiores del cuerpo humano. Así mismo, se han evaluado las necesidades que tendría el usuario del exoesqueleto en mención, así como algunos de los parámetros más importantes al momento de correr. De esta manera, se han determinado los requerimientos con los que debe cumplir el dispositivo mencionado.

Se han investigado diversos exoesqueletos y se han estudiado los componentes utilizados en estos. Además, se han hecho comparaciones entre los tipos de actuadores que suelen ser usados y también entre algunas configuraciones especiales de estos. De esta forma, se determinaron los componentes que pueden cumplir con las funciones de la matriz morfológica para cada dominio (mecánico, eléctrico – electrónico y de control).

Se presentan también las alternativas para la estructura de funciones y se elige aquella considerada óptima, a partir de la cual se han elaborado las matrices morfológicas respectivas y se han propuesto las alternativas de solución que cumplen con el objetivo general de este trabajo.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN .....	5
ANATOMÍA Y BIOMECÁNICA DE LA RODILLA .....	8
1.1. Anatomía de la articulación de la rodilla .....	8
1.1.1. Huesos .....	8
1.1.2. Músculos .....	9
1.2. Fisiología de la articulación de la rodilla .....	10
1.3. Biomecánica de la articulación de la rodilla al correr .....	12
1.3.1. Cinemática .....	13
1.3.2. Cinética .....	15
ESTADO DE LA TECNOLOGÍA EN EXOESQUELETOS ACTIVOS .....	18
2.1. Exoesqueletos activos .....	18
2.1.1. Publicaciones académicas .....	19
2.1.2. Productos comerciales .....	22
2.2. Componentes de los exoesqueletos activos .....	24
2.2.1. Tipos de actuadores .....	24
2.2.2. Mecanismos de transmisión .....	24
2.2.3. Configuración de los actuadores .....	25
2.2.4. Sensores .....	26
2.2.5. Estructura .....	27
2.2.6. Energía eléctrica .....	27
DISEÑO CONCEPTUAL .....	29
3.1. Requerimientos .....	29
3.1.1. Necesidades del usuario .....	29
3.1.2. Parámetros estándar al correr .....	30
3.1.3. Requerimientos del dispositivo .....	32
3.2. Alternativas de solución .....	35
3.2.1. Estructura de funciones .....	35
3.2.2. Matrices morfológicas .....	45
3.2.3. Conceptos de solución integrados .....	50
3.2.4. Concepto de solución óptimo .....	53
3.2.5. Soluciones preliminares .....	56
3.2.6. Solución preliminar óptima .....	59
3.3. Proyecto Preliminar .....	64
3.3.1. Modelo en 3D .....	64

3.3.2. Diagrama de flujo .....	67
3.3.3. Arquitectura de hardware.....	68
3.3.4. Diagrama de operaciones.....	69
CONCLUSIONES .....	70
RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES .....	71
BIBLIOGRAFÍA.....	72
Anexo A: Tabla comparativa de exoesqueletos activos para el aumento de capacidades motoras .....	Anexos Pag. 1
Anexo B: Resultados del uso del exoesqueleto Elevate.....	Anexos Pag. 2



## INTRODUCCIÓN

Según las estadísticas, en el año 2018, se registraron 7.9 millones de participantes recreacionales en carreras (5K, 10K, Media Maratón y Maratón) en todo el mundo, 57.8% más que hace 10 años, lo que representa un gran aumento en la cantidad de personas que practican este deporte<sup>1</sup>. De la misma manera, en el Perú, la cantidad de “runners” (palabra con la que se identifican los practicantes de este deporte) también se ha incrementado y sigue creciendo 10% anualmente. Por lo que, tomando en cuenta que en el año 2016 se registraron aproximadamente 8 mil “runners” peruanos en algunos eventos<sup>2</sup>, la proyección para el año 2020 sería de casi 12 mil.

Sports Medicine Australia, sostiene que, durante un periodo de 12 meses, hasta el 70% de los corredores presenta lesiones por practicar el deporte de manera excesiva, sobrepasando sus capacidades corporales. De este total, 42% de las lesiones son en la rodilla, 17% en el pie/tobillo, 13% en la parte baja de la pierna y 11% en la cadera/pelvis. Es importante señalar que, las lesiones como resultado de errores de entrenamiento, son más comunes que lesiones agudas, como esguinces y distensiones, tanto musculares como de ligamento [Grove, 2008]. Se debe tener en cuenta que existen lesiones que conllevan a una condición crónica la cual no necesariamente impide la práctica del deporte, pero provoca molestias y/o dolor. En consecuencia, una lesión puede afectar a una persona negativamente, tanto en el aspecto deportivo como en su vida cotidiana, limitándola en ciertas actividades. Además, dependiendo de la gravedad de la lesión, esta puede llegar a tener un efecto permanente.

De esta manera, la salud de la persona se ve afectada no sólo por la lesión, sino también, por el cambio en su estilo de vida. Las personas que corren, ya sea lentamente o por unos pocos minutos, tienen 30% menos de probabilidad de morir por cualquier causa y 45% menos de probabilidad de morir por una enfermedad al corazón o un derrame cerebral en comparación con una persona sedentaria que no realiza ninguna actividad física, además de vivir un promedio de 3 años más que estas [Lee, 2014]. Esto sin mencionar los beneficios casi inmediatos que trae consigo realizar un deporte, como, por ejemplo: Dormir mejor, mejorar la salud mental y el estado de ánimo, entre otros.

---

<sup>1</sup> The State of Running 2019. RunRepeat 2020. Enlace: <https://runrepeat.com/state-of-running>

<sup>2</sup> El boom del ‘running’ recién empieza este año se correrán más de 300 kilómetros. Diario Gestión 2017. Enlace: <https://gestion.pe/tendencias/boom-running-recien-empieza-ano-correran-300-kilometros-126914-noticia/>

Las tecnologías para prevenir una lesión o evitar el progreso de la misma se vienen desarrollando desde hace ya varios años por universidades, institutos y empresas. Sin embargo, el uso de exoesqueletos para estos fines recién está tomando impulso, por lo que las investigaciones con fines militares han sido las más desarrolladas, aunque también existen exoesqueletos fuera del ámbito militar. No obstante, a pesar de la existencia de estos dispositivos, la presencia de los mismos en el Perú es escasa o nula, debido a las pocas investigaciones que existen al respecto en el país. Es necesario indicar que la palabra “exoesqueleto”, en este contexto, se refiere a un dispositivo con una estructura electromecánica de cierta rigidez que una persona utiliza sobre su cuerpo para mejorar sus capacidades motoras.

Actualmente, en el Perú no existe un dispositivo capaz de proporcionar apoyo y protección suficiente para que una persona que sufre de una patología fisiológica en la rodilla o es propensa a sufrirla, pueda correr sin sentir dolor y/o sin poner en riesgo su salud. Lo cual representa un obstáculo para que estas personas tengan un estilo de vida más saludable.

Por lo tanto, con el propósito de permitir que las personas puedan llevar una vida más saludable al realizar esta actividad, se propone la solución conceptual de un dispositivo tipo exoesqueleto para asistir y proteger la articulación de la rodilla al correr, el cual tendría como función reducir las fuerzas ejercidas sobre la articulación del usuario, procurando siempre que el dispositivo no entorpezca el movimiento natural de la articulación. Así, se pretende que el usuario no sienta molestia o dolor, además de mantener a la articulación saludable al realizar esta actividad.

De esta forma, se revisará la anatomía y fisiología de la articulación de la rodilla con el fin de comprender la biomecánica de esta al correr. Además, se investigará sobre los sistemas tipo exoesqueletos desarrollados para aumentar las capacidades motoras que asistan a la articulación de la rodilla, en especial aquellos desarrollados específicamente para proporcionar asistencia al correr. Luego, se realizará una explicación sobre los componentes más importantes presentes en los exoesqueletos investigados, así como de la función que cumple cada uno de estos componentes. Seguidamente, se evaluarán los requerimientos del sistema para cumplir con las necesidades del usuario y, al mismo tiempo, con el propósito de este diseño conceptual. Posteriormente, se propondrán múltiples alternativas de solución que serán comparadas para poder escoger una alternativa de solución óptima. Finalmente, a la alternativa considerada óptima, se le realizarán ciertas variaciones tecnológicas con el fin de obtener múltiples proyectos preliminares, los cuales serán sometidos a una evaluación para obtener el proyecto preliminar óptimo, el cual vendría a ser la solución conceptual propuesta.

Es importante mencionar que este trabajo tendrá a la población peruana como población objetivo, por lo que para el diseño del exoesqueleto se tendrán en consideración diversos aspectos propios de esta población, tales como estatura y peso. Además, tomando en cuenta que el Perú es un país en vías de desarrollo, el aspecto económico es algo que no se puede pasar por alto al momento de realizar el diseño.

El presente trabajo pretende servir como una referencia para el desarrollo de este tipo de dispositivos. Así, se espera aportar a la reducción de la brecha tecnológica que existe actualmente en el Perú.



## CAPÍTULO 1

### ANATOMÍA Y BIOMECÁNICA DE LA RODILLA

En el presente capítulo se expone la anatomía (a grandes rasgos) y la fisiología de la articulación de la rodilla, para luego explicar la biomecánica de la misma al correr. Esto ayudará a identificar los movimientos que realiza, su rango, la velocidad con la que se mueve y las fuerzas a las que es sometida al realizar esta actividad, lo cual proporcionará información valiosa para el diseño del dispositivo.

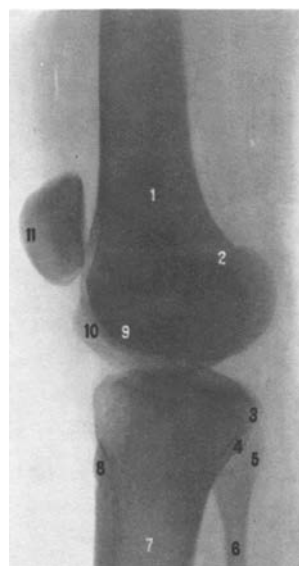
#### 1.1. Anatomía de la articulación de la rodilla

Esta articulación es la más compleja y voluminosa de todas, por lo que, para poder comenzar a entenderla, es necesario explicar los huesos y músculos que la conforman.

##### 1.1.1. Huesos

En la formación de esta articulación participan tres huesos: fémur (extremo inferior), tibia (extremo superior) y la rótula (también llamada patela), los cuales pueden ser observados en la Figura 1.1. La cara articular de la rótula se encuentra entre los cóndilos del fémur, en la cara anterior del mismo. Las caras articulares superiores de los cóndilos de la tibia son un poco cóncavas, por lo que no corresponden a la curvatura de las caras articulares del fémur. Esta inconsistencia es nivelada, en parte, por los meniscos medial y lateral, los cuales se insertan por delante y por detrás en la eminencia intercondílea de la tibia [Sinelnikov, 1984].





1. Fémur
2. Fosa intercondílea
3. Cóndilo medial
4. Cóndilo lateral
5. Cabeza de la fibula
6. Fíbula
7. Tibia
8. Tuberosidad de la tibia
9. Cóndilo lateral
10. Cóndilo medial
11. Rótula (patela)

Figura 1.1: Articulación de la rodilla [Sinelnikov, 1984].

### 1.1.2. Músculos

Los músculos son los responsables del movimiento de la articulación, estos trabajan en conjunto y suelen tener más de una función. Por otro lado, estos solo pueden ejercer fuerzas de tensión (solo pueden jalar), por lo que, para el caso de la articulación de la rodilla, se tienen principalmente dos grupos: uno que realiza la extensión y otro que realiza la flexión. Los músculos mencionados a continuación se pueden observar en la Figura 1.2.

#### **Extensión**

En la extensión de esta articulación interviene el grupo muscular denominado cuádriceps femoral, el cual comprende a cuatro músculos:

- Músculo vasto medial: situado medialmente con relación al fémur.
- Músculo vasto lateral: rodea al fémur por su lado lateral.
- Músculo vasto intermedio: posicionado directamente sobre la cara anterior del fémur y cubierto por los dos vastos, medial y lateral.
- Músculo recto femoral: situado superficialmente por encima del vasto intermedio.

Este grupo muscular comparte un tendón común, el cual se sitúa por encima de la articulación de la rodilla, fijándose en la base y en los bordes laterales de la patela, para luego continuar en el ligamento patelar, insertándose en la tuberosidad de la tibia [Prives, 1984].

## Flexión

En la flexión de esta articulación participan varios músculos, los cuales serán brevemente mencionados a continuación:

- Músculo semitendinoso: su tendón ocupa casi toda su mitad distal.
- Músculo sartorio: va en forma de una larga cinta por el miembro inferior.
- Músculo semimembranoso: su tendón laminar forma casi toda su mitad proximal.
- Músculo bíceps femoral: comprende dos cabezas (larga y corta) que comienzan en lugares distintos para luego unirse e insertarse en la cabeza de la fíbula.
- Músculo gastrocnemio (gemelos): compuesto por dos cabezas cuyos tendones iniciales se adhieren a la cápsula de la articulación de la rodilla.
- Músculo poplíteo: tiene forma triangular y está situado en la cara posterior de la articulación de la rodilla, debajo del músculo gastrocnemio.
- Músculo grácil: cinta muscular larga y estrecha que se extiende superficialmente por los músculos abductores.

El músculo semitendinoso, el músculo grácil y el músculo sartorio se insertan en la tuberosidad de la tibia y en la fascia crural [Prives, 1984].

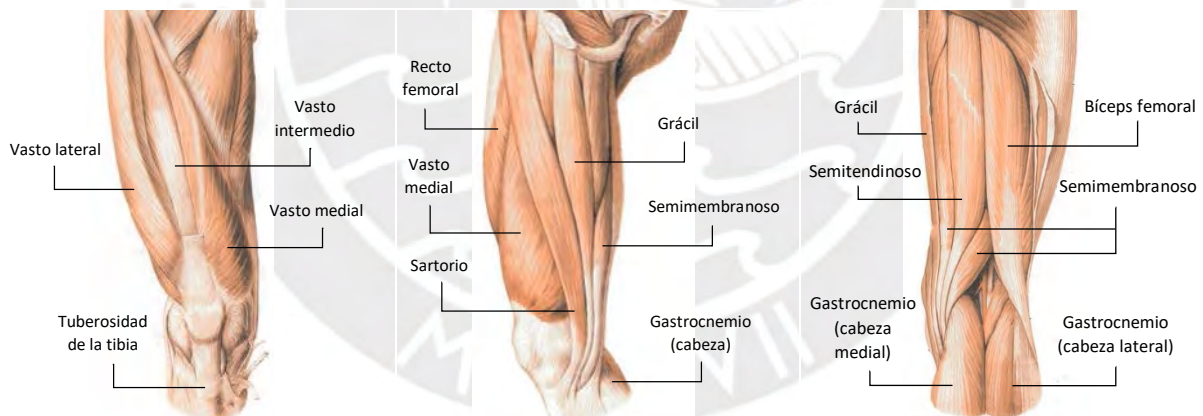


Figura 1.2: Músculos de la pierna. De izquierda a derecha: vista anterior, vista anterior y medial, vista posterior. Adaptado de [Sinelnikov, 1984].

## 1.2. Fisiología de la articulación de la rodilla

Debido a que los movimientos predominantes al correr se realizan en el plano sagital (Figura 1.3), se realizará el análisis para este plano únicamente. De esta manera, se puede observar que el movimiento de rotación realizado por la rodilla parece darse en un solo eje horizontal, que pasa por la misma, perpendicular a este plano.

Sin embargo, por dentro, el fémur rota a la vez que se desplaza sobre la tibia dependiendo del grado de flexión en el que se encuentre la articulación. Estos movimientos provocan que el eje de giro se desplace conforme rota la articulación.

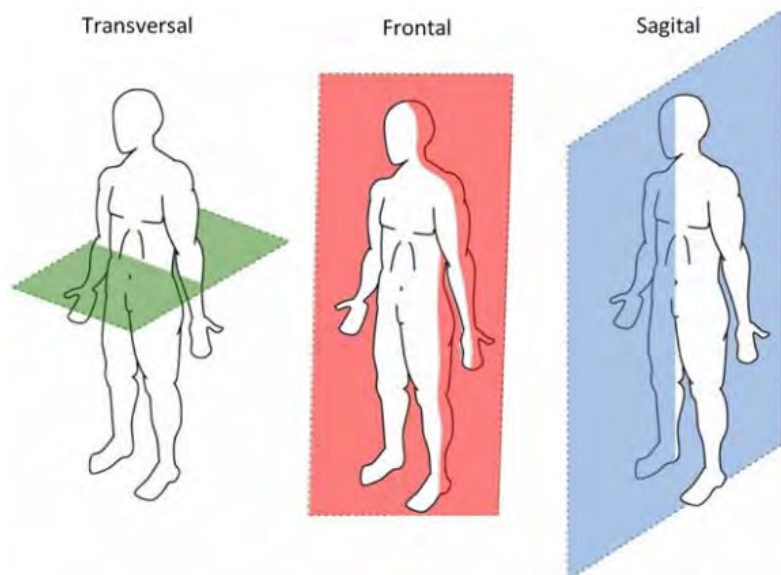


Figura 1.3: Planos anatómicos del cuerpo humano<sup>3</sup>.

En la Figura 1.4 se puede apreciar como el extremo inferior del fémur gira y se desplaza ligeramente respecto al extremo superior de la tibia en la sección sagital medial. Por otro lado, en la Figura 1.5, se pueden observar las distancias de los desplazamientos que toman lugar en la articulación tibio-femoral. De esta manera, en la sección sagital medial, se observa un pequeño desplazamiento de 2 mm hacia adelante, mientras que, en la sección sagital lateral se observa un desplazamiento hacia atrás de 16 mm, llegando a 19 mm cuando la flexión es de 120° (esto último no se muestra en la imagen) [Iwaki, 2000].

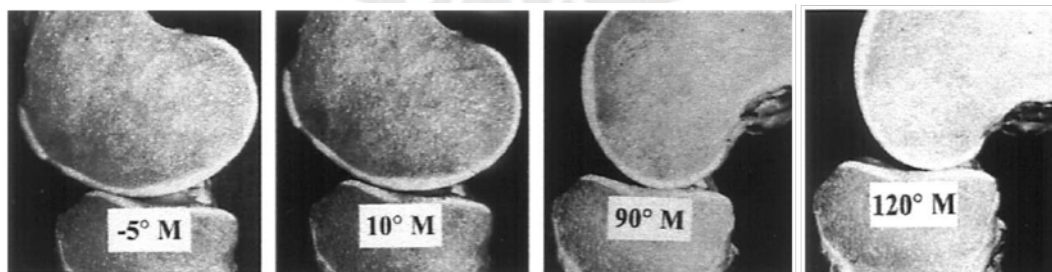


Figura 1.4: Rotación y desplazamiento de la articulación tibio-femoral en la sección sagital medial. Imagen adaptada de [Iwaki, 2000].

<sup>3</sup> Imagen extraída de [http://www.academia.edu/5854873/Planos\\_anatomicos\\_del\\_cuerpo\\_humano](http://www.academia.edu/5854873/Planos_anatomicos_del_cuerpo_humano).

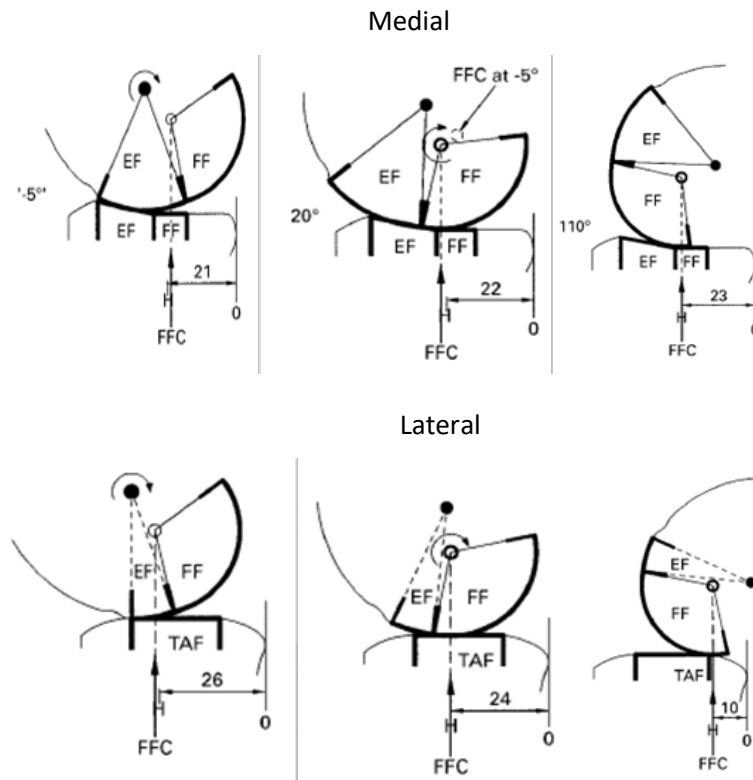


Figura 1.5: Diagramas de las secciones sagitales medial y lateral de la articulación tibio-femoral a -5°, 20° y 110°. La flecha circular indica el centro en el cual parece tomar lugar la rotación. Imagen adaptada de [Iwaki, 2000].

Por último, es importante mencionar que la rodilla tiene un rango de movimiento muy amplio en el plano sagital, pudiendo alcanzar los 40° en la flexión. Mientras que en la extensión alcanza los 180° cuando el muslo y la pierna se encuentran en una misma línea [Prives, 1984].

### 1.3. Biomecánica de la articulación de la rodilla al correr

La biomecánica estudia la estructura, función y moción de sistemas biológicos, utilizando métodos empleados en la mecánica. Así, se analiza el comportamiento de estos sistemas cuando son sometidos a solicitaciones estáticas y dinámicas. De esta manera, se puede entender como un sistema biológico interactúa con su entorno desde un punto de vista tanto físico como matemático. En este caso, se analizarán la cinemática, que describe características propias del movimiento, y la cinética, la cual refleja las causas de este.

### 1.3.1. Cinemática

Al correr, el miembro inferior se mueve con una velocidad angular que varía dependiendo no solo de la velocidad a la que se esté corriendo, sino también de la fase de la marcha. Por esto, es necesario distinguir dos momentos claves: la fase de apoyo y la fase de oscilación. Durante la fase de apoyo, uno de los pies está en contacto con el suelo, mientras que, durante la fase de oscilación, ambos pies se encuentran en el aire.

Haciendo esta distinción, es posible apreciar que, durante la fase de apoyo, la velocidad angular de la articulación de la rodilla es relativamente lenta, dado que su ángulo varía muy poco mientras está en contacto con el suelo. Mientras que, durante la fase de oscilación, la velocidad angular aumenta considerablemente debido a que la pierna debe posicionarse delante del cuerpo para prepararse para el siguiente paso. Es importante señalar que existe un punto de máxima flexión y otro de máxima extensión, antes de los cuales se observan picos en la velocidad angular (Figura 1.6).

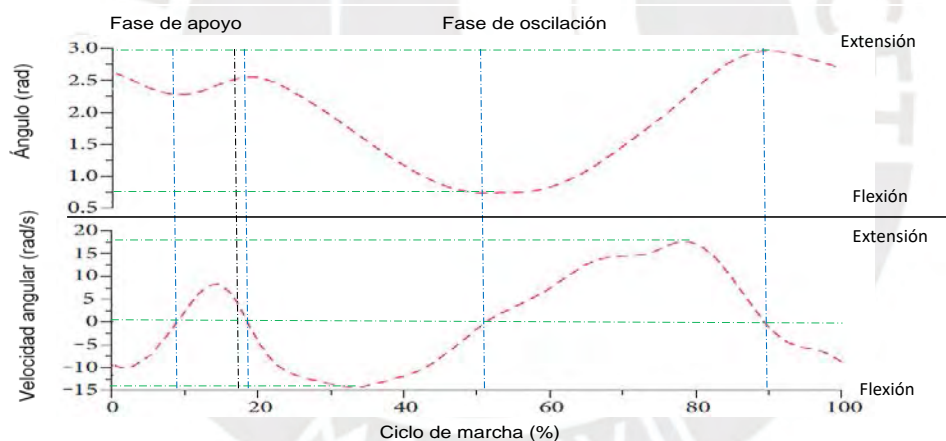


Figura 1.6: Cambios en el ángulo y la velocidad angular de la articulación de la rodilla de un atleta corriendo a una velocidad de 9.7 m/s. Gráfico recuperado y modificado de [Zhong, 2017].

Adicionalmente, en ambas fases existen puntos donde la velocidad angular es igual a cero, lo que significa un cambio en el sentido de giro de la articulación. Estos puntos marcan el instante en la transición entre la flexión y la extensión de la pierna, así como de los músculos involucrados en cada caso. De esta manera, se tienen cuatro instantes que serán explicados brevemente a continuación, considerando únicamente los músculos que influyen en la articulación de la rodilla:

### **Primer instante**

- Antes del primer instante: Al entrar el pie en contacto con el suelo, la rodilla tiene un ángulo de flexión que varía dependiendo de la velocidad a la que se esté desplazando el corredor (Figura 1.7). Es en este momento cuando el cuádriceps femoral actúa para mantener la rodilla estable y evitar que esta se flexione demasiado.
- Transición: Se da cuando la línea vertical de apoyo del pie se alinea con el centro de masa del cuerpo. En este instante se tiene un pico de flexión, que para los corredores llega hasta los 45° (Figura 1.7), siendo menor para los velocistas debido al poco tiempo de contacto con el suelo [Dicharry, 2010].

