

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



**PROPUESTA CONCEPTUAL EN EL DISEÑO DE UNA SILLA DE RUEDAS CON  
SISTEMA DE POSICIONAMIENTO BÍPEDO PARA PERSONAS PARAPLÉJICAS**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de Bachillera en Ciencias con mención en  
INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**AUTOR:**

**CAMILO MARCELO CARRETERO KARRETERO**

**ASESOR:**

**DANTE ANGEL ELÍAS GIORDANO**

**Lima, Agosto, 2022**



© 2022, Camilo Marcelo Carretero Karretero  
Se autoriza la reproducción total o parcial,  
Con fines académicos a través de cualquier  
Medio o procedimiento, incluyendo la cita  
Bibliográfica del documento.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación detalla el procedimiento realizado para desarrollar una propuesta de diseño conceptual de una silla de ruedas con posicionamiento bípedo para personas paraplégicas. Utilizando la metodología VDI 2221 de la Norma Alemana se realizó el proceso de investigación, planteamiento y selección necesaria para obtener el diseño conceptual.

Se inició con el planteamiento de la problemática y dificultades que tienen las personas paraplégicas al realizar actividades comunes que no tendría una persona que puede pararse, seguido del estado del arte respectivo para recabar información de dispositivos e investigaciones previas relacionadas al desarrollo o diseño de sillas de ruedas bipedestadoras o similares que simulen el movimiento de una persona al levantarse y mantener dicha posición, así como de la biofísica del ser humano que deberá tomarse en cuenta para el desarrollo del dispositivo.

Con la información recabada se detallaron los requerimientos del dispositivo como geometría, peso o dinámica, junto con la estructura de funciones para controlar, energizar o realizar movimientos mecánicos que deberá seguir el dispositivo. Con ello, se realizó la búsqueda de actuadores tal como el actuador lineal, sensores de voltaje para la batería y otros dispositivos necesarios para desarrollar las matrices morfológicas que distinguen cada propuesta de solución. Destacando el uso de un actuador lineal eléctrico que logrará soportar todo el peso durante el movimiento, el cual junto con un acelerómetro permitirán un mayor control y suavidad a la hora del movimiento del usuario durante el cambio de posición.

Finalmente, se detalló cada una de las propuestas de solución, de las cuales se hizo una evaluación técnica y económica evaluando complejidad, facilidad de uso, ergonomía y costes para obtener una propuesta ganadora. Siendo esta propuesta mejorada y detallada en mayor profundidad en sus uniones, distribución de piezas y componentes para obtener el diseño conceptual que cumpla adecuadamente con los requerimientos y funcionamiento esperado del dispositivo.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	i
ÍNDICE DE TABLAS .....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
INTRODUCCIÓN .....	1
MARCO TEÓRICO.....	3
1.1 Problemática.....	3
1.2 Biofísica de la bipedestación .....	6
1.3 Análisis del movimiento al levantarse.....	8
1.4 Modelo biomecánico en sillas bipedestadoras.....	9
ESTADO DEL ARTE.....	11
2.1 Estado de la tecnología.....	11
2.1.1 Partes esenciales de una silla de ruedas.....	11
2.1.2 Tipos de sillas de ruedas en el mercado .....	13
2.1.3 Desarrollos comerciales y académicos para el alcance de la bipedestación....	17
METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL.....	31
3.1 Requerimientos del sistema .....	31
3.2 Entradas y salidas del sistema.....	36
3.3 Diagrama de Funciones .....	37
3.3 Matrices Morfológicas.....	44
2.4. Conceptos de Solución.....	48
3.4.1. Primer Concepto de Solución .....	49
3.4.2. Segundo Concepto de Solución.....	51
3.4.3. Tercer Concepto de Solución .....	53
3.5. Evaluación técnica y económica.....	54
3.5.1. Evaluación técnica.....	54
3.5.2 Evaluación económica.....	56
PROPUESTA DE DISEÑO CONCEPTUAL .....	59
4.1. Silla de ruedas propuesta .....	59
4.2. Diagrama de operaciones.....	63
4.3. Diagrama de bloques .....	64
4.4. Diagrama de flujo .....	65
CONCLUSIONES .....	67
BIBLIOGRAFÍA .....	68

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Detalle de principales características de los modelos comerciales mencionados .	21
Tabla 2.2. Detalle de las principales características de las investigaciones mencionadas .....	28
Tabla 3.1. Principales medidas antropométricas del usuario para el diseño del sistema .....	32
Tabla 3.2. Requerimientos del sistema. ....	35
Tabla 3.3. Matriz Morfológica – Dominio Mecánico. ....	45
Tabla 3.4. Matriz Morfológica – Dominio Sensores.....	46
Tabla 3.5. Matriz Morfológica – Dominio Control.....	46
Tabla 3.6. Matriz Morfológica – Dominio Actuadores.....	46
Tabla 3.7. Matriz Morfológica – Dominio Eléctrico .....	47
Tabla 3.8. Matriz Morfológica – Dominio Interfaz .....	48
Tabla 3.9. Leyenda de conceptos de solución.....	48
Tabla 3.10. Evaluación técnica de los conceptos de solución propuestos. ....	55
Tabla 3.11. Evaluación económica de los conceptos de solución propuestos. ....	57