### **Segundo instante**

- Antes del segundo instante: La pierna se comienza a extender gracias a los músculos gastrocnemio (gemelos) y cuádriceps femoral, los cuales actúan sobre la rodilla y el pie.
- Transición: Se da una vez que el pie deja de hacer contacto con el suelo.

### **Tercer instante**

- Antes del tercer instante: Todos los músculos involucrados en la flexión de la rodilla, con excepción del gastrocnemio, actúan para llevar la pierna hacia el muslo, manteniendo la rodilla flexionada mientras esta es impulsada hacia adelante. Los músculos bíceps femoral, semitendinoso y semimembranoso son los principales flexores.
- Transición: Se da cuando la rodilla ha llegado al máximo ángulo de flexión del ciclo de marcha. Este ángulo está alrededor de los 90° para los corredores, mientras que, para los velocistas suele variar entre 105° y 130° [Dicharry, 2010]. Por lo que se podría decir que el ángulo aumenta conforme la velocidad de desplazamiento del corredor también lo hace.

### **Cuarto instante**

- Antes del cuarto instante: La rodilla comienza a descender mientras extiende la pierna gracias al cuádriceps femoral.
- Transición: Se da cuando la rodilla ha llegado al máximo ángulo de extensión del ciclo de marcha y los músculos involucrados en la flexión, junto con el cuádriceps femoral, adecuan el ángulo de la rodilla para el contacto con el suelo.

Al realizar este análisis de la marcha, se puede apreciar que existe una cantidad considerable de músculos, solo para la articulación de la rodilla, que deben actuar en armonía para que una persona sea capaz de correr. Además, es importante resaltar que, los ángulos

mencionados, las velocidades angulares y la duración de las fases, varían dependiendo de la velocidad a la que se esté desplazando la persona. De esta manera, la fase de apoyo de una persona corriendo a una velocidad promedio, representa aproximadamente el 40% del ciclo de marcha (Figura 1.7), mientras que para un atleta corriendo a máxima velocidad esta puede representar alrededor del 20% del mismo (Figura 1.6).

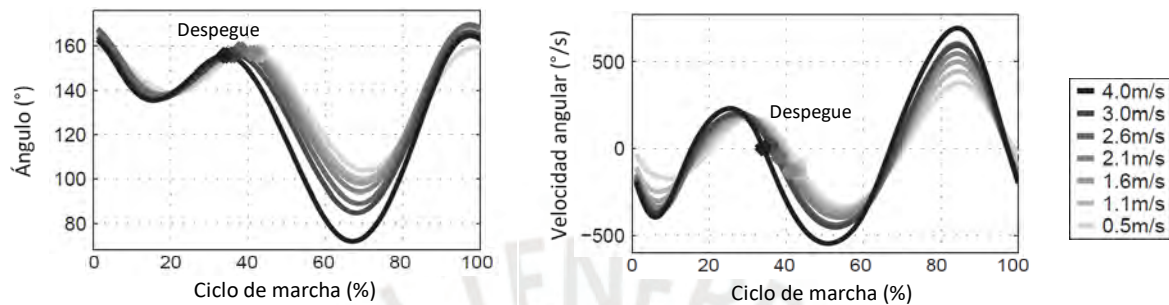


Figura 1.7 Variación en el ángulo y la velocidad angular durante la marcha dependiendo de la velocidad del corredor. Gráficos recuperados y modificados de [Grimmer, 2014].

### 1.3.2. Cinética

La cinética, se estudia para conocer los motivos del movimiento, y por lo tanto las fuerzas, la potencia, y la energía que afectan la forma en la que un individuo se mueve [Dicharry, 2010]. En este caso se analizarán los momentos y las fuerzas de reacción a las que está sometida la rodilla, así como a la potencia absorbida y generada por esta.

#### **Momentos**

Durante el contacto con el suelo, cuando el centro de masa (CM) está en su punto más bajo, el momento en la rodilla alcanza su valor máximo en el ciclo de marcha. Esto se debe principalmente a que, para bajar el CM, la rodilla debe flexionarse, incrementando la cantidad de peso que esta debe soportar para mantener al corredor estable.

Como se puede observar en la Figura 1.8, el valor más alto del momento se encuentra casi en la mitad de la fase de apoyo, aumentando conforme aumenta la velocidad con la que se desplaza el corredor. Cabe resaltar que el momento flexor, es mucho menor al momento extensor debido a que al flexionar la pierna, esta no se encuentra en contacto con ninguna superficie, por lo que la rodilla no debe soportar el peso del cuerpo.

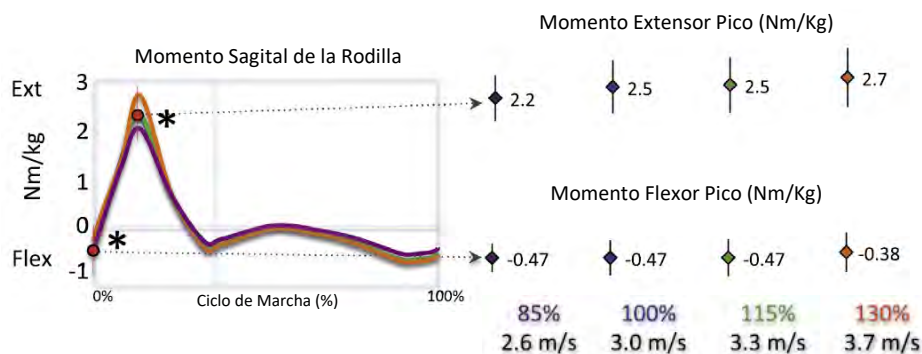


Figura 1.8: Cambios en el momento (normalizado con la masa: Newton-metro/kilogramo) ejercido por la rodilla en el plano sagital durante el ciclo de marcha dependiendo de la velocidad del corredor. Gráfico recuperado y modificado de [Orendurff, 2018].

### Fuerza de reacción del suelo

Esta fuerza surge a partir del contacto del pie del corredor con el suelo, produciendo dos picos, el primero debido al impacto, y el segundo cuando el CM se encuentra en su punto más bajo (Figura 1.9). La magnitud de esta fuerza representa el resultado de los momentos generados en cada articulación, los cuales surgen como producto de las fuerzas de tensión ejercidas por los grupos musculares en cada instante durante la fase de apoyo. Es importante resaltar que el segundo pico de la fuerza ejercida por los corredores suele estar en un rango de entre 2.2 y 2.6 veces su peso corporal, pudiendo llegar a ser de hasta 3 veces, e inclusive un poco más en casos excepcionales [Clark, 2017].

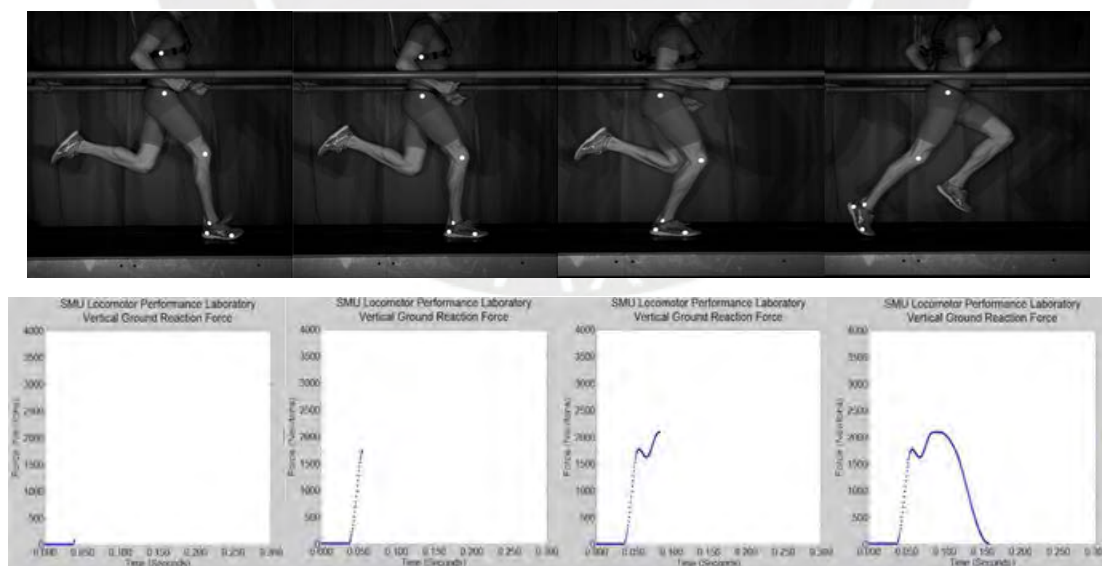


Figura 1.9: Secuencia de Ryan Hall (maratonista profesional) corriendo a una velocidad de 5.7 m/s y la fuerza de reacción durante el contacto con el suelo<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Imágenes recuperadas de <https://www.youtube.com/watch?v=PfHNOwmmik4>.



## Potencia

En general, en sistemas biológicos se suele hacer una distinción entre potencia positiva y negativa. La primera es cuando el trabajo realizado tiene como fin producir un movimiento, mientras que la segunda es cuando este trabajo es utilizado para soportar una carga. Así, se puede decir que una articulación genera o absorbe potencia, dependiendo del fin para el cual esa potencia sea utilizada.

Al correr, la articulación de la rodilla presenta su mayor pico cuando alcanza la máxima flexión durante la fase de apoyo (Figura 1.10). Esto se debe a que en ese instante se genera la mayor fuerza de reacción con el suelo (correspondiente al segundo pico), debido a que el CM baja y el momento en la rodilla aumenta para poder mantener estable al corredor, y así comenzar a impulsarlo hacia adelante. Debido a que la articulación absorbe la potencia con el fin de soportar el peso del cuerpo del corredor, esta se considera negativa (Figura 1.10). Es importante señalar que la rodilla presenta un mayor pico de potencia negativa en comparación a las articulaciones de la cadera y el tobillo.

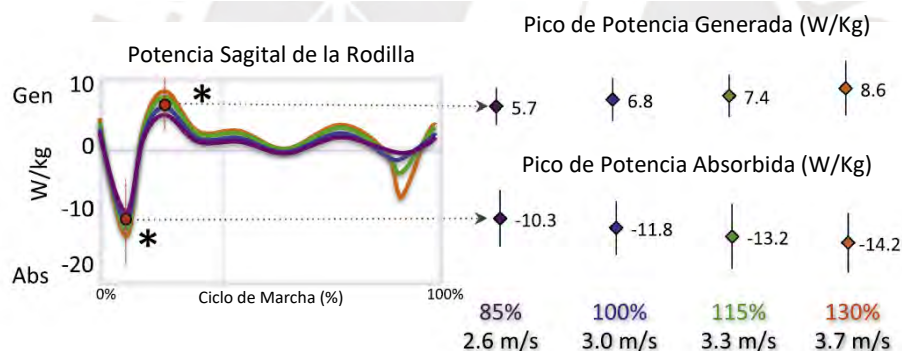


Figura 1.10: Cambios en la potencia (normalizada a la masa: Vatios/kilogramo) generada (+) y absorbida (-) por la rodilla en el plano sagital durante el ciclo de marcha dependiendo de la velocidad del corredor. Gráfico recuperado y modificado de [Orendurff, 2018].

## CAPÍTULO 2

### ESTADO DE LA TECNOLOGÍA EN EXOESQUELETOS ACTIVOS

En el presente capítulo se presentan algunos de los exoesqueletos activos más desarrollados, los que se han encuentran en publicaciones académicas o como productos comerciales. También se presenta una breve mención de los principales componentes que constituyen los exoesqueletos activos, como son actuadores, sensores y mecanismos.

#### 2.1. Exoesqueletos activos

Este tipo de dispositivos se vienen desarrollando desde los años 60, cuando estos eran sumamente grandes y complejos, haciendo imposible su aplicación en un entorno fuera del laboratorio. Sin embargo, gracias al avance de la tecnología, hoy en día se tiene una gran variedad de estos dispositivos, tanto de rehabilitación como de aumento de capacidades motoras, los cuales son cada vez más compactos y ofrecen mayores beneficios al usuario en cuanto a fuerza, resistencia, rango de movimiento, comodidad y versatilidad. Es importante mencionar que, a diferencia de un exoesqueleto pasivo, un exoesqueleto activo utiliza un actuador para mover el efector (parte del dispositivo que interactúa con el entorno).

A continuación, se expondrán brevemente los principales dispositivos de la categoría de aumento de capacidades motoras, debido a que estos están más relacionados al tema de este trabajo de investigación. En el Anexo A se encuentra una tabla con mayor información sobre estos dispositivos.

### 2.1.1. Publicaciones académicas

En el ámbito académico se pueden encontrar prototipos funcionales, creados con el fin de investigar y analizar el comportamiento de estos dispositivos al interactuar con una persona. Además, en estos prototipos se observan nuevos conceptos, los cuales pueden ser tomados en cuenta al diseñar un exoesqueleto.

#### ***Clutch–Spring Knee Exoskeleton for Running***

Utiliza un embrague para acoplar un resorte torsional ubicado al lado de la articulación de la rodilla, el cual almacena energía durante la fase de apoyo hasta la transición del primer instante, para luego liberarla antes de la transición del segundo instante y finalmente ser desacoplado con el fin de no intervenir en la fase de oscilación. Al hacer esto, provee de cierto apoyo a la articulación, reduciendo el trabajo que esta debe realizar, tanto para soportar el peso del usuario como para impulsarlo. El peso total de este dispositivo (Figura 2.1) para una pierna es de 710 gramos y puede soportar una carga de hasta 190 Newton-metro (Nm) [Elliott, 2014].



Figura 2.1: Dos configuraciones del exoesqueleto elástico cuasi-pasivo, una abarcando la rodilla y el tobillo (izquierda) y otra solo la rodilla (derecha). Imágenes recuperadas de [Elliott, 2014].

#### ***Quasi-Passive Knee Exoskeleton to Assist Running***

Consta de una rodillera en la cual se encuentra un mecanismo activo que acopla un par de resortes en paralelo con la rodilla durante la fase de apoyo, y luego los desacopla aproximadamente en la transición del segundo instante. De esta manera, se almacena la energía, reduciendo el esfuerzo requerido por el cuádriceps para impulsar al corredor. El sistema para una pierna (Figura 2.2) pesa cerca de 2.5 kg y puede soportar una carga de hasta 47.5 Nm [Dollar, 2008].



Figura 2.2: Izquierda: exoesqueleto en su ángulo máximo de flexión. Derecha: vista detalla del actuador. Imágenes recuperadas de [Dollar, 2008].

### **Roboknee**

Proporciona apoyo en actividades cotidianas como subir escaleras y caminar, incluso si el usuario lleva una carga pesada. Utiliza un dispositivo (Figura 2.3) conocido como actuador elástico en serie o AES (SEA por sus siglas en inglés), el cual presenta una baja impedancia en el efector y un buen control de fuerza. Pesa 5.3 kg en total y puede ejercer una fuerza de 1330 N [Pratt, 2004].

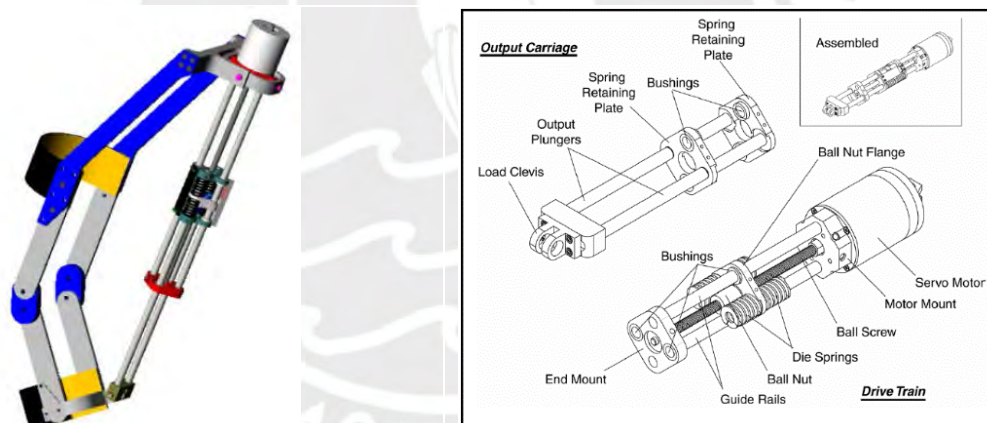


Figura 2.3: Izquierda: rodillera y actuador AES. Derecha: actuador AES en vista explotada. Imágenes recuperadas de [Pratt, 2004].

### **BLEEX**

Comprende siete grados de libertad por pierna, cuatro de los cuales son energizados por actuadores hidráulicos lineales de doble efecto. Este exoesqueleto (Figura 2.4) está diseñado para los miembros inferiores, pesa 14 kg y permite al usuario llevar cargas de hasta 75 kg (incluyendo el peso del sistema). Por otro lado, el exoesqueleto actúa tanto en el plano frontal como sagital, lo cual lo distingue de otros sistemas [Zoss, 2005].

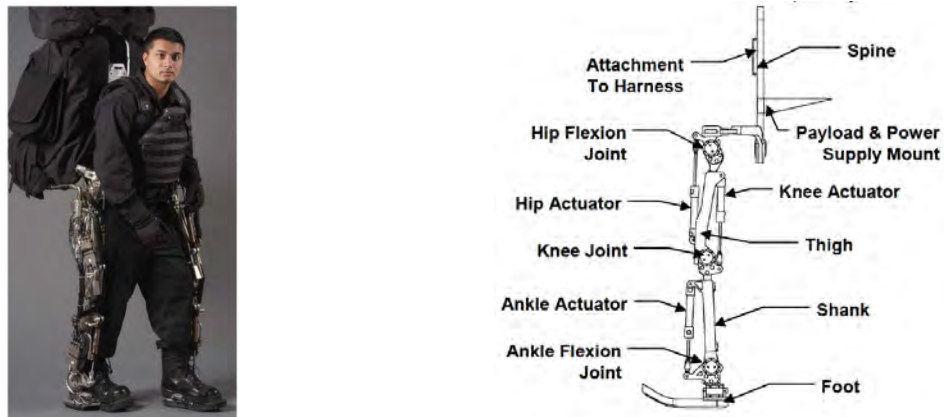


Figura 2.4: Izquierda: usuario con el exoesqueleto cargando una carga pesada. Derecha: partes del exoesqueleto. Imágenes recuperadas de [Zoss, 2005].

### ***Lightweight and Back-drivable Knee Exoskeleton***

Diseñado como un dispositivo de asistencia para reducir el costo metabólico al caminar, tiene como objetivo adicional la comodidad del usuario (Figura 2.5). Por este motivo, comprende una geometría para mitigar algunos efectos negativos que se pueden encontrar en un exoesqueleto de miembros inferiores. Pesa 3.2 kg en total y puede proveer un momento de hasta 16 Nm mediante un sistema de transmisión de fajas sincrónicas [Wang, 2018].

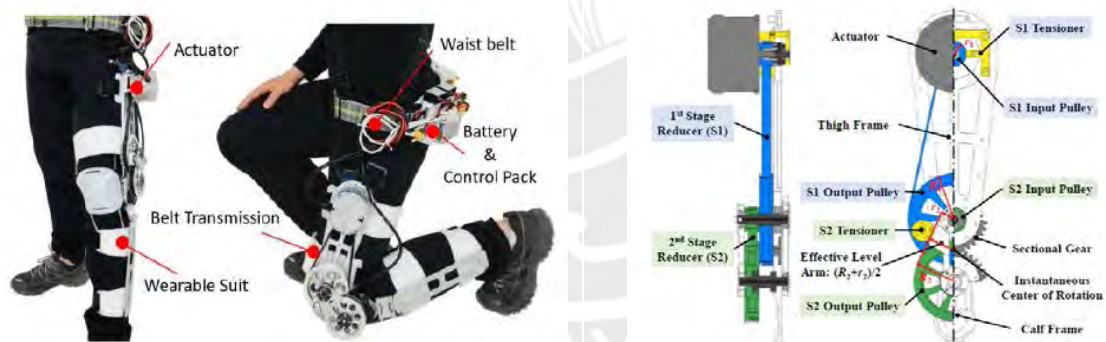


Figura 2.5: Izquierda: vista general del exoesqueleto. Derecha: vista detalla del sistema de transmisión. Imágenes recuperadas de [Wang, 2018].

### ***Comparación entre exoesqueletos activos***

A continuación, se presenta un resumen sobre las características técnicas de los exoesqueletos antes mencionados en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Comparación entre los exoesqueletos activos de publicaciones académicas

Características	Correr		Caminar		
	a	b	c	d	e
Exoesqueleto					
Articulaciones	Rodilla	Rodilla	Rodilla	Tobillo (3) Rodilla (1) Cadera (3)	Rodilla
Mecanismos	Engranaje planetario 1:2.2	Polea sincrónica: 3:1 y husillos de bolas	Husillo de bolas	Brazo de palanca	2 poleas sincrónicas: 8.85:1
Actuadores	Embrague activado por solenoide	Motor eléctrico	Motor eléctrico	Motor eléctrico y 4 pistones de doble efecto	Motor eléctrico de alta densidad de torque
Elemento pasivo	Resorte torsional	Resorte de compresión	Resorte de compresión	Ninguno	Ninguno
Sistema de Control	Máquina de estados	Control de posición	Control de fuerza con PD y factor de asistencia	Get out of the way control	Control de torque (por corriente del motor) en cascada
Sistema de medición	Codificador óptico, acelerómetro, giroscopio, sensor de barrera	Codificador óptico, potenciómetro rotacional y suela con interruptor	2 celdas de carga y codificador óptico lineal	Codificadores, inclinómetro, acelerómetro, s. de presión y suela con interruptores	Giroscopio, codificador óptico, sensor de corriente (módulo del motor)
Energía	Batería de LiPo <sup>5</sup> de 2 Ah	Batería de LiPo	Baterías de NiMH <sup>6</sup>	Batería	Batería
Peso total (kg)	0.71	5	5.3	14	3.2
Carga máx.	190 Nm	47.5 Nm	1330 N	75 kg	16 Nm
Autonomía (horas)	8	No específica	1	No específica	1
Espacio de uso	Terreno plano	Terreno plano	Terreno irregular	Terreno irregular	Terreno plano

### 2.1.2. Productos comerciales

Los exoesqueletos activos más comercializados son aquellos con fines militares, principalmente por la disponibilidad de fondos en este sector para el desarrollo de dispositivos altamente avanzados. A continuación, se mencionarán brevemente algunos dispositivos que hayan sido adquiridos por entidades militares o financiados por estas.

#### **Human Universal Load Carrier (HULC)**

El HULC (Figura 2.6) se desarrolló con fines militares, y tiene dos características principales: puede cargar hasta 91 kg sin impedir el movimiento del usuario y reduce el costo metabólico del usuario para moverse. Pesa 24 kg y tiene un rango de 20 km corriendo a 4 km/h, además

<sup>5</sup> LiPo: Polímero de Litio.

<sup>6</sup> NiMH: Níquel-metal hidruro.

de permitirle al usuario correr a una velocidad máxima de 16 km/h durante un corto periodo de tiempo. De esta manera, un soldado puede llevar una carga, sin agotarse considerablemente y sin poner en riesgo sus articulaciones, a través de una distancia prolongada<sup>7</sup>.



Figura 2.6: Soldado usando el HULC y corriendo con una carga en la espalda<sup>8</sup>.

### **ONYX**

Este dispositivo (Figura 2.7) también fue diseñado con fines militares para aumentar la resistencia y la fuerza de los soldados al caminar o correr por terrenos irregulares llevando una carga pesada. Reduce la fatiga en las piernas y ayuda a distribuir correctamente el peso con el fin de mantener el sistema esquelético alineado para evitar sobreesfuerzos y lesiones<sup>9</sup>.



Figura 2.7: Soldado usando el ONYX<sup>10</sup>.

<sup>7</sup> Human Universal Load Carrier (HULC). Army Technology s.f. Enlace: <https://www.army-technology.com/projects/human-universal-load-carrier-hulc/>.

<sup>8</sup> Imagen extraída de <https://www.army-technology.com/projects/human-universal-load-carrier-hulc/>.

<sup>9</sup> Strength To Go The Distance. Lockheed Martin s.f. Enlace: [https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/exoskeleton-technologies/military.html?cq\\_ck=1522941066947](https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/exoskeleton-technologies/military.html?cq_ck=1522941066947)

<sup>10</sup> Imagen extraída de [https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/exoskeleton-technologies/military.html?cq\\_ck=1522941066947](https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/exoskeleton-technologies/military.html?cq_ck=1522941066947).

## 2.2. Componentes de los exoesqueletos activos

Estos dispositivos deben funcionar en armonía con el cuerpo del usuario para poder hacerlo correctamente, por lo que necesitan ciertos componentes que les permitan interactuar con este y percibir sus movimientos y/o intenciones. Por otro lado, necesitan materiales resistentes para soportar las cargas a las que están sometidos durante su uso. En los siguientes puntos se expondrán brevemente algunos de estos componentes.

### 2.2.1. Tipos de actuadores

Los actuadores son los responsables del movimiento de los mecanismos que utiliza un exoesqueleto para interactuar con el usuario y aumentar sus capacidades. Los dos tipos más utilizados en cuanto a exoesqueletos son los eléctricos y los hidráulicos. En la Tabla 2.2 se pueden apreciar ciertas características propias de estos tipos de actuadores.

Tabla 2.2: Comparación de tipos de actuadores utilizados en exoesqueletos

<i>Tipo de actuador</i>	Eléctrico	Hidráulico
<i>Actuadores utilizados</i>	Motor DC sin escobillas (rotor interno o externo)	Pistón de doble efecto
<i>Eficiencia</i>	Mayor a 85%	Entre 40% y 55%
<i>Fuerza producida</i>	Media	Muy alta
<i>Necesidad de mantenimiento</i>	Baja	Alta
<i>Componentes adicionales</i>	Pocos	Varios
<i>Generación de fuerza</i>	Por corriente eléctrica	Por fluido comprimido (usualmente un tipo de aceite)

### 2.2.2. Mecanismos de transmisión

Los mecanismos permiten adecuar los movimientos y fuerzas del actuador a las solicitudes que tendrá el exoesqueleto al interactuar, tanto con el entorno como con el usuario. Los más utilizados serán descritos brevemente.

- Caja reductora: Se utiliza para adecuar la velocidad angular y el torque de un motor eléctrico a los requerimientos del diseño.
- Engranaje planetario: Tiene el mismo propósito que la caja reductora, pero permite transmitir un mayor torque en un tamaño más compacto.



- Faja sincrónica: Usualmente utilizada como etapa de reducción previa a otro mecanismo, aunque puede usarse directamente si las solicitudes de potencia no son muy altas.
- Husillo de bolas: Consiste en un husillo que se desplaza a lo largo de un eje roscado, convirtiendo el movimiento rotacional de un motor eléctrico a un movimiento lineal.
- Transmisión de onda (Harmonic Drive): Misma función que la caja reductora, pero con una mayor relación de reducción y un tamaño más compacto.
- Embrague: Permite acoplar y desacoplar el mecanismo del efector.
- Brazo de palanca: Transforma un movimiento lineal a uno rotacional.

### 2.2.3. Configuración de los actuadores

En este tipo de aplicaciones, los actuadores están acompañados por varios componentes, puesto que por sí solos no pueden cumplir correctamente su función. Por este motivo, se utilizan mecanismos y a veces resortes, obteniendo así los actuadores conocidos como SEA (Series Elastic Actuator) y PEA (Parallel Elastic Actuator).

Tanto un SEA como un PEA utilizan resortes, como se muestra en la Figura 2. 8. Sin embargo, en un SEA el resorte se encuentra entre el mecanismo y el efector, lo cual le permite tener una menor impedancia en comparación a actuadores rígidos, cuyo mecanismo se encuentra directamente acoplado al efector, además de reducir el pico de potencia del actuador. Por otro lado, en un PEA el resorte se encuentra en paralelo con el mecanismo que acompaña al motor, lo cual no reduce la impedancia del actuador, pero si el torque requerido a la salida del mecanismo utilizado. En la Tabla 2.3 se mencionan algunos SEA y PEA, así como sus características.



Figura 2.8: Diagrama de un SEA (a) y un PEA (b). Recuperado de [Vadiati, 2018].

Tabla 2.3 Comparación de algunos SEA y PEA

<i>Características</i>	ESEA <sup>11</sup>	RSEA <sup>12</sup>	CSEA <sup>13</sup>	HSEA <sup>14</sup>	CPEA <sup>15</sup>
<i>Movimiento</i>	Lineal	Rotatorio	Rotatorio	Lineal	Rotatorio
<i>Tipo de resorte</i>	De compresión	De torsión	De torsión	De compresión	De torsión
<i>Eficiencia</i>	Media	Media	Muy Alta	Baja	Muy Alta
<i>Fuerza</i>	Media	Media	Alta	Muy alta	Alta
<i>Velocidad</i>	Medio	Rápido	Rápido	Rápido	Rápido
<i>Complejidad en el control</i>	Baja	Baja	Media	Alta	Baja
<i>Mecanismos</i>	Husillo de bolas	Caja reductora / Disco armónico	Caja reductora / Disco armónico	Ninguno / Brazo de palanca	Engranaje
<i>Componentes</i>	Varios	Pocos	Varios	Muchos	Varios
<i>Impedancia</i>	Media	Media	Media	Baja	Alta

#### 2.2.4. Sensores

Los sensores le permiten al exoesqueleto obtener información sobre el usuario, tales como sus movimientos y la fuerza que está ejerciendo o soportando. En general, se utilizan varios sensores para un sistema de este tipo, por lo que se mencionarán los más comunes.

- Giroscopio: Mide la velocidad angular. Usualmente en 3 ejes coordenados.
- Acelerómetro: Mide la aceleración. Usualmente en 3 ejes coordenados.
- Codificador óptico: Utiliza un disco con ranuras y, al pasar la luz por una de estas, se genera un pulso. Puede ser rotacional (incremental o absoluto) o lineal.
- Celda de carga: Transductor que convierte la fuerza ejercida sobre este a una señal eléctrica.
- IMU: Contiene un giroscopio y un acelerómetro. A veces también utiliza un magnetómetro.
- EMG: Lee los impulsos enviados por el sistema nervioso a los músculos y los convierte en señales eléctricas.
- Potenciómetro: Se puede utilizar para conocer el ángulo (rotacional) o el desplazamiento (lineal) al medir el valor de la resistencia variable.

<sup>11</sup> ESEA: Electric Series Elastic Actuator.

<sup>12</sup> RSEA: Rotary Series Elastic Actuator.

<sup>13</sup> CSEA: Clutchable Series Elastic Actuator.

<sup>14</sup> HSEA: Hydraulic Series Elastic Actuator.

<sup>15</sup> CPEA: Clutched Parallel Elastic Actuator.

### 2.2.5. Estructura

La estructura de un exoesqueleto, además de mantener todos los componentes en sus respectivos lugares, es el medio entre el efector, el usuario y el entorno, por lo que es la encargada de soportar y transmitir las fuerzas. Debido a esto, la estructura debe de ser resistente, pero también ergonómica y ligera, con el fin de no ser una carga para el usuario y no causar incomodidad. Con esto en mente, las estructuras suelen estar hechas de aluminio, con ciertas partes hechas de plástico o incluso caucho (como las suelas), además de utilizar elementos flexibles para sujetarse al cuerpo del usuario.

### 2.2.6. Energía eléctrica

La energía eléctrica es fundamental en un exoesqueleto activo, puesto que no podría cumplir su función sin esta. Así, se tienen exoesqueletos que utilizan una fuente fija, mientras otros utilizan baterías como fuente portátil. Estas suelen ser de Polímero de Litio (LiPo), por su alta capacidad para almacenar energía y descargarla rápidamente, además de ser ligeras. Sin embargo, estas baterías pueden representar un grave peligro para los usuarios si no se usan adecuadamente y con la debida precaución.

En vista de esto, otra opción serían las baterías de Litio-Ferro Fosfato (LiFePO<sub>4</sub>), las cuales no presentan los mismos beneficios que las LiPo en cuanto a energía, pero ofrecen mayor seguridad y una mayor durabilidad. En la Tabla 2.4 se pueden observar algunas características de ambas baterías.

Tabla 2.4: Comparación entre tipos de baterías

<i>Batería</i>	<i>LiPo</i>	<i>LiFePO<sub>4</sub></i>
<i>Voltaje nominal (v)</i>	3.7	3.2
<i>Rango de operación (v)</i>	4.2 – 2.7	3.6 – 2.5
<i>Número de ciclos de carga</i>	300 – 500	2000 <
<i>Capacidad energética</i>	Muy alto	Moderado
<i>Ratio de descarga</i>	Muy alto	Alto
<i>Peso</i>	Ligero	Ligero - Moderado
<i>Costo</i>	Medio - Alto	Alto
<i>Durabilidad</i>	Moderado	Alta
<i>Seguridad</i>	Baja - Media	Alta

Por otro lado, resulta importante conocer la carga de la batería, tanto para conservar en buen estado la batería como para prevenir que el dispositivo deje de funcionar sin un aviso previo, además de saber cuándo este debe ser cargado. De esta manera, para conocer la carga se puede medir el voltaje en la batería mediante un divisor resistivo (mediante un controlador con ADC) o utilizando algún módulo diseñado con este propósito. Así mismo, para indicar el nivel de carga, se pueden emplear tanto medios visuales como auditivos, aunque estos últimos se suelen utilizar para indicar que la batería está por agotarse.



## CAPÍTULO 3

### DISEÑO CONCEPTUAL

En el presente capítulo se expondrán las consideraciones necesarias para el diseño del exoesqueleto. Luego, se desarrollará la estructura de funciones y las matrices morfológicas por dominio, con lo que se elaborarán las alternativas de solución, las cuales serán sometidas a una evaluación técnico-económica. Finalmente, la alternativa de solución que tenga el mejor resultado será elegida para el desarrollo del diseño preliminar del dispositivo.

#### 3.1. Requerimientos

Los requerimientos del dispositivo se basan en las necesidades del usuario y los parámetros estándar respecto a la tarea que el dispositivo debe realizar.

##### 3.1.1. Necesidades del usuario

El usuario requiere de un exoesqueleto que reduzca, tanto la fuerza de impacto como la fuerza que debe ejercer la rodilla durante el tiempo que el pie está en contacto con el suelo, pero sin que este interfiera negativamente con el movimiento natural del miembro inferior durante todo el ciclo de marcha, con el fin de que no entorpezca el movimiento.

Otro aspecto a tener en cuenta, es el aspecto económico del usuario. Debido a que el Perú es un país en vías de desarrollo, no todos sus habitantes disponen de dinero suficiente como para invertir en equipos con un alto precio, incluso si estos son beneficiosos para su salud. Por lo cual, es indispensable mantener el precio de fabricación del exoesqueleto al mínimo. Por otro lado, el exoesqueleto no debe de provocar daños al usuario o alterar la marcha del mismo, pues podría resultar en un efecto adverso. Al mismo tiempo, su uso prolongado no

debe provocar incomodidad en el usuario, por lo que necesita que el exoesqueleto se adecue a las dimensiones de sus extremidades inferiores de manera precisa. Adicionalmente, debe ser capaz de utilizar el exoesqueleto en exteriores, donde realizará la actividad.

Por último, la masa distal debe ser mínima para que el usuario no realice un esfuerzo extra al moverse, puesto que, a mayor distancia del centro de masa y mayor peso, el costo metabólico para mover el miembro en el que se encuentra la masa aumenta. De esta manera, mover una masa de 1 kg en el pie equivale a mover una masa de 5 kg a la altura de la cadera (Figura 3.1).

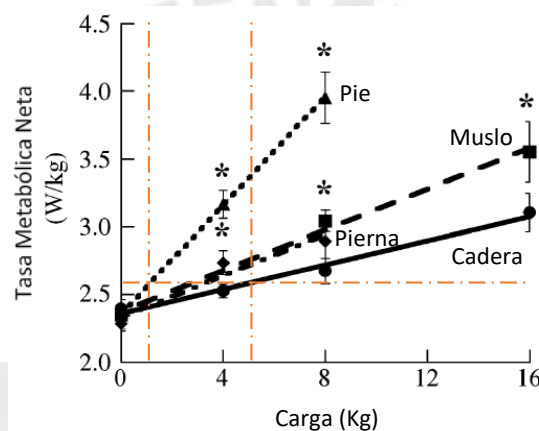


Figura 3.1: Tasa del costo metabólico vs la carga que se encuentra en cada parte del miembro inferior. Recuperado y modificado de [Browning, 2007].

### 3.1.2. Parámetros estándar al correr

En la última carrera Lima42K, las velocidades promedio de los corredores peruanos fueron los siguientes para las carreras de 42K, 21K y 10K:  $4.97 \text{ m/s}$ ,  $5.37 \text{ m/s}$ ,  $5.35 \text{ m/s}$ , respectivamente<sup>16</sup>. Dado que  $5.37 \text{ m/s}$  representa la mayor velocidad, los valores de velocidad angular y momento se basarán en esta. Por otro lado, existe una relación entre las magnitudes involucradas al momento de correr, por lo tanto, el cambio en una de estas influye en las otras. De esta forma, se puede observar como un incremento en la velocidad del corredor, significa un incremento en la velocidad angular de la rodilla, así como en el momento generado por la misma.

En la Figura 3.2, se puede observar la relación entre la velocidad del corredor y la velocidad angular de su rodilla. Conociendo la ecuación de la curva, es posible estimar la velocidad

<sup>16</sup> Running4Peru. Maratón Life Lima42K El Rojo Vivo invadió Lima Running 4 Peru. Enlace: <https://www.running4peru.com/actualidad/maratón-life-lima42k-el-rojo-vivo-invadió-lima-30759>

angular, la cual, para una persona corriendo a una velocidad de  $5.37 \text{ m/s}$ , tiene un valor de  $13.88 \text{ rad/s}$  (aproximadamente  $796 \text{ }^\circ/\text{s}$ ).

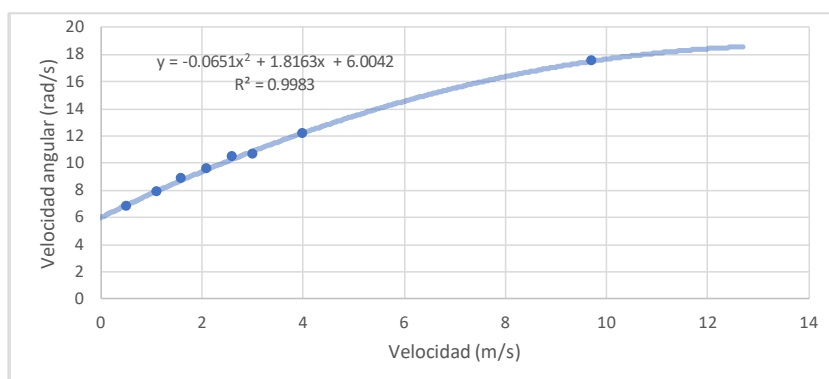


Figura 3.2: Velocidad angular en la extensión vs Velocidad del corredor. Realizada a partir de la información en [Grimmer, 2014] y [Zhong, 2017].

Por otro lado, en la Figura 3.3 se puede observar la relación entre la velocidad del corredor y el momento generado por la rodilla. Así como con la velocidad angular, al conocer la ecuación que relaciona ambas magnitudes, se puede estimar el momento generado, el cual, para una persona corriendo a  $5.37 \text{ m/s}$ , tiene un valor de  $2.8 \text{ Nm/kg}$ . Es importante notar que, a diferencia de la velocidad angular, el momento generado depende de la masa de la persona, por lo que se expresa con las unidades de  $\text{Nm/kg}$  (Newton-metro por kilogramo).

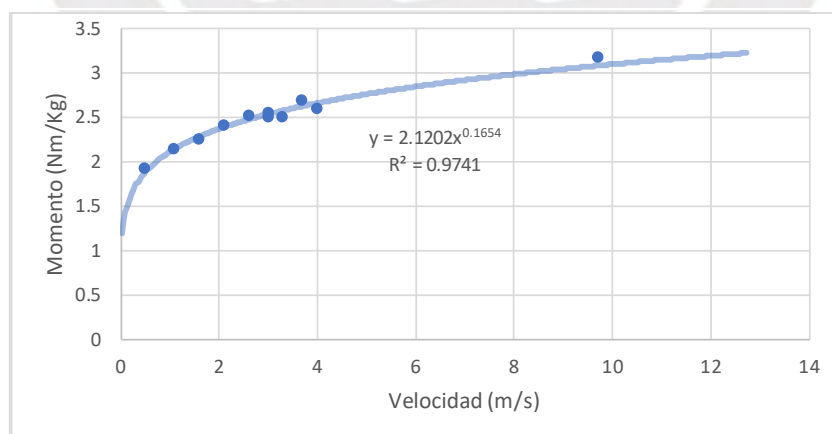


Figura 3.3: Momento (normalizado) vs Velocidad del corredor. Realizada a partir de la información en [Grimmer, 2014], [Orendurff, 2018], [Zhong, 2017].

### 3.1.3. Requerimientos del dispositivo

#### ***Función principal***

En primer lugar, es importante mencionar que el dispositivo estará dirigido a personas con patologías en la rodilla y a aquellas propensas a sufrirlas, por lo que deberá reducir tanto la fuerza del impacto como la fuerza ejercida por la rodilla. Así, dado que el dispositivo proporciona asistencia y protección al usuario, es pertinente que este se utilice en ambas piernas para evitar que la marcha se distorsione al momento de correr. Por último, el usuario no debe sentir que está utilizando el dispositivo, por lo que este debe seguir los movimientos del usuario de manera precisa y asistirlo en todo momento durante la marcha.

#### ***Ergonomía***

De esta manera, se debe tener especial consideración en la ergonomía del dispositivo. Por lo cual, es necesario utilizar componentes de fijación flexibles para que sea capaz de adaptarse a la morfología de los miembros inferiores de cada usuario, así como un diseño adecuado para que el exoesqueleto este correctamente sujetado en todo momento. Además, se debe tener en cuenta la masa distal, procurando que las partes más pesadas estén cerca al CM para prevenir que el costo metabólico de mover el miembro inferior aumente excesivamente, por lo que se considerarán los pesos máximos en relación a ciertas partes del mismo. Con esto en mente, y teniendo como guía al gráfico de la Figura 2.1 y los exoesqueletos revisados antes, la masa distribuida a lo largo del miembro inferior no debe superar 1.4 kg, mientras que, de la cadera para arriba, la masa deberá ser menor a 2 kg.

#### ***Geometría, fabricación y material***

Luego, si bien se tienen ciertos límites en cuanto a la distribución de la masa del exoesqueleto (indicados en el párrafo anterior), es necesario mencionar que lo ideal es que este sea tan ligero como sea posible. Por esta razón, se debe utilizar la menor cantidad de componentes posible y una estructura optimizada, la cual deberá también soportar las fuerzas ejercidas sobre esta. Por este motivo, la estructura tendrá un diseño personalizado, de tal manera que no necesite partes móviles para adaptarse a la altura del usuario, sino que será especialmente fabricada para este. Así mismo, debido a que la optimización de estructuras suele producir una geometría compleja resulta necesario recurrir a métodos de manufactura aditiva o de fundición (según sea necesario), puesto que el maquinado de estas piezas sería demasiado complejo. Por lo tanto, para poder personalizar la estructura, se utilizará un software CAD que permita editar el modelo en base a las dimensiones del miembro inferior del usuario para luego ser fabricado mediante el método de manufactura que mejor satisfaga los requerimientos de la pieza.



### **Velocidad angular y rango**

En cuanto a la velocidad con la que debe funcionar el exoesqueleto, se tendrá una velocidad angular mínima de  $14 \text{ rad/s}$  ( $\sim 802 \text{ }^\circ/\text{s}$ ) dado que la velocidad máxima a la que se desplaza el corredor es de  $5.37 \text{ m/s}$ . Por otro lado, el rango de movimiento del exoesqueleto debe comprender el movimiento completo de la rodilla, siendo este de 0 a 140 grados.

### **Fuerzas (Momento)**

Otro aspecto importante a tomar en cuenta son las fuerzas que serán ejercidas sobre el exoesqueleto. Por lo tanto, si se sabe que el peso promedio de peruanos y peruanas es 71.3 kg y 63.4 kg, respectivamente<sup>17</sup>, se puede fijar el peso máximo del usuario en 85 kg para que el dispositivo pueda ser utilizado por un amplio número de personas. De esta manera, para el caso crítico de un usuario con una masa de 85 kg, la articulación de la rodilla soporta un momento de 238 Nm si este se desplaza a una velocidad de  $5.37 \text{ m/s}$ . Entonces, teniendo en cuenta que se trata de un dispositivo de asistencia, se procurará que este soporte el 30% del momento que debe soportar la rodilla, mientras que esta soportará el resto. Así, tomando este porcentaje en cuenta, el momento máximo que deberá soportar el exoesqueleto será de 72 Nm. Es importante resaltar que este porcentaje de asistencia ha sido probado antes con resultados favorables para los usuarios de otro exoesqueleto (ver Anexo B para más información).

### **Energía**

Una parte vital de todo exoesqueleto activo es la energía. Por esto, se deben tener en cuenta varios aspectos del dispositivo al seleccionar la fuente a utilizar, así como las ventajas y desventajas de la misma. De esta manera, dado que el dispositivo a diseñar debe ser portátil y tan ligero como sea posible, la elección se reduce a dos tipos de baterías: LiPo y LiFePO4. Ahora, si bien la elección de la batería se realizará posteriormente (cuando se establezcan otros parámetros del dispositivo), se espera poder energizarlo por al menos una hora. Cabe mencionar que se eligió esta cantidad de tiempo porque, según los datos estadísticos de Strava<sup>18</sup> (recolectados durante el 2019), las personas suelen correr alrededor de 40 minutos.

### **Seguridad**

Algo fundamental en este tipo de dispositivos es la seguridad, puesto que una persona lo va a utilizar sobre su cuerpo. Por este motivo, debe ser completamente seguro y aprueba de fallas con el fin de asegurar el bienestar del usuario ante cualquier eventualidad. De esta

<sup>17</sup> Estatura media de hombres y mujeres en todo el mundo. Datosmundial.com s.f. Enlace: <https://www.datosmundial.com/estatura-promedio.php>.

<sup>18</sup> 2019 Year In Sport Data Report. Descargado de <https://blog.strava.com/press/strava-releases-2019-year-in-sport-data-report/>.

manera, el exoesqueleto tendrá topes mecánicos en los límites del rango de movimiento de la rodilla, es decir, tendrá uno para cuando el miembro inferior está completamente extendido, y otro para cuando está completamente flexionado. Así mismo, se debe asegurar la integridad de las baterías para evitar que estas derramen alguna sustancia y/o exploten. Por lo que, dependiendo de la batería a utilizar, se necesitará un cierto sistema de protección (el cual suele estar incluido con la batería), además de una carcasa que proteja tanto a este sistema como a las baterías.

### ***Montaje y mantenimiento***

Por otro lado, el tener un diseño modular beneficia al usuario al resultar en un dispositivo más sencillo de usar. Además, los componentes a utilizar deben requerir poco o nulo mantenimiento, debido a que estos serán utilizados con regularidad. De esta manera, se pretende que el sistema casi no necesite mantenimiento.

### ***Uso y material***

Así mismo, es importante proteger todos los componentes del exoesqueleto (sensores, actuadores, mecanismos, etc.), dado que este será utilizado en exteriores y estará expuesto a polvo, humedad, radiación UV y calor. Por lo tanto, debe tener un grado de protección IP54 o superior, y el material expuesto a estas condiciones debe poder resistir temperaturas de hasta 40 grados Celsius, con una resistencia a la radiación UV de por lo menos 13 en la escala del índice UV.

### ***Costo***

Finalmente, el costo resulta un aspecto importante a considerar al momento de seleccionar los componentes a utilizar dada la economía del país. Por este motivo, se tendrá como referencia al exoesqueleto llamado "Elevate"<sup>19</sup>, perteneciente a la empresa ROAM Robotics y disponible actualmente en el mercado por un precio de \$5000. Ahora, si bien es utilizado para esquiar y no para correr, es un buen referente en cuanto al costo que puede llegar a tener un exoesqueleto. Por lo que, en base a este precio, y considerando que es un precio de venta, se tendrá un costo máximo de referencia de \$3500 para la fabricación del exoesqueleto.

En la Tabla 3.1 se presenta un resumen de los principales requerimientos que el dispositivo deberá satisfacer.

---

<sup>19</sup> ROAM Elevate. Enlace: <https://www.roamrobotics.com/elevate>.