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Distribución de causas de discapacidad motora en el Perú. ....	4
Fig. 1.2: Personas con discapacidad de locomoción y/o destreza según grupo de edad. .	4
Fig. 1.3: Proyección de la vertical sobre la tierra que atraviesa al BOS y COM.....	7
Fig. 1.4: Momentos del COM para mantener la posición bípeda y el balance.....	7
Fig. 1.5: Representación del cuerpo humano mediante modelo de tres barras.....	8
Fig. 1.6: Esquema de fuerzas en el cuerpo, sistema bípedo y soportes (plano sagital) ...	9
Fig. 1.7: Angulos de referencia para el modelo estático.....	10
Fig. 2.1: Partes esenciales de una silla de ruedas.....	12
Fig. 2.2: Silla auto asistida cómoda de gama alta.....	13
Fig. 2.3: Silla de ruedas manual con posicionamiento vertical auto asistido. ....	14
Fig. 2.4: SRE con chasis plegable.....	15
Fig. 2.5: Silla manual motorizada y controlada a través de un manillar.....	15
Fig. 2.6: SRE con modelo de chasis fijo.....	16
Fig. 2.7: Modelo de SRE con sistema bípedo y soporte acolchado para rodillas.....	17
Fig. 2.8: Modelo de SRE bipedestadora con soporte cuadrado para las rodillas.....	17
Fig. 2.9: Silla bipedestadora Setonix en funcionamiento. ....	18
Fig. 2.10: Enfoque del sistema de posicionamiento bípedo de la silla Setonix.....	19
Fig. 2.11: Silla Bipedestadora Get Up . ....	19
Fig. 2.12: SRE de bipedestación Oceania de Orthos XXI.....	20
Fig. 2.13: SRE de bipedestación Angel de Comfort.....	20
Fig. 2.14: Sistemas de cuatro barras inferior y superior de la silla de ruedas bípeda.....	22
Fig. 2.15: Silla de ruedas desarrollada en posición bípeda. ....	22
Fig. 2.16: Movimiento entre links del sistema de posicionamiento vertical. ....	23
Fig. 2.17: Movimiento general del todo el sistema al ser accionado por el motor. ....	23
Fig. 2.18: Posiciones parciales del posicionamiento vertical en la silla de rehabilitación. ....	24
Fig. 2.19: Unión del sistema de cuatro barras junto con el mecanismo paralelo.....	24
Fig. 2.20: Funcionamiento del mecanismo de ayuda para la posición bípeda.....	25
Fig. 2.21: Posiciones parada y sentada del usuario del sistema móvil con exoesqueleto. ....	25
Fig. 2.22: Estructura interna del exoesqueleto para mantener la postura. ....	26
Fig. 2.23: Sistema de barras y pivotes encargados de realizar el posicionamiento bípedo..	26
Fig. 2.24: Funcionamiento del sistema mecánico de posicionamiento vertical.....	27
Fig. 2.25: Ubicación de los motores y estructura del sistema bípedo.....	27