Tabla 3.1: Resumen de los requerimientos del exoesqueleto

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
<i>Función principal</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reducir tanto la fuerza del impacto como la fuerza ejercida por la rodilla.</li> <li>- No interferir con el movimiento del usuario.</li> </ul>
<i>Ergonomía</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diseño adecuado para que el exoesqueleto este correctamente sujeto al usuario en todo momento.</li> <li>- Utilizar componentes de fijación flexibles.</li> <li>- Masa distal: 1.4 kg distribuida a lo largo del miembro inferior y 2 kg por encima de la cadera como máximo.</li> </ul>
<i>Geometría</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modificable a la altura de la persona y la forma de su pierna.</li> <li>- Limitada por el volumen de impresión máximo de la impresora a utilizar.</li> </ul>
<i>Velocidad angular</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Velocidad angular mínima de <math>14 \text{ rad/s}</math> (<math>\sim 802 \text{ }^\circ/\text{s}</math>).</li> </ul>
<i>Rango</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rango completo de la rodilla: <math>0^\circ - 140^\circ</math>.</li> </ul>
<i>Momento</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Momento máximo: 72 Nm.</li> </ul>
<i>Energía</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baterías de LiPo o LiFePO4: autonomía de 1 hora como mínimo.</li> </ul>
<i>Seguridad</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizar topes mecánicos para proteger la articulación en caso de falla.</li> <li>- Garantizar la integridad de las baterías para evitar derrames de sustancias y/o explosiones.</li> </ul>
<i>Fabricación</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Principalmente impresión 3D. Algunas piezas con fundición y maquinado.</li> </ul>
<i>Montaje</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diseño modular.</li> </ul>
<i>Material</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material de la estructura: apto para impresión en 3D o fundición.</li> <li>- Ligero, pero al mismo tiempo resistente.</li> <li>- Material de componentes expuestos al ambiente: resistente al calor (más de <math>40^\circ\text{C}</math>) y la radiación UV (más de 13 en la escala del índice UV).</li> </ul>
<i>Mantenimiento</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poco. Uso de componentes que requieran poco o nulo mantenimiento.</li> </ul>
<i>Uso</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Debe poder utilizarse en exteriores (IP54 o superior).</li> </ul>
<i>Costo</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El costo de fabricación no debe superar los \$3500.</li> </ul>

### 3.2. Alternativas de solución

Se evaluarán tres estructuras de funciones y se elegirá la óptima, a partir de la cual se podrán realizar las matrices morfológicas para cada dominio con el fin de obtener las alternativas de solución de cada uno de estos. Luego, se unirán las diferentes soluciones de cada dominio para obtener varias soluciones integrales que engloben los tres dominios. Estas tres soluciones serán comparadas en base a ciertos criterios para obtener el concepto de solución óptimo. Finalmente, se propondrán tres proyectos preliminares a partir de este concepto, los cuales serán sometidos a una evaluación técnica-económica para poder elegir el mejor.

#### 3.2.1. Estructura de funciones

La estructura de funciones permite observar el camino que siguen las entradas del sistema para poder convertirse en las salidas del mismo. Además, en esta estructura, se aprecia cómo

se relacionan los dominios entre sí y cuáles son las funciones parciales que cada uno debe realizar para poder cumplir con la función principal.

En la Figura 3.4 se muestran las entradas y salidas de la solución a concebir (caja negra).

#### ***Entradas de la caja negra***

- **Usuario con dificultad para correr:** Persona que tiene una condición fisiológica en la rodilla. Antes de ponerse el exoesqueleto y correr.
- **Polvo:** Es el polvo del ambiente.
- **Humedad:** Es la humedad del ambiente.
- **Calor:** Es el calor del ambiente.
- **Radiación UV:** Radiación proveniente del sol.
- **Energía eléctrica:** Proveniente de la red eléctrica.
- **Energía mecánica (usuario):** La energía que utiliza el usuario para realizar acciones.
- **Encendido y apagado:** Señales de encendido y apagado del sistema.

#### ***Salidas de la caja negra***

- **Usuario con dificultad para correr:** Persona que tiene una condición fisiológica en la rodilla. Después de correr y quitarse el exoesqueleto.
- **Polvo:** El polvo encontrado en la parte externa del exoesqueleto.
- **Humedad:** La humedad encontrada en la parte externa del exoesqueleto.
- **Calor:** Es el calor que resulta de la energía utilizada para el accionamiento del exoesqueleto.
- **Vibraciones:** Son las pequeñas vibraciones generadas por los elementos mecánicos.
- **Ruido:** Es el ruido generado por los elementos mecánicos.
- **Luz indicadora:** Luz proveniente del indicador del nivel de carga de la batería.
- **Sonido indicador:** Sonido proveniente del indicador de batería baja.

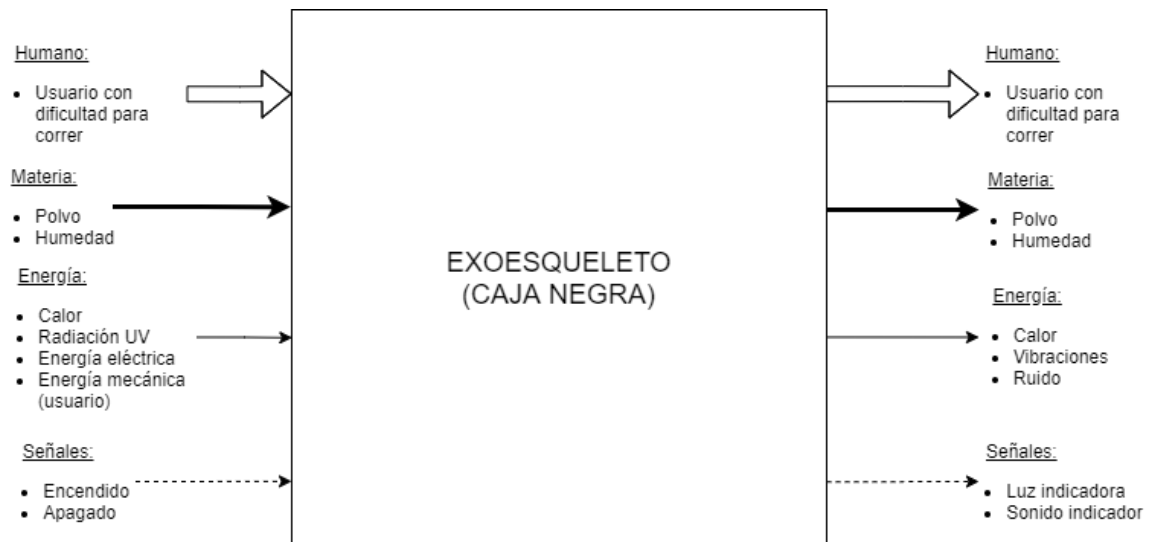


Figura 3.4: Esquema de caja negra con las entradas y salidas del sistema.

### ***Evaluación de las estructuras de funciones propuestas***

Si bien las estructuras de funciones mostradas a continuación son muy similares, presentan ciertas diferencias, las cuales serán expuestas y analizadas para elegir la estructura de funciones óptima.

De esta manera, en las estructuras de funciones 1 y 2 (Figura 3.5 y 3.6) se puede observar que, en la zona de los sensores, se mide la deflexión del resorte y la velocidad angular de la rodilla. Ahora, si bien es posible realizar estas mediciones directamente, también se pueden medir los valores indirectamente por medio de ecuaciones, tal como se realizaría en la estructura de funciones 3 (Figura 3.7). Así, en lugar de medir la deflexión del resorte, se pueden medir las posiciones relativas a los extremos de este, con lo que se puede calcular la deflexión del mismo. De la misma forma, si se mide la posición angular, se puede obtener la velocidad angular por derivación. Esto es útil pues se pueden utilizar sensores más sencillos y precisos al utilizar ecuaciones para calcular las variables deseadas. Por otro lado, en las estructuras de funciones 2 y 3, la información proporcionada por los sensores se utiliza en conjunto para identificar el instante de la marcha, mientras que en la estructura de funciones 1 no es así, lo que hace que la identificación sea menos robusta.

Por lo tanto, teniendo en consideración las características antes mencionadas de cada una de las estructuras de funciones, se considera que la estructura de funciones 3 es la óptima, por lo que esta será utilizada para realizar la matriz morfológica.

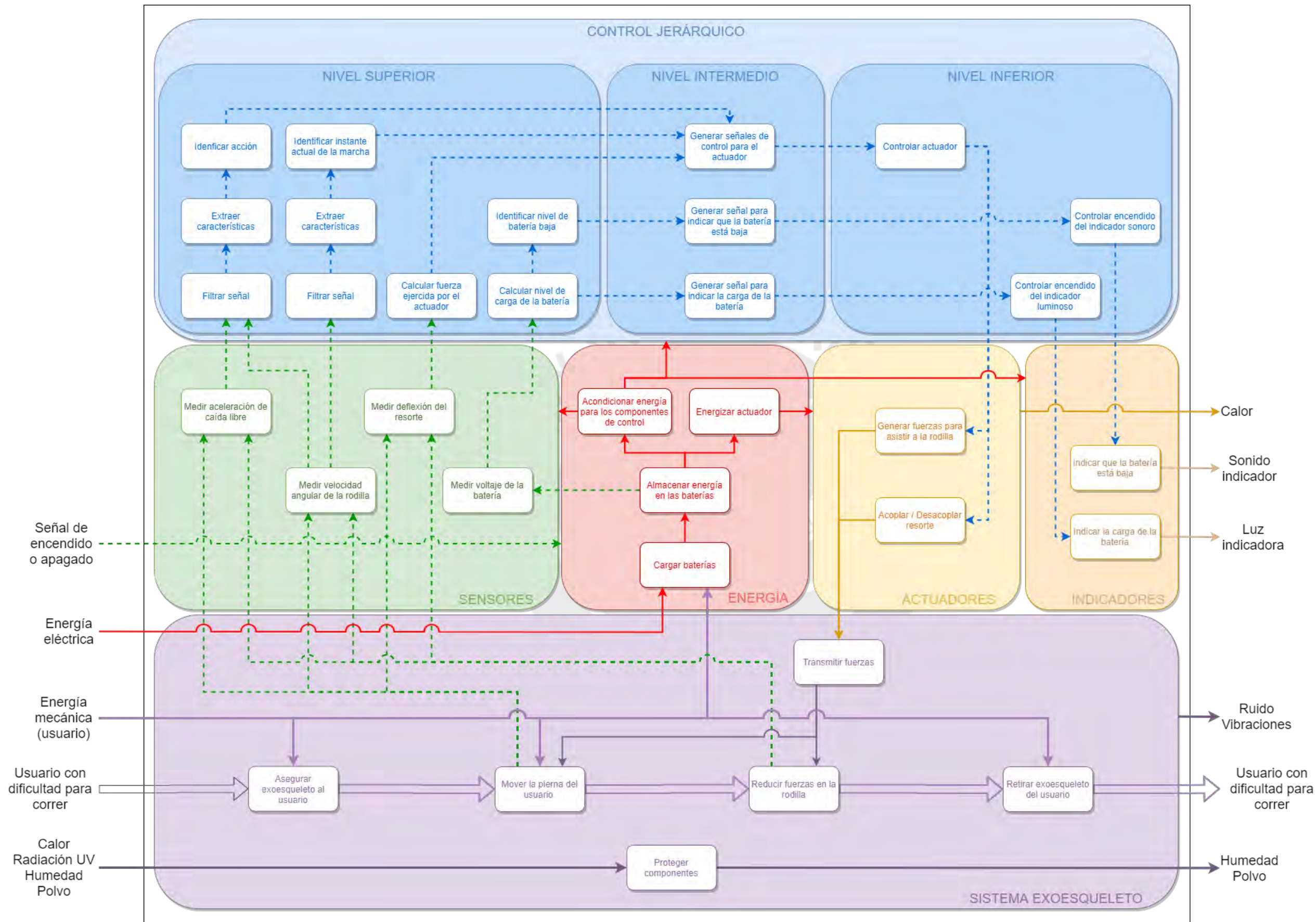


Figura 3.5: Estructura de funciones 1.

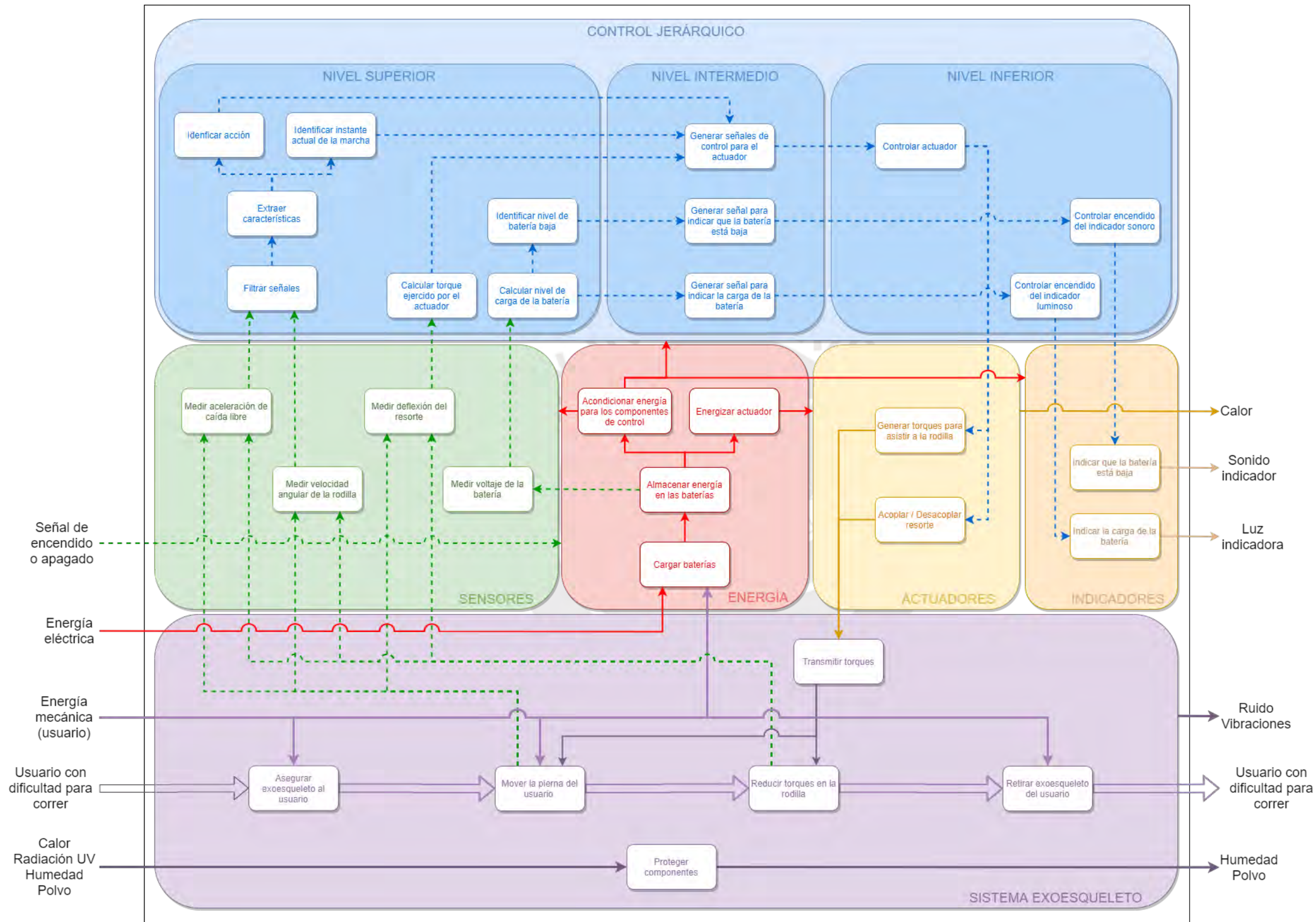


Figura 3.6: Estructura de funciones 2.

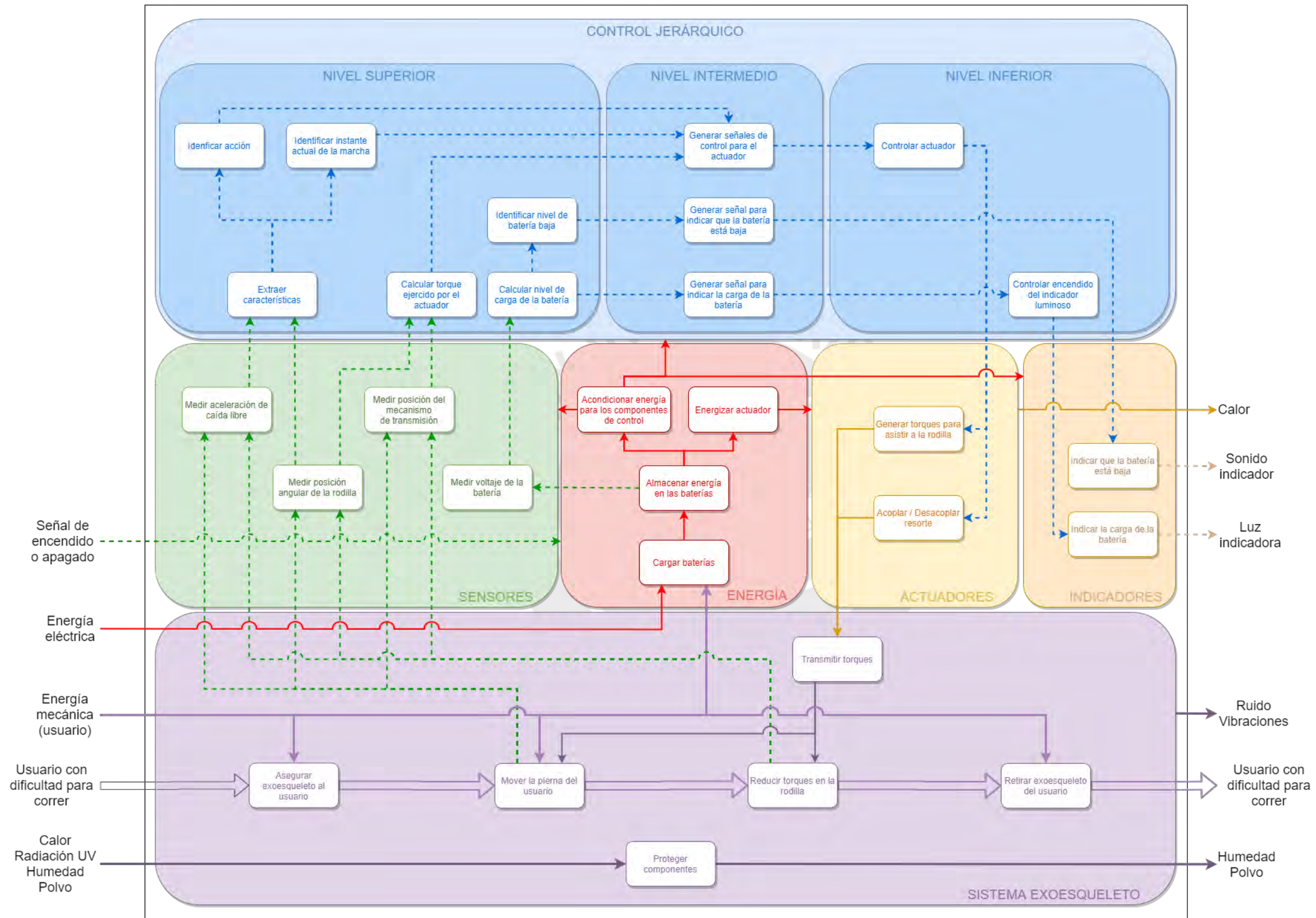


Figura 3.7: Estructura de funciones 3 (óptima).



A continuación, se explican brevemente, por dominio, las secciones y los bloques (representantes de las funciones parciales del sistema) de la estructura de funciones óptima.

### **Dominio mecánico**

En la Figura 3.8 se observan los bloques que representan a las funciones parciales de la sección del sistema exoesqueleto del dominio mecánico. La flecha de color amarillo (energía) viene de la sección de actuadores, mientras que las flechas de color verde (señales) van hacia la sección de sensores.

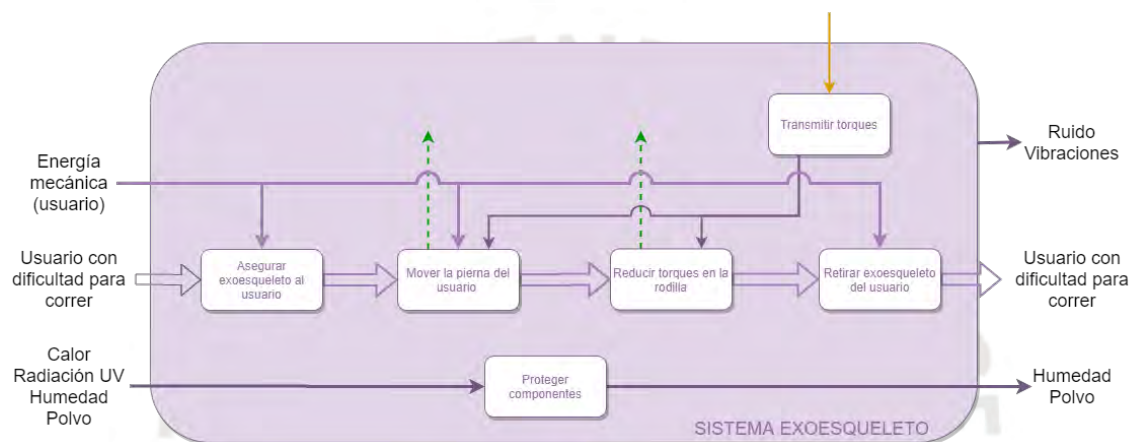


Figura 3.8: Sección: sistema exoesqueleto.

- **Asegurar exoesqueleto al usuario:** El usuario se coloca el exoesqueleto en las partes del cuerpo correspondientes y los asegura ajustando las sujeciones flexibles.
- **Mover la pierna del usuario:** El usuario mueve su pierna junto con el exoesqueleto, el cual proporciona un cierto grado de asistencia durante el movimiento (sobre todo durante la fase de oscilación).
- **Reducir torques en la rodilla:** El exoesqueleto reduce los torques que debe soportar/ejercer la articulación de la rodilla (sobre todo durante la fase de apoyo) para asistirle y, a su vez, protegerla.
- **Retirar exoesqueleto del usuario:** El usuario desajusta las sujeciones flexibles y se quita el exoesqueleto.
- **Transmitir torques:** Un mecanismo es utilizado para transmitir los torques generados por el actuador a la estructura del exoesqueleto, la cual los transmite al cuerpo del usuario.
- **Proteger componentes:** Los componentes son protegidos de las condiciones ambientales a las que está sometido el exoesqueleto.

### **Dominio eléctrico – electrónico**

En la Figura 3.9 se muestran los bloques que representan a las funciones parciales de este dominio, tanto de la sección de energía como la de actuadores. Las flechas rojas (energía), van hacia todo el dominio de control y la sección de los actuadores, mientras que la flecha verde (señal) va hacia la sección de sensores y la de color amarillo (energía) va hacia el dominio mecánico. Por último, la flecha azul (señal), viene de la sección de control jerárquico.

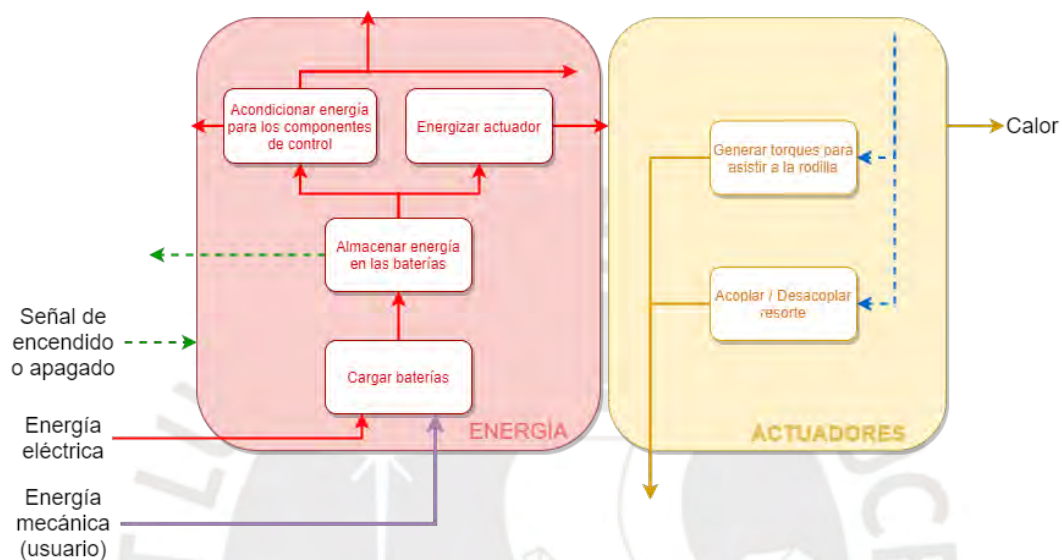


Figura 3.9: Secciones: energía y actuadores.

- **Cargar baterías:** El usuario conecta el cargador para cargar las baterías del exoesqueleto. Al completarse la carga, retira el cargador.
- **Almacenar energía en las baterías:** Las baterías cargadas almacenan la energía necesaria para energizar todos los componentes del exoesqueleto.
- **Acondicionar energía para los componentes de control:** Haciendo uso de un regulador se acondiciona el nivel de voltaje y se suministra la corriente necesaria para el correcto funcionamiento de los componentes de control.
- **Energizar actuador:** Se utilizar un controlador de velocidad para amplificar las señales de control y proporcionar la energía necesaria al actuador.
- **Generar torques para asistir a la rodilla:** Un actuador es utilizado para generar los torques necesarios dependiendo de la señal de control.
- **Acoplar/Desacoplar resorte:** Se hace uso de un mecanismo accionado electrónicamente para acoplar o desacoplar el resorte dependiendo de la señal de control.

### **Dominio de control**

En la Figura 3.10 se muestran los bloques que representan a las funciones parciales de dos secciones de este dominio: sensores e indicadores. En la sección de sensores, las flechas verdes que van hacia arriba se dirigen hacia la sección de control jerárquico, las que vienen desde abajo llegan desde la sección del sistema exoesqueleto, y la que llega por el lado corresponde a la sección de energía. Por otro lado, las flechas azules en la sección indicadores vienen desde la sección de control jerárquico.

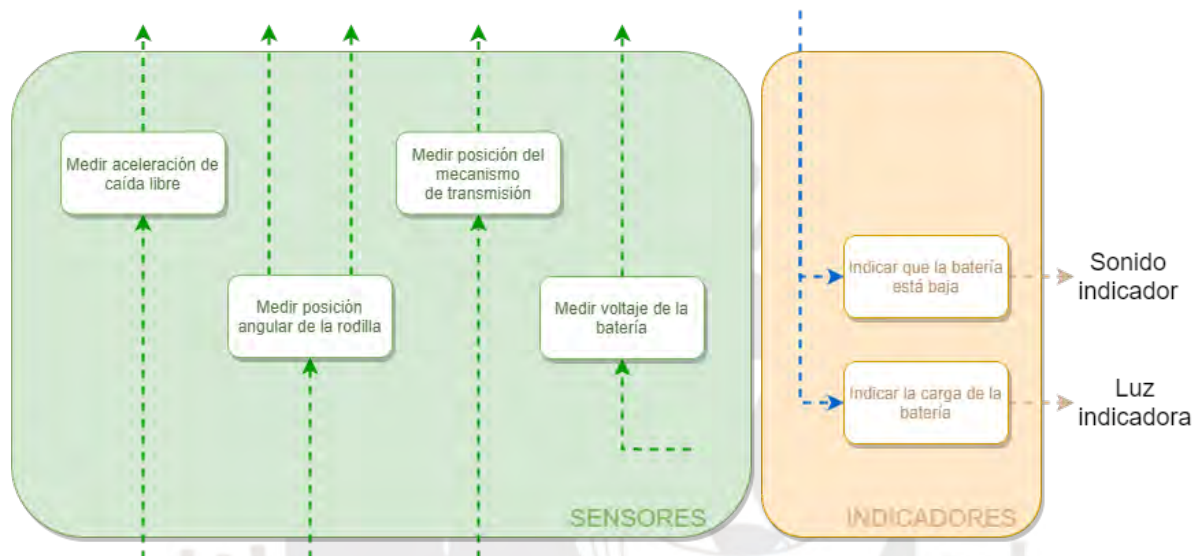


Figura 3.10: Secciones: sensores e indicadores.

- **Medir voltaje de la batería:** Se mide el voltaje de las baterías y se envía esta señal al controlador.
- **Medir posición angular de la rodilla:** Se mide la posición angular de la rodilla mediante un sensor.
- **Medir posición del mecanismo de transmisión:** Mide la posición (angular o lineal) del mecanismo usado para la transmisión haciendo uso de un sensor o un transductor.
- **Medir la aceleración de caída libre:** Se usa un sensor para conocer la aceleración en el eje en el que actúa la gravedad.
- **Indicar que la batería está baja:** Se da la alerta de que la batería está por agotarse mediante el indicador sonoro.
- **Indicar la carga de la batería:** Se indica cualitativamente el nivel de carga de la batería mediante el indicador luminoso.

En la Figura 3.11, se observa la sección de control jerárquico. En esta, las flechas verdes vienen de la sección de sensores, mientras que la flecha saliente del bloque de “Controlar actuador” va hacia la sección de actuadores, y la otra flecha azul va hacia la sección de indicadores.

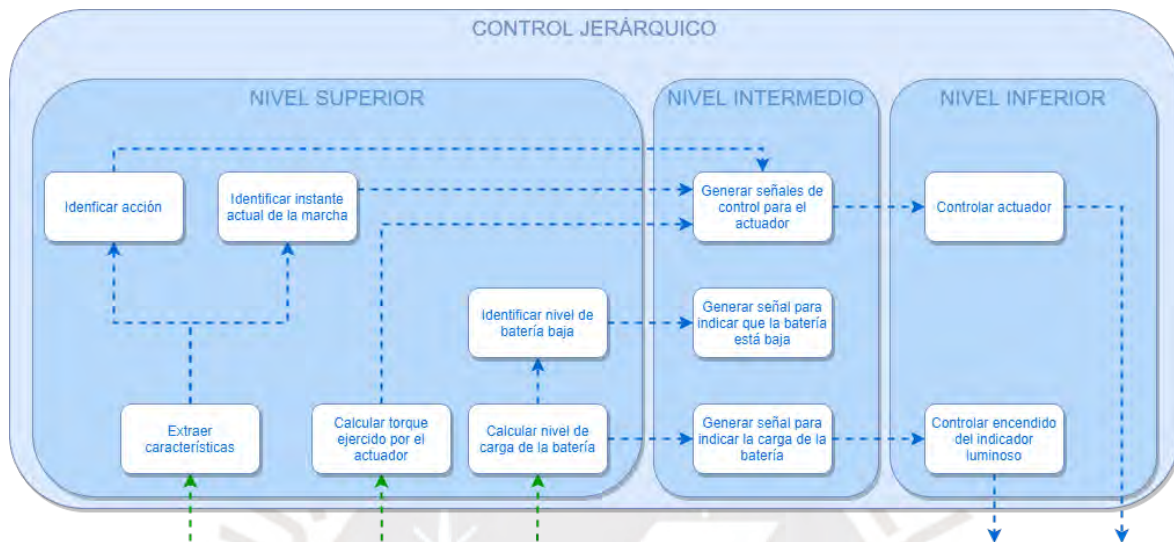


Figura 3.11: Sección: control jerárquico.

Es importante mencionar que la sección de control jerárquico, al ser una representación de la secuencia de pasos que un programa debe seguir, y no una representación de un dispositivo, será englobada por una función llamada “procesar señales”, la cual, si puede ser representada mediante un elemento físico, tal como un controlador.

- **Procesar señales:** Comprende el conjunto de funciones involucradas en el algoritmo de control utilizado. Se utiliza un dispositivo para recibir las señales de los sensores y generar las señales de control.
  - o **Extraer características:** Se extraen características representativas de los datos recibidos.
  - o **Identificar acción:** Con las características extraídas de las señales, se identifica la acción que se está realizando (caminar, correr o desacelerar).
  - o **Identificar instante de la marcha:** Se identifica el instante actual del ciclo de marcha con las características extraídas de las señales.

- **Calcular torque ejercido por el actuador:** En base a la posición de la rodilla y la posición de la transmisión, se calcula la diferencia entre estas y, con la constante del resorte, se calcula el torque ejercido por este.
- **Calcular nivel de carga de la batería:** Se discretiza el nivel de voltaje recibido mediante un conversor analógico – digital y se calcula el porcentaje de carga de la batería.
- **Identificar nivel de batería baja:** Se identifica si la batería esta por agotarse a partir del porcentaje de carga previamente calculado.
- **Generar señales de control para el actuador:** En base a la acción que se está realizando, el instante del ciclo de marcha y el torque ejercido por el actuador, se genera la señal de control para el actuador.
- **Generar señal para indicar que la batería está baja:** Se genera la señal de activación para el indicador sonoro.
- **Generar señal para indicar la carga de la batería:** Se genera la señal para el indicador luminoso en base al nivel de carga de la batería.
- **Controlar actuador:** Representa el lazo de control para el actuador.
- **Controlar encendido del indicador luminoso:** Interpretación de la señal generada para activar correctamente el indicador luminoso.

### 3.2.2. Matrices morfológicas

Partiendo de la estructura de funciones, se procede a elaborar las matrices morfológicas para cada dominio (mecánico, eléctrico – electrónico y de control). De esta manera, se tienen 3 conceptos de solución diferentes elaborados a partir de las soluciones elegidas de estas matrices.

Entonces, comenzando por el dominio mecánico (Tabla 3.2), se tienen los componentes que interactúan tanto con el entorno como con el usuario. Seguidamente, se muestran los componentes del dominio eléctrico – electrónico (Tabla 3.3), estos son aquellos utilizados para proveer de energía a todo el sistema y accionar los mecanismos. Por último, en el dominio de control (Tabla 3.4) se encuentran los componentes encargados de recopilar información del entorno, procesarla y generar señales.

A manera de resumen, se presentan las Tablas 3.5, 3.6 y 3.7, donde se pueden apreciar los componentes que estarán presentes en cada una de las alternativas de solución.

Tabla 3.2: Matriz morfológica del dominio mecánico







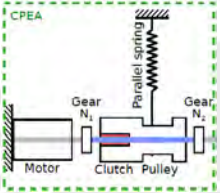
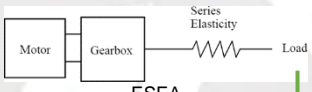
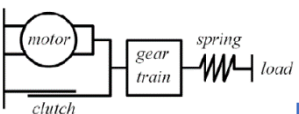
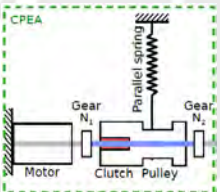
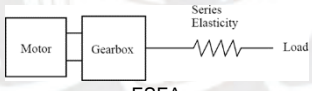
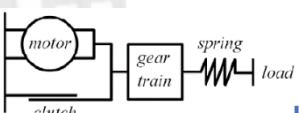



Funciones parciales	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Proteger componentes	 <p>Carcasa de plástico</p>	 <p>Canguro deportivo + Carcasa</p>	 <p>Mochila + Carcasa</p>
Asegurar / Retirar el exoesqueleto al usuario	 <p>Velcro</p>	 <p>Hebilla de clip ajustable con bloqueo</p>	 <p>Trinquete de plástico</p>
Mover la pierna del usuario	 <p>CPEA</p>	 <p>ESEA</p>	 <p>CSEA</p>
Reducir fuerzas en la rodilla	 <p>CPEA</p>	 <p>ESEA</p>	 <p>CSEA</p>
Transmitir torques	 <p>Husillo de bolas</p>	 <p>Engranajes planetarios</p>	 <p>Faja sincrónica + Caja reductora</p>
	<p>S3</p>	<p>S2</p>	<p>S4</p>

Tabla 3.3: Matriz morfológica del dominio eléctrico – electrónico










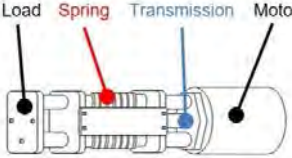
Funciones parciales	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Almacenar energía en las baterías	 <p>Batería de LiPo o LiFePO4 (circuito de protección integrado)</p>		
Acondicionar energía para los componentes de control	 <p>Regulador lineal</p>	 <p>Regulador conmutado</p>	
Energizar actuador	 <p>Controlador de velocidad electrónico de lazo abierto</p>	 <p>Controlador de velocidad electrónico de lazo cerrado</p>	
Generar torques para asistir a la rodilla	 <p>Motor DC (rotor interno) sin escobillas con sensores incluidos</p>	 <p>Motor DC (rotor externo) sin escobillas sin sensores incluidos</p>	 <p>Motor DC (rotor interno) sin escobillas sin sensores incluidos</p>
Acoplar / Desacoplar resorte	 <p>Embrague/freno electromagnético</p>	 <p>Posicionamiento de husillo de bolas</p>	
	S4	S1	S3

Tabla 3.4: Matriz morfológica del dominio de control











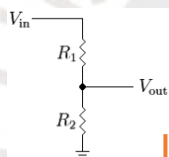
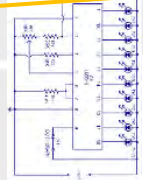






Funciones parciales	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Medir posición angular de la rodilla	 IMU	 Codificador óptico	 Giroscopio	 Codificador de anillo
Medir aceleración de caída libre	 IMU	 Acelerómetro		
Medir posición del mecanismo de transmisión	 Potenciómetro lineal	 Codificador de anillo	 Codificador óptico	 Arreglo de sensores de efecto Hall
Medir voltaje de la batería	 $\begin{matrix} V_{in} \\   \\ R_1 \\   \\ V_{out} \\   \\ R_2 \\   \\ \text{GND} \end{matrix}$ Divisor resistivo	 Circuito integrado		
Procesar y generar señales	 Microcontrolador	 Computadora de placa simple		
Indicar la carga de la batería	 LEDs	 Tira LED		
Indicar que la batería esta baja	 Buzzer	 Circuito indicador de batería baja		
	S1 ↓	S4 ↓ S2 ↓	S3 ↓	



Tabla 3.5: Conceptos de solución del dominio mecánicos

Funciones parciales	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Proteger componentes	Mochila + carcasa	Mochila + carcasa	Canguro deportivo + carcasa
Asegurar / Retirar el exoesqueleto al usuario	Hebilla de clip ajustable con bloqueo	Hebilla de clip ajustable con bloqueo	Trinquete de plástico
Mover la pierna del usuario	CSEA	CSEA	ESEA
Reducir fuerzas en la rodilla	CSEA	CSEA	ESEA
Transmitir torques	Faja sincrónica + Caja reductora	Arreglo de engranajes planetarios	Husillo de bolas

Tabla 3.6: Conceptos de solución del dominio eléctrico – electrónico

Funciones parciales	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Almacenar energía en las baterías	Batería de LiPo o LiFePO4 (circuito de protección integrado)	Batería de LiPo o LiFePO4 (circuito de protección integrado)	Batería de LiPo o LiFePO4 (circuito de protección integrado)
Acondicionar energía para los componentes de control	Regulador conmutado	Regulador conmutado	Regulador conmutado
Energizar actuador	Controlador de velocidad electrónico de lazo cerrado	Controlador de velocidad electrónico de lazo abierto	Controlador de velocidad electrónico de lazo cerrado
Generar torques para asistir a la rodilla	Motor DC (rotor interno) sin escobillas con sensores incluidos	Motor DC (rotor externo) sin escobillas sin sensores incluidos	Motor DC (rotor interno) sin escobillas con sensores incluidos
Acoplar / Desacoplar resorte	Embrague/freno electromagnético	Embrague/freno electromagnético	Posicionamiento de husillo de bolas

Tabla 3.7: Conceptos de solución del dominio de control

Funciones parciales	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Medir posición angular de la rodilla	IMU	Codificador de anillo	IMU
Medir aceleración de caída libre	IMU	Acelerómetro	IMU
Medir posición del mecanismo de transmisión	Codificador de anillo	Arreglo de sensores de efecto Hall	Potenciómetro lineal
Medir voltaje de la batería	Divisor resistivo	Divisor resistivo	Divisor resistivo
Procesar y generar señales	Microcontrolador	Microcontrolador	Microcontrolador
Indicar la carga de la batería	Tira LED	Tira LED	LEDs
Indicar que la batería esta baja	Buzzer	Buzzer	Buzzer

### 3.2.3. Conceptos de solución integrados

#### Primer concepto

El primer concepto de solución consiste en utilizar una faja sincrónica para transmitir el torque generado por el motor al eje en el que se encuentra el resorte torsional (por medio de la caja reductora), y así reducir la masa distal debido al peso del motor, posicionándolo cerca de la cadera. El embrague se posiciona antes de la caja reductora, de tal manera que la fuerza requerida para sujetar al eje (permitiendo que el resorte se deforme) sea considerablemente menor gracias a esta. Es importante mencionar que el resorte de torsión es un disco cuyo interior tiene una geometría particular, la cual le permite deformarse como si fuera un resorte. Por otro lado, se tiene una mochila donde se encuentran varios componentes de control junto con las baterías, además de llevar los indicadores en el asa de la mochila, donde el usuario puede percibirlos. Esto se puede apreciar en la Figura 3.12.

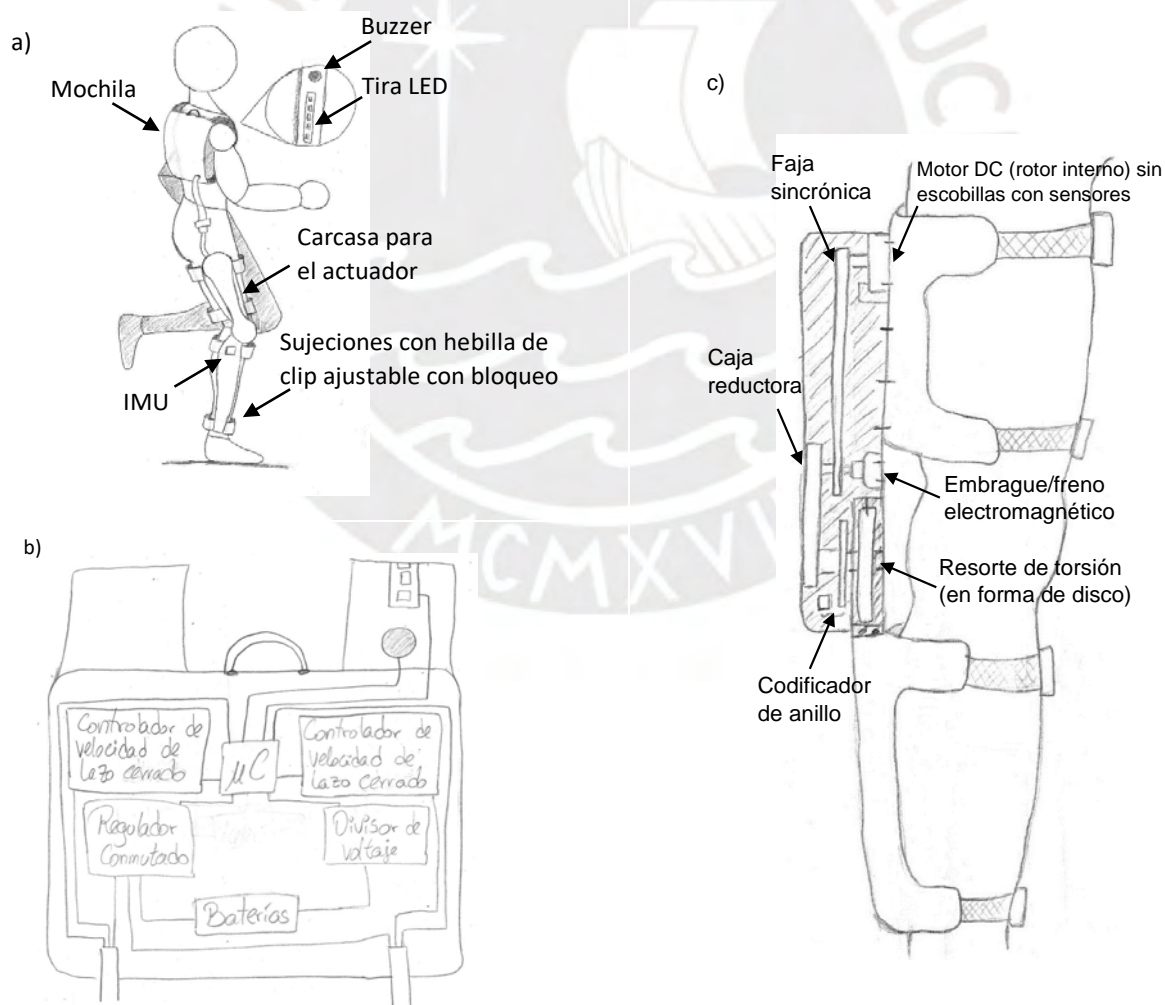


Figura 3.12: a) Vista lateral. b) Detalle del interior de la mochila. c) Detalle del interior de la carcasa.

### Segundo concepto

En el segundo concepto de solución se utilizan engranajes planetarios con el motor de rotor externo insertado en el engranaje solar, eliminando la necesidad de utilizar acoples y rodamientos. Con esto, se reduce la cantidad de componentes a utilizar, por lo que se puede tener un diseño compacto a la altura de la rodilla. Al igual que en la primera alternativa, el eje que sostiene el embrague se sitúa antes de la transmisión y se usan codificadores de anillo para aprovechar el espacio y medir la posición de la pierna y del motor, con lo que se calcula la deflexión del resorte de torsión en forma de disco. Así mismo, se tiene una mochila donde se encuentran los mismos componentes que en la primera alternativa, con la adición de un acelerómetro y la diferencia que el controlador de velocidad es de lazo abierto en este caso. Todo esto se puede observar en la Figura 3.13.

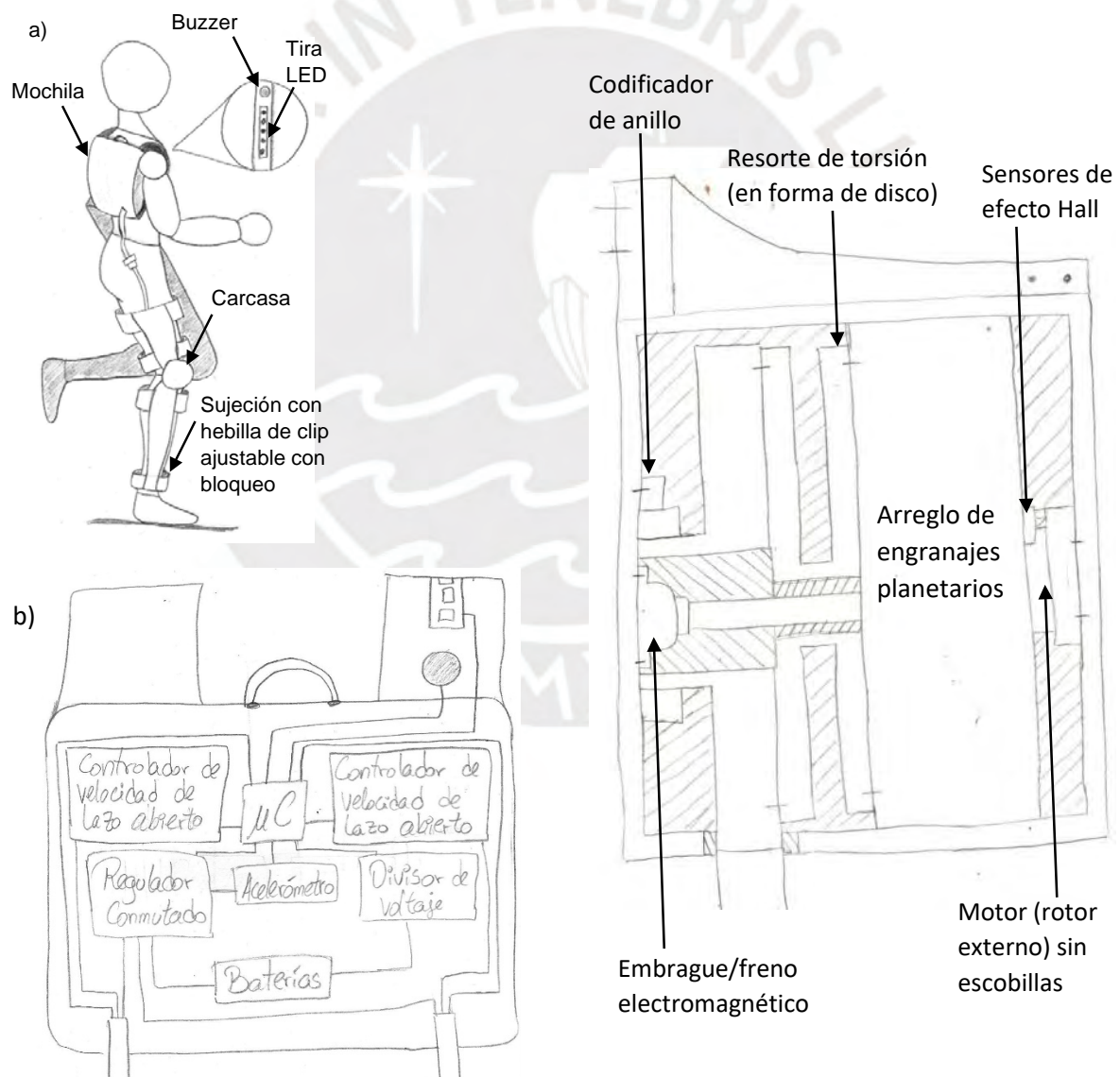


Figura 3.13: a) Vista lateral. b) Detalle del interior de la mochila. c) Detalle del interior de la carcasa.

### Tercer concepto

En el tercer concepto de solución se hace uso de un mecanismo de husillo de bolas accionado por un motor. De esta manera, al girar el motor, gira el eje roscado, haciendo que el husillo de bolas se mueva en un sentido u otro dependiendo de la dirección del giro. En esta alternativa, se utilizan resortes de compresión, los cuales se posicionan a lo largo del eje roscado y se mantienen en su lugar gracias al husillo de bolas, permitiendo que estos se deformen y almacenen energía. El potenciómetro lineal se utiliza para medir la deflexión de los resortes y conocer el sentido y la magnitud de la fuerza que la ocasiona. Por otro lado, se tiene un canguro deportivo, donde se encuentran varios componentes de control junto con las baterías. Además, se tienen sujeciones con un mecanismo de trinquete para sujetar firmemente el exoesqueleto al cuerpo del usuario. En la Figura 3.14 se pueden observar los componentes antes mencionados.

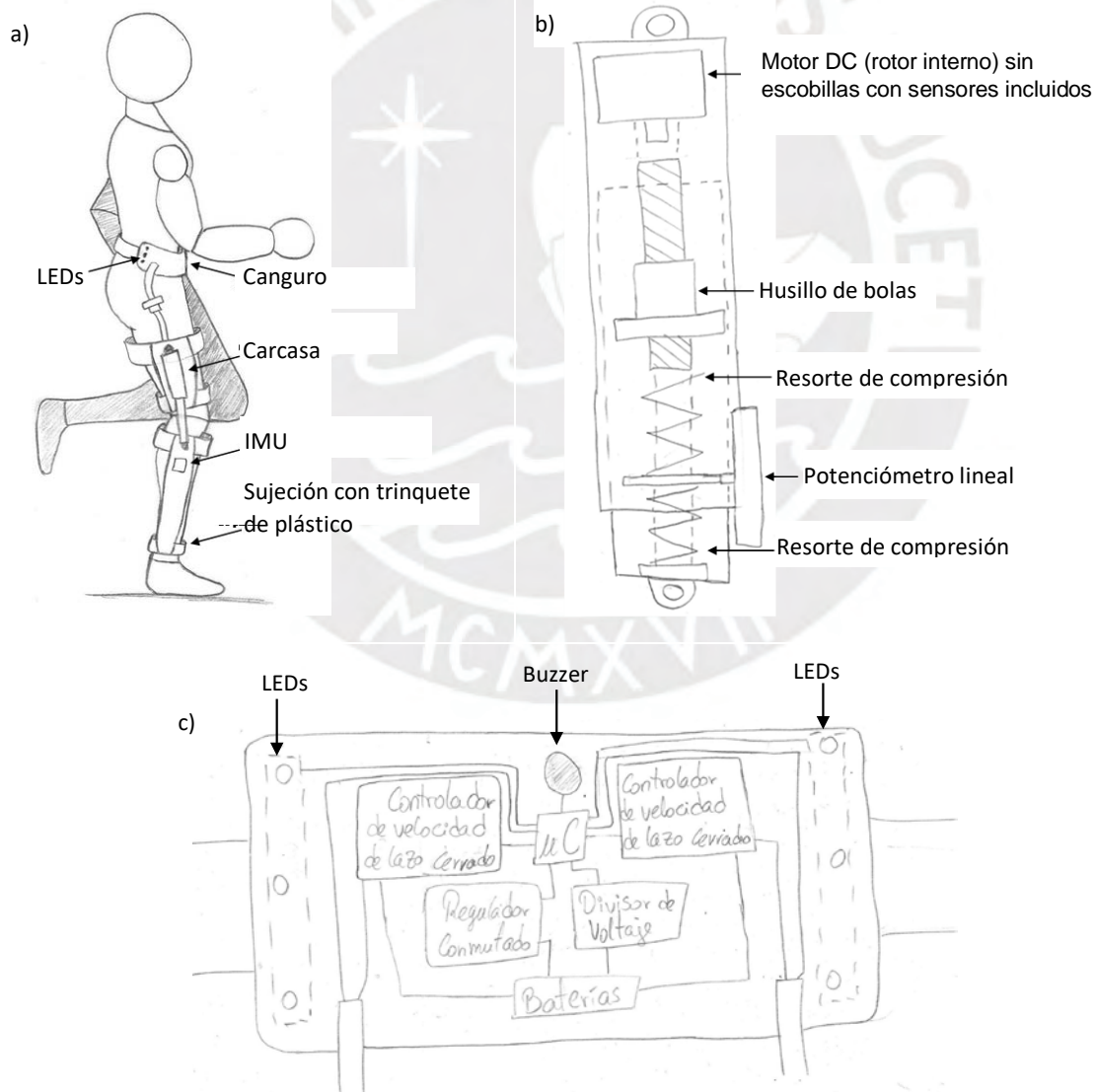


Figura 3.14: a) Vista lateral. b) Detalle del interior de la carcasa. c) Detalle del interior del canguro.

### 3.2.4. Concepto de solución óptimo

Los conceptos de solución mencionados anteriormente serán evaluados a partir de ciertos criterios técnicos y económicos (según la norma VDI 2221) y comparados en base al puntaje total que reciban. Los puntajes a asignar para cada criterio se pueden observar en la Tabla 3.8. Por otro lado, las justificaciones para la asignación de los puntajes para los criterios del aspecto técnico y del aspecto económico se encuentran en las Tablas 3.9 y 3.10, respectivamente. Por último, se presenta un resumen de los puntajes asignados a los conceptos para cada criterio del aspecto técnico en la Tabla 3.11 y del aspecto económico en la Tabla 3.12, así como el total de la suma de estos puntajes.

Tabla 3.8: Leyenda de puntajes de la evaluación técnico-económica – Concepto Solución

P: Puntaje de satisfacción	
4	Muy bien (solución ideal)
3	Bien
2	Suficiente
1	Aceptable a las justas
0	No satisface

#### Aspecto técnico:

- Masa distal: Se comparará la masa en función de su ubicación respecto del centro de masa del usuario.
- Uso (en exteriores): Se evaluará la capacidad del sistema para ser utilizado en exteriores y soportar las condiciones ambientales.
- Facilidad de colocación: Se tendrá en cuenta la facilidad que tiene el usuario para manipular el exoesqueleto y colocarlo correctamente al momento de ponérselo.
- Mantenimiento: Se evaluará principalmente la periodicidad de este.
- Eficiencia: Se comparará la eficiencia energética (estimada) de los sistemas.
- Tamaño: Se tomará en cuenta el volumen del exoesqueleto.
- Rapidez: Se comparará la rapidez estimada con la que actúan los dispositivos.

#### Aspecto económico:

- Costo de fabricación: Se considerarán los elementos que deban ser fabricados y los procesos de producción que estén involucrados.

- Cantidad de componentes: Se comparará la cantidad de elementos principales que requiere el exoesqueleto para funcionar.
- Costo de la tecnología: Se evaluarán los costos de los componentes que serán adquiridos.
- Facilidad de montaje: Se tendrá en cuenta la facilidad para poder ensamblar las partes del exoesqueleto.

Tabla 3.9: Justificación del puntaje asignado por criterio técnico – Concepto Solución

<b>Criterio</b>	<b>Solución</b>	<b>P</b>	<b>Justificación</b>
Masa distal	Solución 1	3	Distribuye la masa sobre el muslo, llevando una buena parte de esta cerca al centro de masa del usuario.
	Solución 2	2	Concentra la masa alrededor de la rodilla, alejada del centro de masa del usuario.
	Solución 3	2	
Uso (en exteriores)	Solución 1	3	Los 3 diseños utilizan carcasas que aseguran su protección antes las condiciones ambientales.
	Solución 2	3	
	Solución 3	3	
Facilidad de colocación	Solución 1	2	Su tamaño puede dificultar su colocación.
	Solución 2	3	Su forma y tamaño facilitan su colocación.
	Solución 3	2	Su forma puede dificultar su colocación.
Mantenimiento	Solución 1	2	La faja sincrónica puede desgastarse por el uso y la velocidad a la que debe ser accionada, mientras que la caja de engranajes rectos es susceptible al desgaste ante las grandes cargas.
	Solución 2	3	El Gear Bearing Drive es más resistente al desgaste cuando se refiere a soportar cargas debido a la configuración de engranajes planetarios.
	Solución 3	2	El mecanismo de husillo de bolas puede desgastarse al soportar grandes cargas de empuje. El eje roscado sería el elemento más crítico antes esto.
Eficiencia	Solución 1	2	Juntando la faja sincrónica y la caja reductora, la eficiencia está entre 85% y 90%.
	Solución 2	3	El mecanismo de transmisión que utiliza tiene una eficiencia de entre 90% y 95%.
	Solución 3	2	La eficiencia del husillo de bolas puede llegar a ser de hasta 90%.
Tamaño	Solución 1	2	Actuador prácticamente del tamaño del muslo.
	Solución 2	3	Actuador de menos de la mitad del tamaño del muslo.
	Solución 3	3	
Rapidez	Solución 1	3	Velocidad máxima: Hasta 60 m/s. Limitada por la faja sincrónica.
	Solución 2	3	Velocidad máxima: Hasta 200 m/s. Limitada por los engranajes.
	Solución 3	2	Velocidad máxima: 3.3 m/s. Limitada por el mecanismo de husillo de bolas.

Tabla 3.10: Justificación del puntaje asignado por criterio económico – Concepto Solución

<b>Criterio</b>	<b>Solución</b>	<b>P</b>	<b>Justificación</b>
Costo de fabricación	Solución 1	2	Se debe fabricar el resorte de torsión (mecanizado), dos ejes (torneado), la estructura (impresión 3D o fundición) y la carcasa (impresión 3D).
	Solución 2	2	Se debe fabricar el resorte de torsión (mecanizado), el Gear Bearing Drive (impresión 3D) la estructura (impresión 3D o fundición) y la carcasa (impresión 3D).
	Solución 3	3	Se debe fabricar la estructura (impresión 3D o fundición) y la carcasa (impresión 3D).
Cantidad de componentes	Solución 1	2	Requiere de 17 componentes principales para funcionar.
	Solución 2	3	Requiere solo 15 componentes principales para funcionar.
	Solución 3	3	Requiere 16 componentes principales para funcionar.
Costo de la tecnología	Solución 1	2	El motor con sensores incluidos tiene un precio considerable, al igual que la caja reductora (juntos alrededor de \$385). El resto de componentes presentan un precio bastante menor.
	Solución 2	3	El codificador de anillo y los sensores de efecto Hall, junto con el motor sin sensores cuestan alrededor de \$180. El resto de componentes presentan precios menores.
	Solución 3	2	El motor con sensores incluidos tiene un precio considerable al igual que el mecanismo de husillo de bolas (juntos alrededor de \$300). El resto de componentes presentan un menor precio.
Facilidad de montaje	Solución 1	1	Debido a los componentes que utiliza y la forma en la que están ubicados, el montaje puede resultar complicado.
	Solución 2	2	Debido a que son diseños compactos, el montaje de los componentes es un poco complejo.
	Solución 3	2	

Tabla 3.11: Resumen de la evaluación técnica – Concepto Solución

<b>Nro.</b>	<b>Criterios de evaluación</b>	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>	<b>Sol. ideal</b>
1	Masa distal	3	2	2	4
2	Uso (en exteriores)	3	3	3	4
3	Facilidad de colocación	2	3	2	4
4	Mantenimiento	2	3	2	4
5	Eficiencia	2	3	2	4
6	Tamaño	2	3	3	4
7	Rapidez	3	3	2	4
<b>Total</b>		17	20	16	28

Tabla 3.12: Resumen de la evaluación económica – Concepto Solución

<b>Nro.</b>	<b>Criterios de evaluación</b>	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>	<b>Sol. ideal</b>
1	Costo de fabricación	2	2	3	4
2	Cantidad de componentes	2	3	3	4
3	Costo de la tecnología	2	3	2	4
4	Facilidad de montaje	1	2	2	4
<b>Total</b>		<b>7</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>28</b>

Se puede observar que, sumando los puntajes de las evaluaciones (técnica y económica), el Concepto de Solución 2 es la que tiene el mayor puntaje. Por lo tanto, esta será la elegida como el proyecto preliminar.

### 3.2.5. Soluciones preliminares

Con el concepto de solución óptimo, se procede a proponer las soluciones para el proyecto preliminar, las cuales permiten tener una solución más detallada con el fin de obtener los principales elementos del sistema.

#### **Solución preliminar 1**

Se utiliza un embrague electromagnético de dientes, lo que permite el uso de una sola etapa de engranajes planetarios (Figura 3.15). Estos engranajes ayudarán a reducir el momento que debe soportar el embrague, así como a transmitir las fuerzas del motor hacia la pierna del usuario.

El uso de una sola etapa y una baja relación de reducción es beneficioso, pues se reduce la cantidad de componentes y también se hace más eficiente la transmisión de energía. Sin embargo, esto significa que se debe utilizar un motor más grande para poder generar los momentos necesarios para proveer una cantidad de asistencia que pueda ser percibida por el usuario. Además, los embragues electromagnéticos de dientes tienden a desgastarse, pues los dientes rozan entre si bruscamente al activar el embrague.



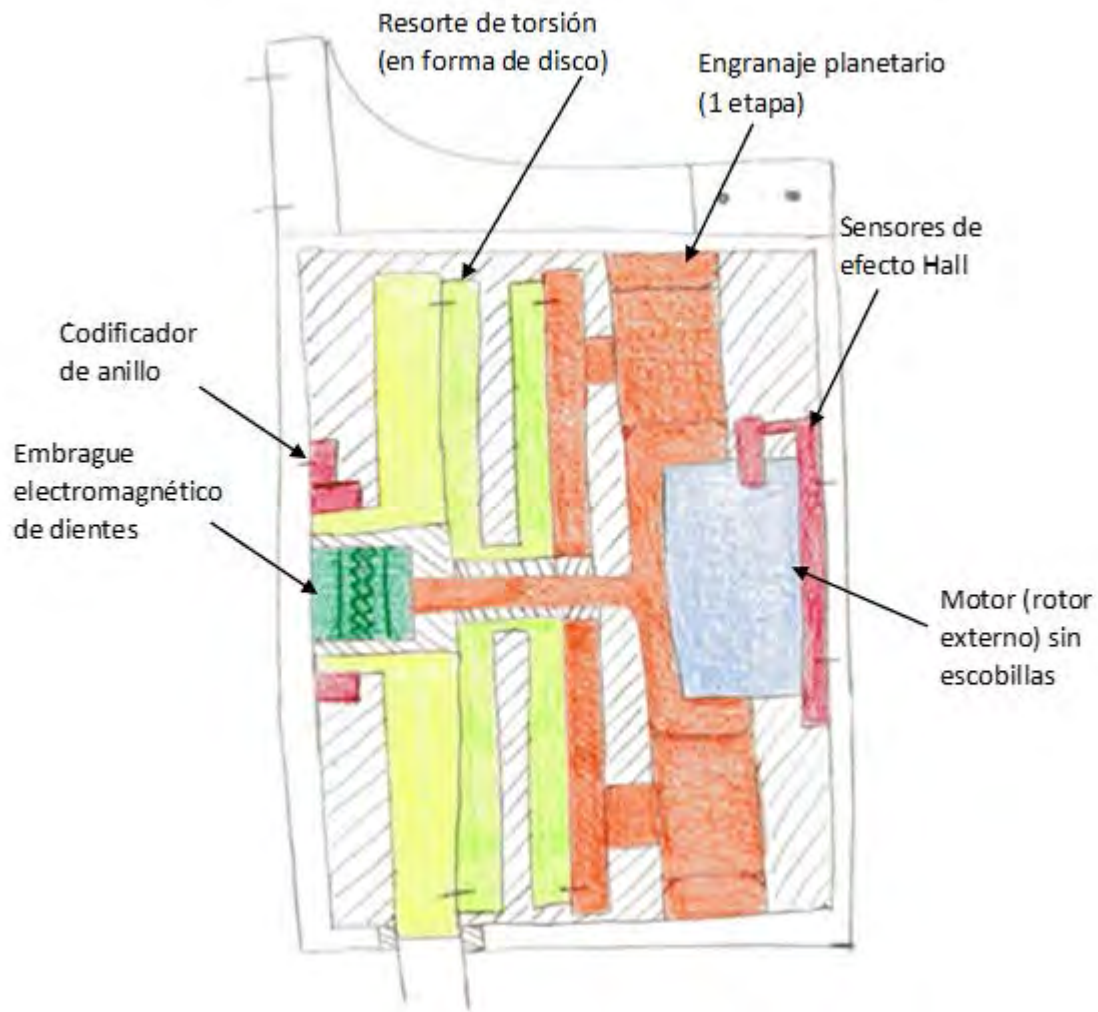


Figura 3.15: Bosquejo de la solución preliminar 1

### **Solución preliminar 2**

Esta solución utiliza un freno electromagnético aplicado por un resorte, el cual detiene o sostiene el eje mientras que no fluya energía a través de las bobinas. Al fluir la energía por las bobinas, el freno se libera, permitiendo que el eje rote. Además, utiliza un engranaje planetario de dos etapas con el fin de reducir el momento que debe sostener el freno hasta un valor adecuado (Figura 3.16).

Entonces, si bien este freno no tiene la misma capacidad que el embrague electromagnético de dientes para soportar los momentos ejercidos, este presenta una mayor durabilidad al utilizarse solo para sostener el eje. Además, el uso de un engranaje planetario de dos etapas permite el uso de un motor pequeño. No obstante, esto también significa que el mecanismo tendrá un mayor tamaño y un mayor peso, sin mencionar que la transmisión será menos eficiente.

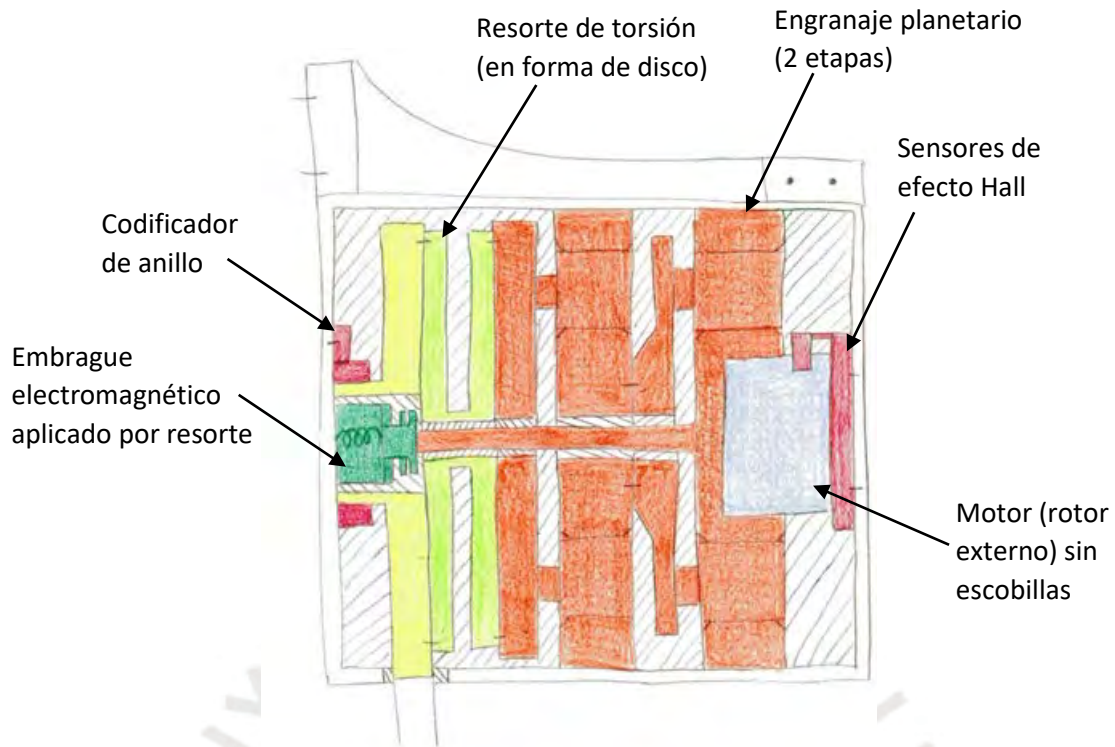


Figura 3.16: Bosquejo de la solución preliminar 2

### **Solución preliminar 3**

En esta solución se hace uso de un freno electromagnético de imanes permanentes. Este tiene un funcionamiento similar al freno de la solución preliminar 2 con la diferencia que, en lugar de detener o sostener el eje por la acción del resorte, esto es realizado por el campo magnético generado por los imanes. Por otro lado, también se hace uso de un arreglo particular de engranajes planetarios conocido como Gear Bearing Drive. En la Figura 3.17 se pueden apreciar estos componentes.

La ventaja de un freno electromagnético de imanes permanentes frente a otro tipo de freno es que tiene un tamaño más compacto y un menor peso. Además, el momento nominal que es capaz de sostener puede duplicarse al alinear el campo electromagnético generado por las bobinas con el campo magnético generado por los imanes. En cuanto al Gear Bearing Drive (GBD), este reduce significativamente la cantidad de componentes a utilizar, puesto que no requiere del uso de rodamientos ni acoples y cumple una doble función al proveer soporte para los componentes y transmitir los momentos. Sin embargo, existen ciertas desventajas, pues este tipo de freno no puede sostener momentos tan altos, por lo que es necesario que exista un índice de reducción significativo, lo que se traduce en una transmisión menos eficiente.

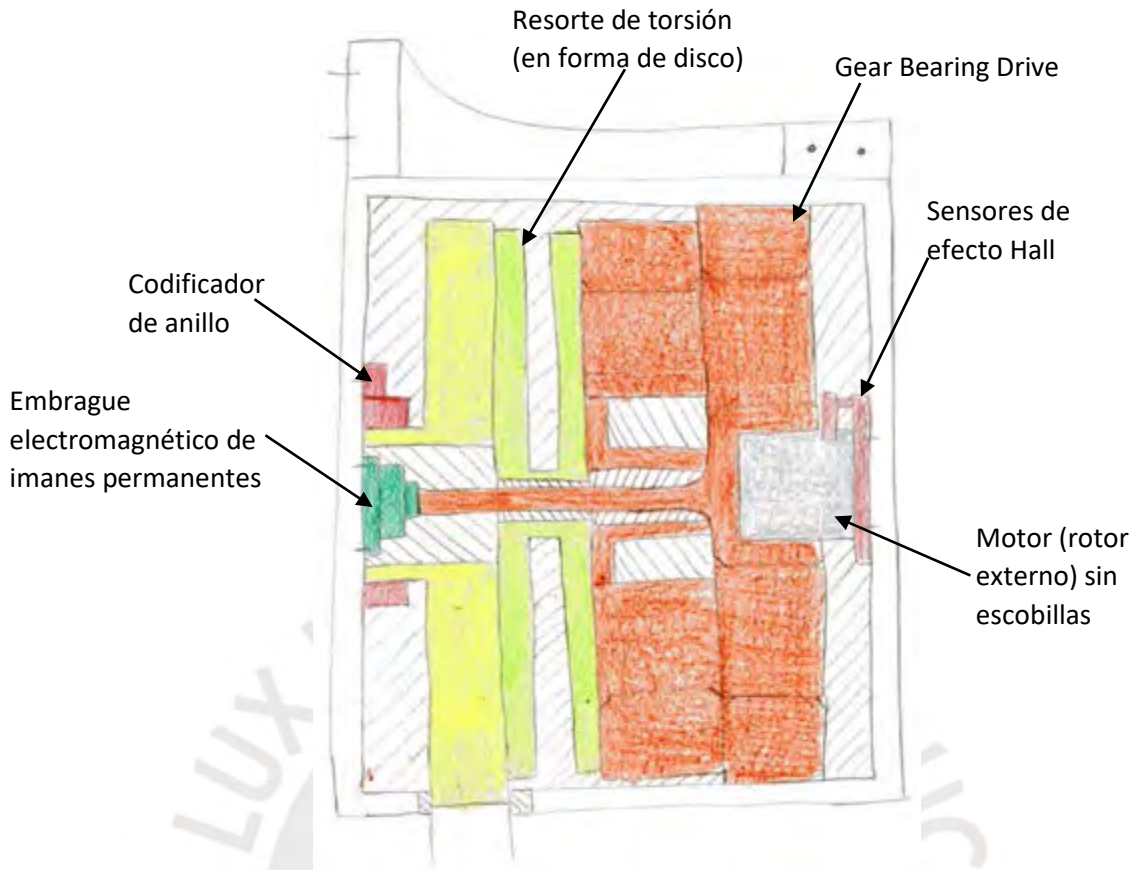


Figura 3.17: Bosquejo de la solución preliminar 3

### 3.2.6. Solución preliminar óptima

En esta sección se evaluará cada solución preliminar en base a los mismos criterios usados en la evaluación de los conceptos de solución, con el fin de encontrar cuál de estas se acerca más a una solución ideal. Sin embargo, en este caso se hará uso de pesos ponderados (ver Tabla 3.13) junto a los puntajes antes utilizados.

Tabla 3.13: Leyenda de pesos ponderados de la evaluación técnico-económica

G: Peso ponderado	
4	Muy importante
3	Importante
2	Poco importante
1	No importante

A continuación, se presentan pesos ponderados asignados a los criterios del aspecto técnico (Tabla 3.14) y económico (Tabla 3.15), acompañados de una justificación.

Tabla 3.14: Justificación de pesos ponderados del aspecto técnico – Solución Preliminar

<b>Criterio</b>	<b>G</b>	<b>Justificación</b>
Masa distal	4	La masa distal afecta directamente al desempeño del usuario y, de acuerdo con la lista de requerimientos, esta debe ser menor a 1 kg.
Uso (en exteriores)	4	Las personas que corren suelen realizar esta actividad en exteriores, por lo que es importante que el exoesqueleto no las limite en este aspecto.
Facilidad de colocación	2	Con la finalidad de que el usuario pueda ponerse el exoesqueleto por su cuenta, es necesario que este sea sencillo de manipular al momento de colocárselo.
Mantenimiento	3	Dado que el exoesqueleto será utilizado de manera regular, es necesario que sus componentes requieran poco o nulo mantenimiento.
Eficiencia	4	Un buen uso de la energía permite utilizar baterías más pequeñas, reduciendo el peso total del exoesqueleto y beneficiando al usuario.
Tamaño	2	Es necesario mantener un tamaño adecuado para que el usuario pueda transportar y utilizar el exoesqueleto con facilidad.
Rapidez	2	La rapidez a la que trabajan los motores influye en la eficiencia.

Tabla 3.15: Justificación de pesos ponderados del aspecto económico – Solución Preliminar

<b>Criterio</b>	<b>G</b>	<b>Justificación</b>
Costo de fabricación	4	Varias partes necesitan ser diseñadas para esta aplicación, lo que supone un costo sustancial.
Cantidad de componentes	3	Es necesario mantener la cantidad de componentes necesarios al mínimo para reducir los costos de adquisición.
Costo de la tecnología	4	Resulta importante mantener un equilibrio entre el aspecto económico y tecnológico para desarrollar un dispositivo que mantenga una buena relación beneficio/precio.
Facilidad de montaje	2	La facilidad de montaje reduce el tiempo necesario para ensamblar las partes, resultando en una reducción en el costo.

Por otro lado, se presentan las tablas 3.16 y 3.17, donde se asignan y justifican los puntajes a cada solución. Así mismo, se presentan las tablas 3.18 y 3.19, las cuales presentan un resumen de los pesos y puntajes asignados a cada solución, tanto en el aspecto técnico como en el económico.

Tabla 3.16: Justificación del puntaje asignado por criterio técnico – Solución Preliminar

<b>Criterio</b>	<b>Solución</b>	<b>P</b>	<b>Justificación</b>
Masa distal	Solución 1	2	Debido al motor que debe utilizar resulta un poco pesado.
	Solución 2	2	Debido a los mecanismos de transmisión son un poco pesados.
	Solución 3	2	
Uso (en exteriores)	Solución 1	3	Los 3 diseños utilizan carcasas que aseguran su protección antes las condiciones ambientales.
	Solución 2	3	
	Solución 3	3	
Facilidad de colocación	Solución 1	3	El embrague esta desacoplado antes de encender el sistema. Facilita la colocación.
	Solución 2	2	El freno está acoplado antes de encender el sistema. Es necesario energizar el sistema para colocarse el exoesqueleto.
	Solución 3	2	
Mantenimiento	Solución 1	1	Los dientes del embrague son muy susceptibles al desgaste.
	Solución 2	3	El freno utilizado es más resistente al desgaste, pues utiliza discos para acoplarse.
	Solución 3	3	
Eficiencia	Solución 1	2	Presenta una sola etapa en la transmisión, pero requiere un gran motor. Eficiencia entre 70 y 75%.
	Solución 2	3	El mecanismo de transmisión y el motor que utiliza presentan una eficiencia combinada de entre 75% y 85%.
	Solución 3	3	
Tamaño	Solución 1	2	Tamaño medio debido al engranaje planetario de una sola etapa y al gran motor que debe utilizar.
	Solución 2	2	Tamaño medio por el uso de un engranaje planetario de 2 etapas.
	Solución 3	3	Tamaño compacto por el uso del Gear Bearing Drive.
Rapidez	Solución 1	1	El motor no puede girar rápido por el mecanismo de transmisión utilizado.
	Solución 2	3	El motor debe rotar rápido debido a los índices de reducción de los mecanismos de transmisión.
	Solución 3	3	

Tabla 3.17: Justificación del puntaje asignado por criterio económico – Solución Preliminar

<b>Criterio</b>	<b>Solución</b>	<b>P</b>	<b>Justificación</b>
Costo de fabricación	Solución 1	3	Se debe fabricar el resorte de torsión (mecanizado), el engranaje planetario (idealmente impresión 3D, sino mecanizado), la estructura (impresión 3D o fundición) y la carcasa (impresión 3D).
	Solución 2	2	Se debe fabricar el resorte de torsión (mecanizado), las dos etapas del engranaje planetario (impresión 3D), la estructura (impresión 3D o fundición) y la carcasa (impresión 3D).
	Solución 3	2	Se debe fabricar el resorte de torsión (mecanizado), el Gear Bearing Drive (impresión 3D), la estructura (impresión 3D o fundición) y la carcasa (impresión 3D).
Cantidad de componentes	Solución 1	3	Requiere pocos componentes debido a que el engranaje planetario es de una sola etapa.
	Solución 2	2	Requiere más componentes debido a las dos etapas del engranaje planetario.
	Solución 3	3	Requiere menos componentes al no necesitar rodamientos ni acoples.
Costo de la tecnología	Solución 1	1	El motor necesario para proporcionar la asistencia necesaria es costoso.
	Solución 2	3	Los motores utilizados son pequeños y relativamente baratos.
	Solución 3	3	
Facilidad de montaje	Solución 1	3	Es relativamente sencillo realizar el montaje debido a la poca cantidad de componentes.
	Solución 2	2	Debido a las etapas del engranaje planetario, el montaje resulta un poco complicado.
	Solución 3	2	Debido a que es un diseño compacto, el montaje de los componentes es un poco complejo.

Tabla 3.18: Evaluación del valor técnico – Solución Preliminar

Variantes de Concepto		Solución 1			Solución 2		Solución 3		Sol. ideal	
Nro.	Criterios de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp
1	Masa distal	4	2	8	2	8	2	8	4	16
2	Uso (en exteriores)	4	3	12	3	12	3	12	4	16
3	Facilidad de colocación	2	3	6	2	4	2	4	4	8
4	Mantenimiento	3	1	3	3	9	3	9	4	12
5	Eficiencia	4	2	8	3	12	3	12	4	16
6	Tamaño	2	2	4	2	4	3	6	4	8
7	Rapidez	2	1	2	3	6	3	6	4	8
<b>Puntaje máximo</b>		14	43	18	55	19	57	28	84	
<b>Valor técnico Xi</b>		0.5	0.512	0.643	0.655	0.679	0.679	1	1	
<b>Orden</b>		3	2	1	0					

Tabla 3.19: Evaluación del valor económico – Solución Preliminar

Variantes de Concepto		Solución 1			Solución 2		Solución 3		Sol. ideal	
Nro.	Criterios de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp
1	Costo de fabricación	4	3	12	2	8	2	8	4	16
2	Cantidad de componentes	3	3	9	2	6	3	9	4	12
3	Costo de la tecnología	4	1	4	3	12	3	12	4	16
4	Facilidad de montaje	2	3	6	2	4	2	4	4	8
<b>Puntaje máximo</b>		10	31	9	30	10	33	16	52	
<b>Valor económico Yi</b>		0.625	0.596	0.563	0.577	0.625	0.635	1	1	
<b>Orden</b>		2	3	1	0					

En la Figura 3.18, se puede observar que la distancia de la solución 3 a la línea negra, la cual representa la línea de tendencia de una solución óptima, es la menor entre los tres conceptos de solución. Por lo tanto, será esta la elegida como la solución preliminar óptima.

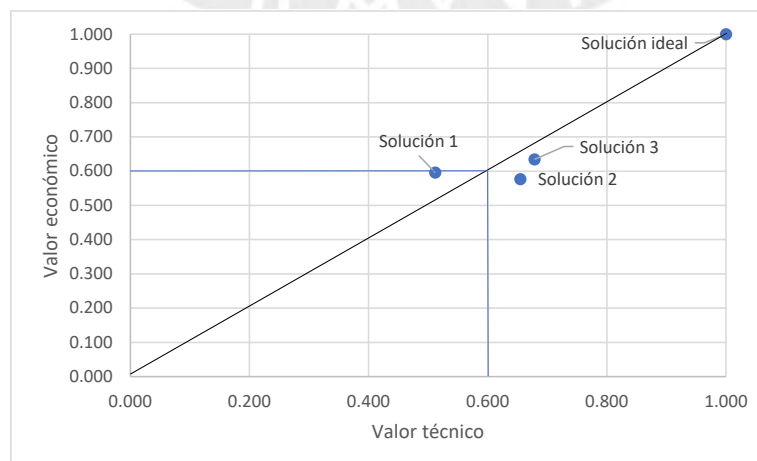


Figura 3.18: Resultados evaluación técnica – económica para la – Solución Preliminar

Entonces, dado que la solución 3 fue elegida como la solución óptima, conviene explicar brevemente en que consiste el mecanismo de transmisión que utiliza.

El Gear Bearing Drive (GBD), es un mecanismo de transmisión que funciona como un actuador, al proveer potencia, y como una articulación, al proporcionar soporte. Además, no utiliza rodamientos ni ejes, es liviano, sumamente compacto y puede alcanzar una reducción de hasta 2000:1, lo que lo hace adecuado para dispositivos portátiles tales como prótesis y exoesqueletos activos.

El GBD integra al motor DC de rotor externo sin escobillas en el centro del engranaje solar, como se puede observar en la Figura 3.19. Adicionalmente, y para lograr una gran reducción, los engranajes planetarios de entrada (con “x” dientes) están rígidamente unidos a los engranajes planetarios de salida (con “x+n” dientes). El engranaje anular de la etapa de entrada está fijo y los planetas giran alrededor del eje central conducidos por engranaje solar. De esta manera, la diferencia en los dientes de los engranajes planetarios hace que el engranaje anular de la etapa de salida gire.

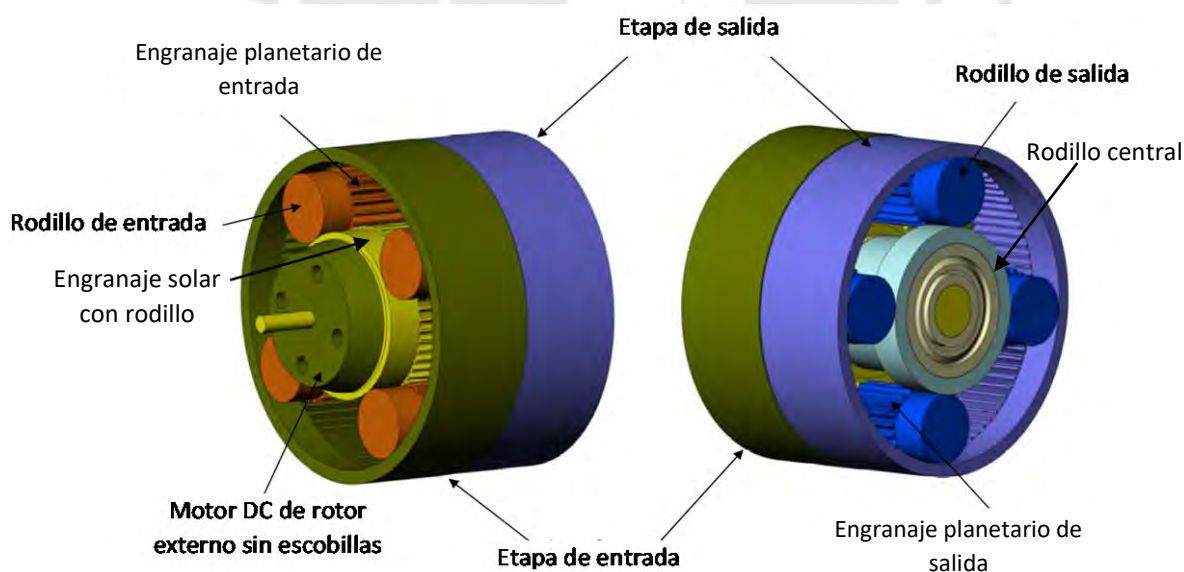


Figura 3.19: Modelo del Gear Bearing Drive.

Como se mencionó antes, este mecanismo no utiliza rodamientos ni ejes, lo cual es posible gracias al diseño de rodamientos de rodillos para asegurar el ensamblaje, el cual funciona al poner las superficies rodantes en los diámetros de paso y en paralelo con las ruedas dentadas (ver Figura 3.19), lo que hace que sean los dientes de estas, junto con los rodamientos de rodillos, los que soporten las cargas axiales.

### 3.3. Proyecto Preliminar

Con la solución preliminar óptima seleccionada, se procede a realizar un modelo en 3D de esta, junto con algunas vistas de detalle de los componentes del actuador; el diagrama de flujo, el cual se tendrá como guía al momento de desarrollar el programa del sistema; la arquitectura de hardware, donde se identifican las relaciones entre los componentes del exoesqueleto; y el diagrama de operaciones, en el que se presentan los pasos que seguirá el usuario al momento de interactuar con el exoesqueleto.

#### 3.3.1. Modelo en 3D

En la Figura 3.20 se muestra un bosquejo de cómo se vería una persona con el exoesqueleto puesto. Esta lleva una pequeña mochila que contiene:

- El microcontrolador: Encargado de procesar las señales y controlar el exoesqueleto, asegurando que este funcione correctamente.
- El divisor de voltaje: Permite que el microcontrolador lea el nivel de voltaje de la batería.
- Los reguladores conmutados: Tienen como función acondicionar la energía para los componentes que requieren un nivel de voltaje distinto al proporcionado por las baterías.
- Los controladores de velocidad de lazo abierto: Convierten la señal PWM enviada por el microcontrolador a una señal que permita controlar al motor.
- Las baterías: Proveen energía para todos los componentes.
- El buzzer y la tira LED: Ubicados en el asa derecha de la mochila. Sirven para indicar el estado de la batería.

Adicionalmente, en cada pierna se observa a la estructura junto con la carcasa, la cual protege los siguientes componentes:

- El motor: De corriente continua, rotor externo y sin escobillas.
- El freno electromagnético de imanes permanentes: Encargado de sostener el eje para permitir que el resorte se deforme.
- El Gear Bearing Drive: Reduce el torque que debe sostener el freno, aumenta el torque que genera el motor, y funciona como estructura de soporte para algunos componentes.
- El resorte de torsión: Tiene forma de disco para ocupar menos espacio.
- El codificador de anillo: Mide la posición angular de la rodilla, vital para realizar el control.
- Los sensores de efecto Hall: Miden la posición del motor y permiten estimar la velocidad del mismo. Es otro elemento vital para el control.



Es importante señalar que, al ser un bosquejo, la estructura no ha sido optimizada aún, por lo que en este caso solo se está representando el espacio que podría ocupar. De la misma forma, la carcasa protectora es simplemente una representación del volumen que esta puede llegar a tener en el diseño final. Finalmente, el cable que va desde la mochila hasta la carcasa podrá ser conectado y desconectado para mayor comodidad del usuario.

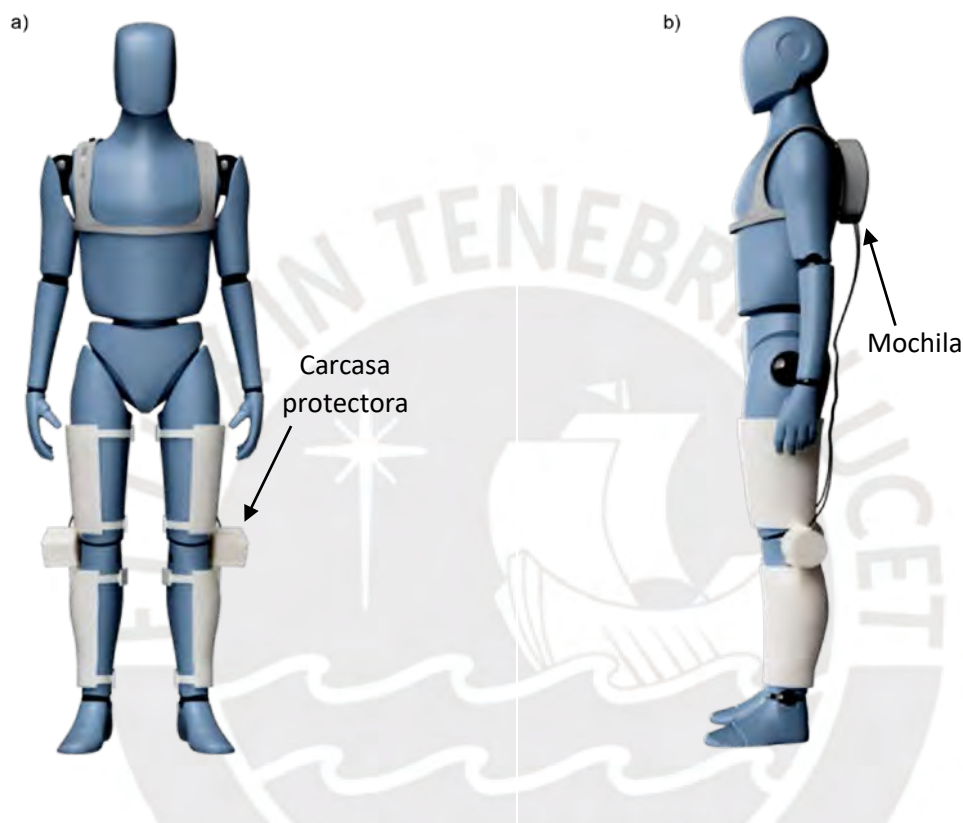


Figura 3.20: Vista frontal (a) y lateral (b) del usuario con el exoesqueleto puesto.

Por otro lado, debido a que los componentes utilizados deben ser dispuestos de tal manera que se tenga un diseño compacto, es útil presentar una breve descripción (acompañada de imágenes) de la relación entre algunos componentes importantes de este mecanismo. De esta forma, en la Figura 3.21 (a), se observa el mecanismo completo, mientras que en la Figura 3.21 (b), se muestra el Gear Bearing Drive (GBD) y algunos de sus componentes (el engranaje solar, 4 engranajes planetarios, los engranajes anulares y el rodillo central). Así mismo, en la Figura 3.21 (c), se aprecia el motor (insertado en el agujero del engranaje solar del GBD) y el resorte de torsión en forma de disco, el cual está ubicado en la parte que une el mecanismo con la estructura y el segundo engranaje anular del GBD (mostrado en la figura 3.21 (b)). Finalmente, en la Figura 3.21 (d), se observa el eje del engranaje solar que conecta

a este con el freno electromagnético de imanes permanentes, el cual pasa por el agujero del codificador de anillo de la pierna y la parte que une al actuador con la estructura (no mostrada en este caso). Además, se muestra codificador de anillo para la rodilla y los sensores de efecto Hall para el motor a cada extremo. Cabe señalar que los semicírculos presentes en el resorte de torsión, son solo representaciones para indicar que este estará rígidamente unido a los componentes correspondientes.

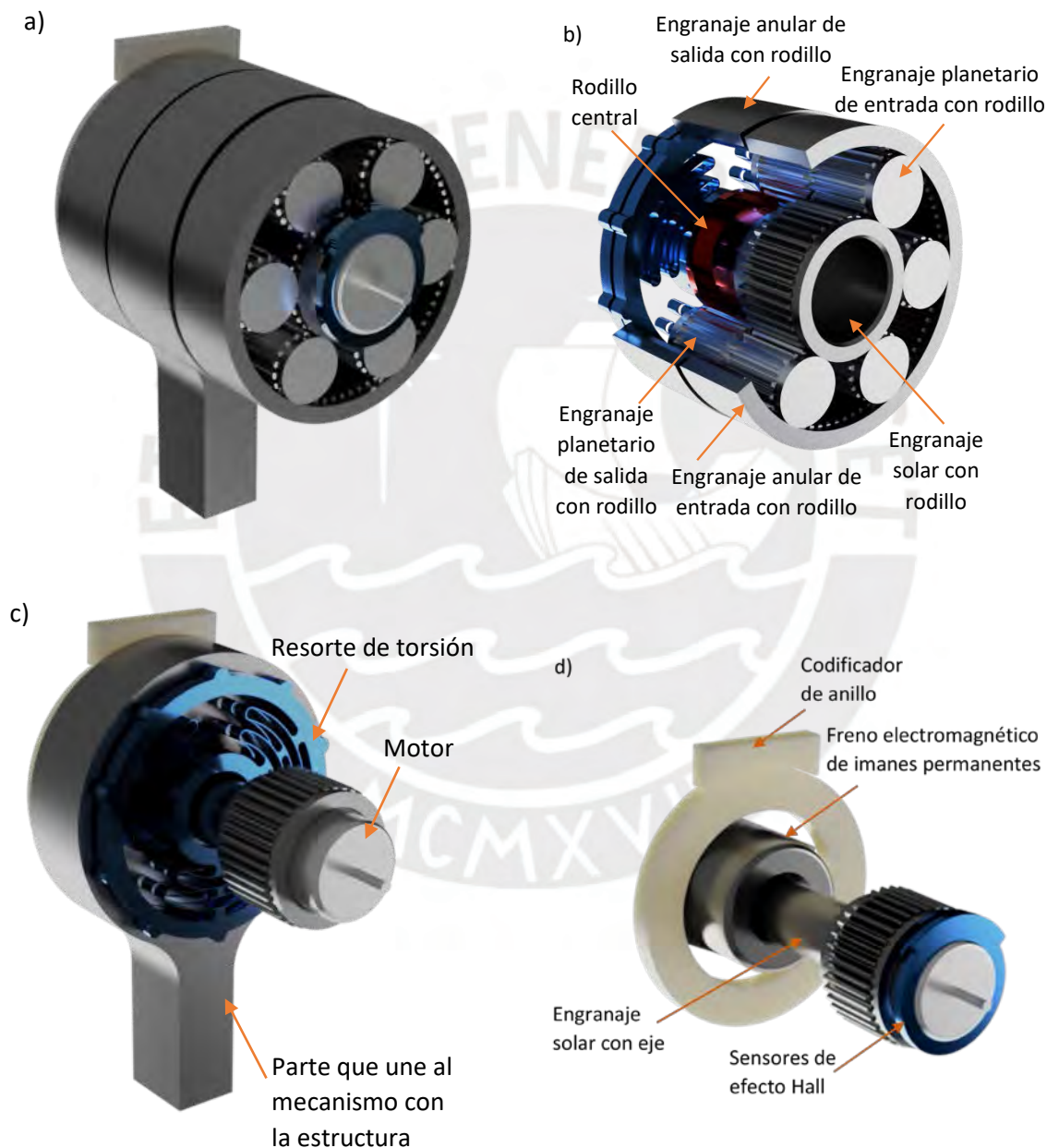


Figura 3.21: Vistas de detalle de los componentes del sistema.

### 3.3.2. Diagrama de flujo

El presente diagrama de flujo (Figura 3.22) servirá para realizar el código del programa que controlará todos los procesos del exoesqueleto. Es importante mencionar que todos los procesos a partir del círculo "A", son realizados para cada pierna por separado, pero estos comparten la señal enviada por el acelerómetro. Así mismo, el control del torque de cada actuador cuando el usuario está caminando se realiza de manera independiente.

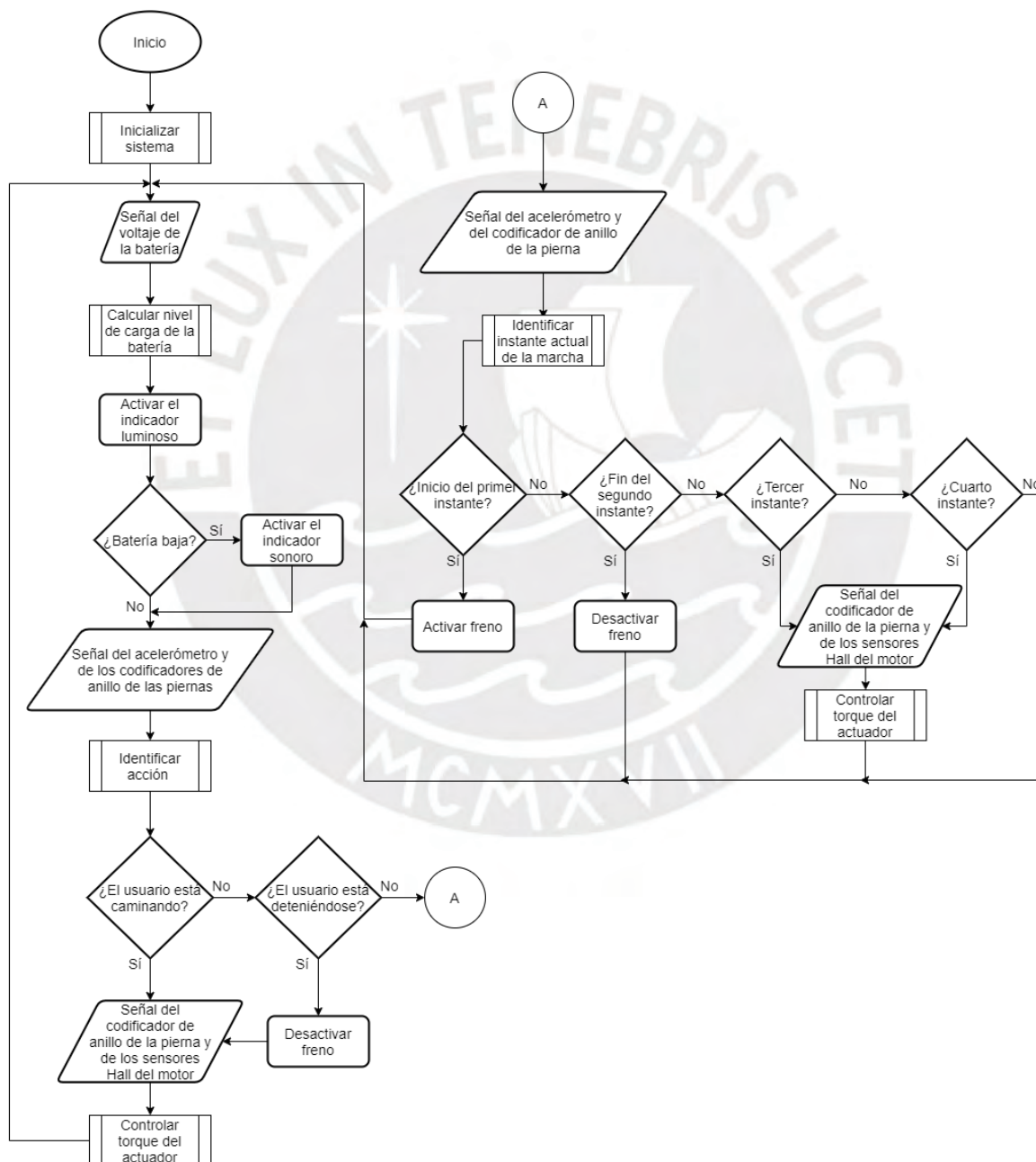


Figura 3.22: Diagrama de flujo general.

### 3.3.3. Arquitectura de hardware

La arquitectura de hardware se muestra en la Figura 3.23. En esta se muestra que los embragues/frenos y motores son energizados con las baterías y que la velocidad de los motores es controlada en lazo abierto debido a que el microcontrolador realiza el control de lazo cerrado. De esta manera, el microcontrolador recibe señales de los codificadores de anillo de cada pierna y, en base a estas, genera las señales para controlar el torque ejercido por cada actuador. Además, recibe la señal del divisor de voltaje, con la cual calcula el nivel de carga de la batería y genera las señales necesarias para los indicadores.

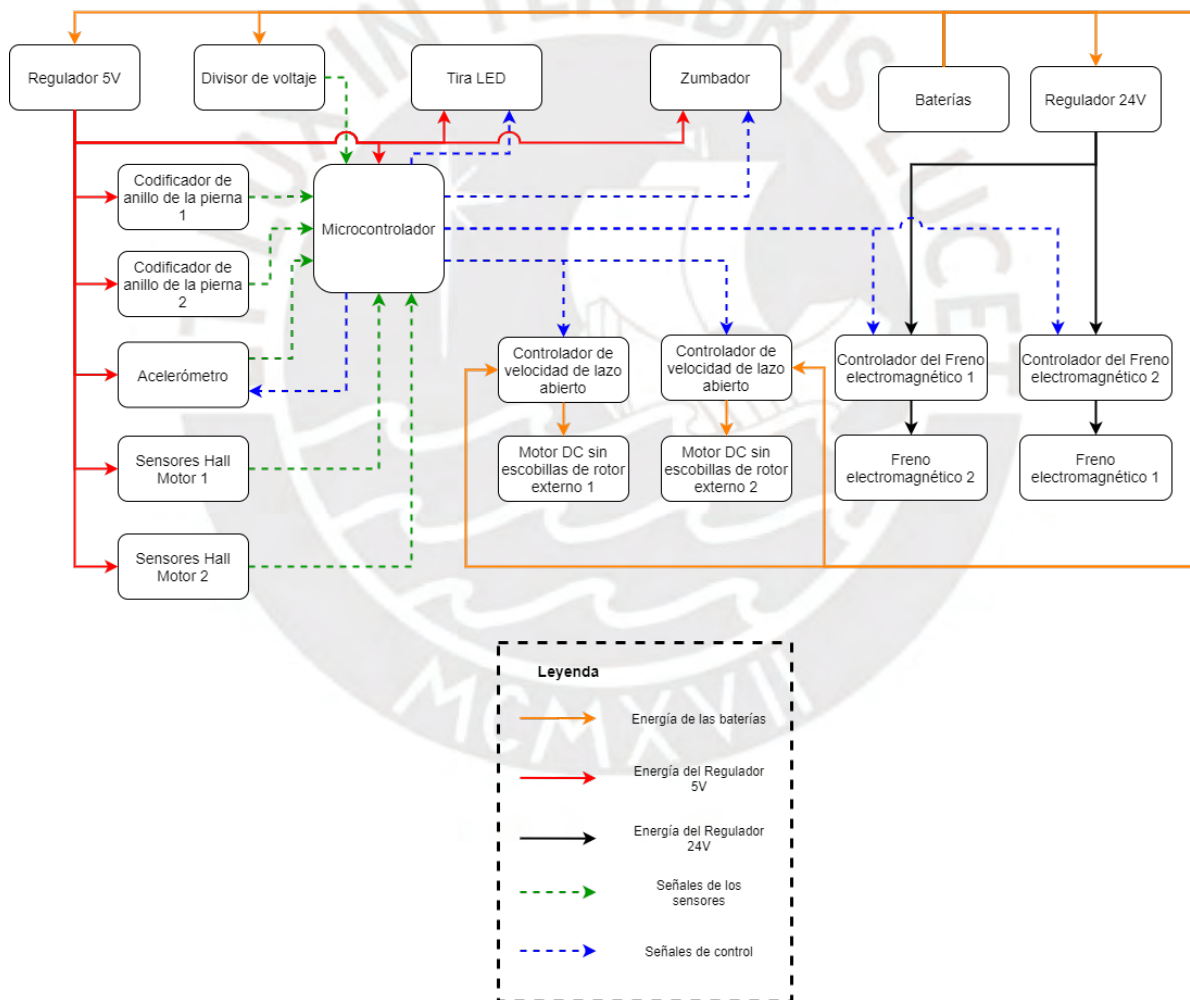


Figura 3.23: Arquitectura de hardware.

### 3.3.4. Diagrama de operaciones

En el diagrama de la Figura 3.24 se tiene la secuencia de operaciones que sigue el usuario al interactuar con el exoesqueleto. Se resalta en azul una secuencia alterna, la cual realiza el usuario si el nivel de carga de las baterías no es el adecuado.

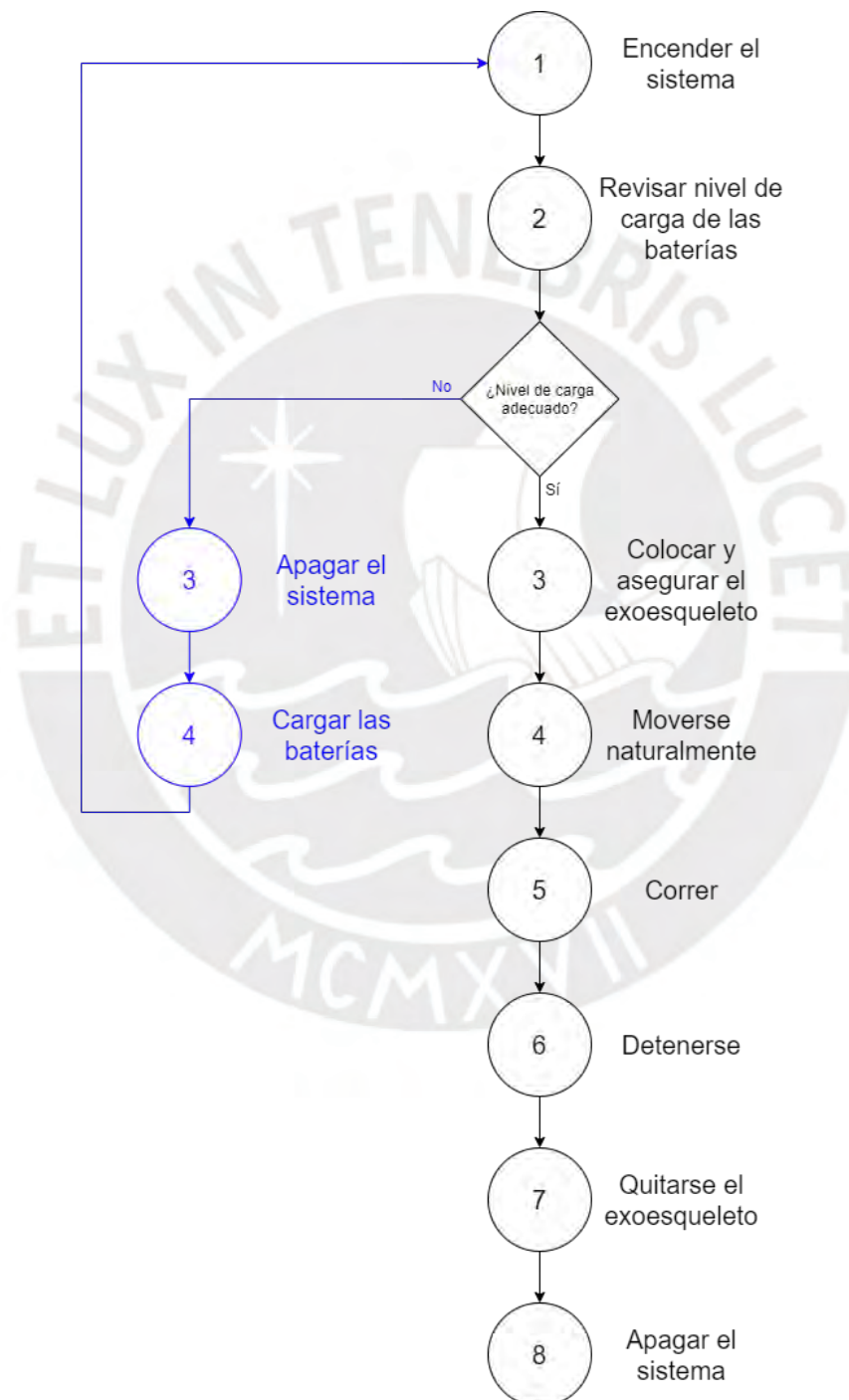


Figura 3.24: Diagrama de operaciones.

## CONCLUSIONES

Fue posible determinar que parámetros serían los más importantes analizar al momento de realizar el diseño del exoesqueleto en base a la información sobre la anatomía, fisiología y biomecánica de la rodilla al correr.

El conocimiento de las tecnologías (actuadores, sensores, entre otros) que se suelen utilizar en el desarrollo de exoesqueletos activos contribuyó en el posterior desarrollo de las alternativas de solución. Además, a partir de esta información, se llegó a la conclusión de que se debían utilizar elementos pasivos (tales como resortes) para poder satisfacer los requerimientos del sistema.

Los requerimientos del sistema fueron establecidos centrándose en el bienestar del usuario en todo momento. Esta forma de determinar los requerimientos demostró ser útil para establecer parámetros con el fin de mitigar los efectos adversos que pudieran influir negativamente en el desempeño de este al desarrollar sus actividades, asegurando que las necesidades del usuario fueran satisfechas.

Luego de obtener las alternativas de solución, se pudo precisar cuál de estas era la mejor al someterlas a una evaluación técnico – económica, a partir de la cual se determinó que el Concepto de Solución óptimo era la alternativa número 2. De la misma manera, se procedió a evaluar las soluciones preliminares, con lo que se llegó a la conclusión que la Alternativa preliminar número 3 era la óptimo y, por consiguiente, esta solución se constituye como el proyecto a desarrollar posteriormente, con apoyo de los fundamentos del cálculo, selección y diseño en ingeniería mecatrónica.

## RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES

Al utilizar actuadores eléctricos en un exoesqueleto es importante tener en cuenta que estos pueden resultar excesivamente grandes y consumir una cantidad sustancial de energía, sobre todo si se requiere mucha potencia. Por lo tanto, es recomendable el uso de un resorte, el cual puede almacenar energía y soportar las cargas, aumentando la eficiencia y disminuyendo el tamaño del exoesqueleto.

La masa del exoesqueleto debe ser como máximo 1.4 kg (distribuidos en todo el miembro inferior), con el fin de mantener el incremento en el costo metabólico para moverse en un valor aceptable, evitando así, que el usuario se fatigue debido al uso del exoesqueleto. Por este motivo, se recomienda optimizar el diseño de los componentes que conforman al exoesqueleto, así como utilizar materiales que sean ligeros, pero al mismo tiempo resistentes para soportar las cargas ejercidas por el usuario.

No es recomendable considerar la rotación de la rodilla como un mecanismo con un solo grado de libertad (GDL), como se explicó en el capítulo 1. Sin embargo, es necesario evaluar si es necesario considerar todos los GDL de la rodilla, tanto en el plano sagital como en el plano frontal, puesto que esto puede incrementar la dificultad, tanto del diseño como de la implementación, así como el peso total del exoesqueleto, resultando en efectos adversos para el usuario. Por lo tanto, encontrar un punto intermedio que satisfaga la mayor cantidad de aspectos ergonómicos sin afectar demasiado a los otros es importante.

## BIBLIOGRAFÍA

- [Browning, 2007]. Browning, R. C., Modica, J. R., Kram, R., & Goswami, A. (2007). The effects of adding mass to the legs on the energetics and biomechanics of walking. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(3), 515–525. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e31802b3562>
- [Clark, 2017]. Clark, K. P., Ryan, L. J., & Weyand, P. G. (2017). A general relationship links gait mechanics and running ground reaction forces. *Journal of Experimental Biology*, 220(2), 247–258. <https://doi.org/10.1242/jeb.138057>
- [Dicharry, 2010]. Dicharry, J. (2010). Kinematics and kinetics of gait: From lab to clinic. *Clinics in Sports Medicine*, 29(3), 347–364. <https://doi.org/10.1016/j.csm.2010.03.013>
- [Dollar, 2008]. Dollar, A. M., & Herr, H. (2008). Design of a quasi-passive knee exoskeleton to assist running. *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*, 747–754. <https://doi.org/10.1109/IROS.2008.4651202>
- [Elliott, 2014]. Elliott, G., Marecki, A., & Herr, H. (2014). Design of a clutch-spring knee exoskeleton for running. *Journal of Medical Devices, Transactions of the ASME*, 8(3), 1–11. <https://doi.org/10.1115/1.4027841>
- [Grimmer, 2014]. Grimmer, M., & Seyfarth, A. (2014). Mimicking Human-Like Leg Function in Prosthetic Limbs. In Artemiadis (Ed.), *Neuro-Robotics, From Brain Machine Interfaces to Rehabilitation Robotics*, Springer Science (Issue August, 2015, p. 55). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8932-5>
- [Grove, 2008]. Grove, D., & Hudson, M. (2008). *Prevent Running Injuries*. January, 2008.
- [Iwaki, 2000]. Iwaki, H., Pinskerova, V., & Freeman, M. A. R. (2000). Tibiofemoral movement 1: The shape and relative movements of the femur and tibia in the unloaded cadaver knee. *Journal of Bone and Joint Surgery - Series B*, 82(8), 1189–1195. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.82B8.10717>
- [Lee, 2014]. Lee, D. C., Pate, R. R., Lavie, C. J., Sui, X., Church, T. S., & Blair, S. N. (2014). Leisure-time running reduces all-cause and cardiovascular mortality risk. *Journal of the American College of Cardiology*, 64(5), 472–481. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2014.04.058>
- [Orendurff, 2018]. Orendurff, M. S., Kobayashi, T., Tulchin-Francis, K., Tullock, A. M. H., Villarosa, C., Chan, C., & Strike, S. (2018). A little bit faster: Lower extremity joint kinematics and kinetics as recreational runners achieve faster speeds. *Journal of Biomechanics*, 71, 167–175. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.02.010>
- [Pratt, 2004]. Pratt, J. E., Krupp, B. T., Morse, C. J., & Collins, S. H. (2004). The RoboKnee: An exoskeleton for enhancing strength and endurance during walking. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004(3)*, 2430–2435. <https://doi.org/10.1109/robot.2004.1307425>
- [Prives, 1984]. Prives, M., Lisenkov, N., & Bushkovich, V. (1984). *Anatomía humana. Tomo I* (H. Valdés Tergas & I. V. Danilova (eds.); Quinta). EDITORIAL MIR.
- [Sinelnikov, 1984]. Sinelnikov, R. D. (1984). *Atlas de Anatomía Humana. Tomo I. Huesos, articulaciones y ligamentos* (H. Valdés Tergas (ed.); Cuarta). EDITORIAL MIR.
- [Vadiati, 2018]. Vadiati, A., Bagheri, A., Mahjoob, M., & Sadigh, M. J. (2018). Design, control, and prototyping of a series elastic actuator for an active knee orthosis. *Engineering Solid Mechanics*, 6(3), 241–252. <https://doi.org/10.5267/j.esm.2018.5.003>
- [Wang, 2018]. Wang, J., Li, X., Huang, T. H., Yu, S., Li, Y., Chen, T., Carriero, A., Oh-Park, M., & Su, H. (2018). Comfort-Centered Design of a Lightweight and Backdrivable Knee Exoskeleton. *IEEE*
- [Zhong, 2017]. Zhong, Y., Fu, W., Wei, S., Li, Q., & Liu, Y. (2017). Joint Torque and Mechanical Power of Lower Extremity and Its Relevance to Hamstring Strain during Sprint Running. *Journal of Healthcare Engineering, 2017*. <https://doi.org/10.1155/2017/8927415>
- [Zoss, A., Kazerooni, H., & Chu, A. 2005]. On the mechanical design of the Berkeley Lower Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX). *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*, 3132–3139. <https://doi.org/10.1109/IROS.2005.1545453>



Anexo A: Tabla comparativa de exoesqueletos activos para el aumento de capacidades motoras

Sistema	Articulación	Reductores	Actuadores	Sistema de control	Sistema de medición	Energía	Peso (Kg)	Carga máx.	Tiempo de uso (horas)	Movimientos	Uso	Usuarios	Espacio de uso	Soporte	Ventajas	Desventajas	Etapas de desarrollo	Etapas comerciales
Clutch-Spring Knee Exoskeleton for Running	Rodilla	Engranaje planetario 1:2.2	Resorte con embrague activado por solenoide	Máquina de estados	Codificador óptico, acelerómetro, giroscopio, sensor de barrera	Batería de Li-Po de 2 Ah	0.71	190 Nm	8	Plano sagital	Reducción de costo metabólico	Corredores	Terreno plano	No necesita	Eficiente energéticamente	El control no es muy robusto	2014 - Actualidad	Prototipo
Lightweight and Backdrivable Knee Exoskeleton	Rodilla	2 poleas sincronas: 8.85:1	Motor eléctrico de alta densidad de torque	Control de torque por corriente del motor en cascada	Giroscopio, codificador óptico, sensor de corriente (módulo del motor)	Batería	3.2	16 Nm	1	Plano sagital	Reducción de costo metabólico	Caminantes	Terreno plano	No necesita	Cómodo para el usuario	Peso del dispositivo	2018- Actualidad	Prototipo
Soft Exoskeleton for Knee Injury Prevention during Squatting	Rodilla	Engranaje planetario 36:1	Motor eléctrico	Modelo biomecánico + Control PID en cascada de torque, velocidad y corriente	IMU, sensores de torque	Fuente de alimentación fija	1.1	72 Nm	Indefinido	Plano sagital	Reducción de esfuerzo realizado por músculos	Cargadores	Terreno plano	No necesita	Complaciente a los deseos del usuario	No es portátil	2018- Actualidad	Prototipo
Quasi-Passive Knee Exoskeleton to Assist Running	Rodilla	Polea sincrona: 3:1	Motor eléctrico	Control de posición	Codificador óptico, potenciómetro rotacional y suela con interruptor	Batería de LiPo	2.5 (por pierna)	47.5 Nm	No específica	No realiza	Reducción de costo metabólico	Corredores	Terreno plano	No necesita	Compacto	Considerable inercia agregada a la pierna	2008 - Actualidad	Prototipo
Autonomous multi-joint soft exosuit	Cadera (2) Talón (1)	Cajas reductoras: 36:1 y 38:1 y una polea múltiple	4 motores eléctricos de 6 polos	Control de posición con control de fuerza	3 IMUs, 2 celdas de carga	Batería LiPo 48V - 8 Ah	9.3	40 Nm	No específica	Plano sagital	Reducción de costo metabólico	Caminantes	Terreno irregular	No necesita	Amplificación de resistencia	Mucho peso para ser portátil	2018 - Actualidad	Prototipo
Lightweight, Tethered, Torque-Controlled Knee Exoskeleton	Rodilla	No tiene	Motor eléctrico	Control proporcional con inyección de amortiguación y aprendizaje iterativo	Codificador magnético, galgas extensométricas,	Fuente de alimentación fija	0.76	62.2 Nm	Indefinido	Plano sagital	Investigar estrategias de rehabilitación	Personas en procesos de rehabilitación	Terreno plano	No necesita	Ligero y confiable	No es portátil	2017 - Actualidad	Prototipo
HAL 5: Hybrid Assistive Limb	Tobillo (1) Rodilla (1) Cadera (1) Hombro (1) Codo (1)	Disco armónico	Motores eléctricos	Control basado en EMG + basado en control autónomo (PD de posición)	Sensores EMG + fuerza, potenciómetros + giroscopios + acelerómetros	Baterías de 100V	23	70 Nm	2:40	Plano sagital	Amplificación de fuerza / Asistencia para caminar	Adulto sano / con deficiencia en los miembros inferiores	Terreno irregular	No necesita	Práctico. Amplifica fuerza y resistencia	Fuerzas efectivas sentidas por el usuario	2004 - Actualidad	Producto
RoboKnee	Rodilla	Husillo de bolas con resorte	Motor eléctrico	Control de fuerza con PD y factor de asistencia	2 celdas de carga y codificador óptico lineal	Baterías de hidruro de níquel-metal (100W-hr)	5.3	1330 N	1	Plano sagital	Reducción de esfuerzo realizado por músculos	Caminantes	Terreno irregular	No necesita	Aplica fuerza cuando el usuario lo necesita	No permite que el usuario se sienta debido a la posición del actuador	2004 - Actualidad	Prototipo
BLEEX	Tobillo (3) Rodilla (1) Cadera (3)	Ninguno. Brazo de palanca	Cilindros hidráulicos lineales bidireccionales	Get out of the way control	Codificadores, inclinómetro, acelerómetros, sensor de presión y suela con interruptores	Fuente de alimentación portátil. Hidráulica (1.143 KW) Electrónica y control (200W)	14	75 kg	No específica	Plano sagital y frontal	Amplificación de fuerza	Militar	Terreno irregular	No necesita	Amplificación de fuerza y resistencia. Facilidad en ponerse.	Robusto	2005 - Actualidad	Prototipo
Inverted Muscle Skeleton	Rodilla	Ninguno. Brazo de palanca	Cilindros neumáticos lineales bidireccionales	Control de fuerza en modo deslizante	2 celdas de carga, sensor Hall linear, 3 sensores de presión	Fuente fija de 50L de aire a 8.5 bar	1.5	470 N	Indefinido	Plano sagital	Reducción de esfuerzo realizado por músculos	Caminantes	Terreno plano	No necesita	Reduce las fuerzas cortantes aplicadas en la piel	No es portátil	2018 - Actualidad	Prototipo

## Anexo B: Resultados del uso del exoesqueleto Elevate

El exoesqueleto Elevate de la empresa Roam Robotics reduce la carga que deben soportar las rodillas hasta en un 30%, lo que trae un alivio para el usuario. Esto se puede apreciar en los resultados de los exámenes realizados a 10 individuos, los cuales muestran un decremento en el puntaje de dolor y la activación de los músculos vasto lateral y recto femoral al usar el exoesqueleto<sup>20</sup>. Esto se puede apreciar en la Tabla B.1.

Tabla B.1: Resultados de los 10 individuos evaluados.<sup>21</sup>

Dependent Variable	Two-way measure (p-value)	repeated ANOVA	Average Changes
Left Knee Pain (n=10)	0.013		-54.81%
Right Knee Pain (n=10)	0.037		-48.93%
Left Rectus Femoris (n=9)	0.04		-24.74%
Right Rectus Femoris (n=9)	0.02		-22.91%
Left Vastus Lateralis Obliques (n=10)	0.025		-26.94%
Right Vastus Lateralis Obliques (n=10)	0.057		-23.18%

<sup>20</sup> Pain and Muscle Activation with Elevate Ski Exo. Roam Robotics. Enlace: <https://www.roamrobotics.com/blog/pain-and-muscle-activation-with-elevate-ski-exo>

<sup>21</sup> Imagen extraída de <https://www.roamrobotics.com/blog/pain-and-muscle-activation-with-elevate-ski-exo>