Fig. 2.26: Modelamiento completo de la silla junto con su funcionamiento bípedo.....	28
Fig. 2.27: Ubicación del asiento en ambas posiciones con el movimiento del sistema de posicionamiento vertical.....	29
Fig. 2.28: Posición horizontal de la silla de ruedas. ....	30
Fig. 2.29: Posición vertical de la silla de ruedas.....	30
Fig. 3.1: Ubicación de las principales medidas antropométricas del usuario.....	32
Fig. 3.2. Tabla de IMC de acuerdo con la talla y peso .....	33
Fig. 3.3: Black Box del sistema. ....	36
Fig. 3.4: Diagrama de funciones del sistema.....	37
Fig. 3.5: Funciones del dominio mecánico-1ra parte manual.....	38
Fig. 3.6: Funciones del dominio mecánico encargadas el movimiento del sistema.....	38
Fig. 3.7: Funciones del dominio mecánico-2da parte manual .....	38
Fig. 3.8: Dominio de sensores del sistema.....	40
Fig. 3.9: Dominio control del sistema.....	40
Fig. 3.10: Dominio de actuadores del sistema. ....	41
Fig. 3.11: Dominio eléctrico del sistema. ....	42
Fig. 3.12: Dominio interfaz del sistema.....	43
Fig. 3.13: Vistas frontal y lateral del primer concepto de solución. ....	49
Fig. 3.14: Mando de control propuesto para los tres conceptos de solución. ....	49
Fig. 3.15: Vista lateral del sistema del primer concepto de solución en posición bípeda. ....	50
Fig. 3.16: Mecanismo de movimiento (izquierda) y detalle exterior de la caja electrónica (derecha) del primer concepto de solución.....	50
Fig. 3.17: Detalle interno de la caja electrónica del primer concepto de solución. ....	50
Fig. 3.18: Vistas frontal y lateral del segundo concepto de solución. ....	51
Fig. 3.19: Vista lateral del sistema del segundo concepto de solución en posición bípeda. ....	52
Fig. 3.20: Sistema de movimiento (izquierda) y detalle exterior de la caja electrónica (derecha) del segundo concepto de solución.....	52
Fig. 3.21: Detalle interno de la caja electrónica del segundo concepto de solución. ....	52
Fig. 3.22: Sistema de movimiento (izquierda) y detalle exterior de la caja electrónica (derecha) del tercer concepto de solución. ....	53
Fig. 3.23: Detalle interno de la caja electrónica del concepto de solución propuesto. ...	53
Fig. 3.24: Gráfico de la evaluación técnica-económica.....	58
Fig. 4.1: Vista de la propuesta de diseño conceptual en posición bípeda.....	60
Fig. 4.2: Vista lateral de la propuesta de diseño conceptual en posición sentada y bípeda. ....	60

Fig. 4.3: Dibujo de uniones y conexiones de la silla con sistema de posicionamiento bípodo .....	61
Fig. 4.4: Propuesta preliminar del ensamble en placa de uniones con barra de elevación y espaldar.....	62
Fig. 4.5: Detalle exterior de la caja electrónica. ....	62
Fig. 4.6: (a) Vista ampliada del mando con botones y su soporte. (b) Distribución interna de la caja electrónica. ....	63
Fig. 4.7: (a) Diagrama de operaciones para la subida del usuario a la silla. (b) Diagrama de operaciones para el inicio del movimiento y cambio de posición del usuario. (c) Diagrama de operaciones para la bajada del usuario de la silla. ....	64
Fig. 4.8: Diagrama de bloques del sistema .....	65
Fig. 4.9: (a) Diagrama de flujo para el control del movimiento. (b) Diagrama de flujo para el control del nivel de batería. ....	66



## INTRODUCCIÓN

La falta de autonomía en las actividades de la población discapacitada físicamente sigue siendo, hasta la fecha, una de las mayores problemáticas que esta comunidad enfrenta día a día en lo concerniente para establecer una rutina básica y fundamental de todo ser humano. En el Perú, más del 40% de los individuos que padecen alguna discapacidad física necesitan de asistencia externa para poder desenvolverse en trabajos físicos, mentales o laborales [INEI, 2013]. Siendo así que el 50% de esta sección de la población discapacitada se enfrenta ante una realidad donde su calidad de vida se ve obstaculizada por la incapacidad de movilización de sus extremidades inferiores, encontrándose ante la obligación de alguna elemento de asistencia, como una silla de ruedas, lo que conlleva al surgimiento de necesidades fundamentales para este sector vulnerable de la población.

En general, los problemas llegan a ser políticos, debido a la falta de atención por parte de las autoridades a las existentes leyes y normas a favor de las personas con discapacidad en el país<sup>1</sup>; hasta sociales, ya que existen problemas de comunicación y relacionamiento con pares o colegas, al igual que una gran variedad de estigmas sociales. Pero uno de los mayores problemas son las barreras físicas que estos presentan, dado que existe una falta de acceso a diferentes establecimientos, tanto públicos como privados, o la dificultad que conlleva el usar medios de transporte, necesitando una manera de subir y transportar también la silla.

Si bien se han realizado algunos avances para que las personas en silla de ruedas puedan moverse en estas con mayor facilidad, el problema de la dependencia no logra terminar. Ya que los establecimientos siguen estando lejos de conseguir una inclusión que permita al usuario desenvolverse, cosas como alcanzar objetos en gran altitud o alcanzar el aparador de la ventanilla de un banco, son ejemplos cotidianos que aún limitan la independencia del usuario.

Por ello existe el interés de realizar desarrollos que ayuden a las personas que usan sillas de ruedas a poder moverse y desenvolverse de una manera más cómoda, fluida y

---

<sup>1</sup> “Existe estadística realmente dramática respecto a la accesibilidad para discapacitados”. [https://www.youtube.com/watch?v=OEb0DxnILw0&ab\\_channel=TVPer%C3%BANoticias](https://www.youtube.com/watch?v=OEb0DxnILw0&ab_channel=TVPer%C3%BANoticias) 21/04/21

autónoma. A pesar de que en el Perú existe una gran necesidad, hay muy poca inversión y trabajos relacionados con el desarrollo de estos y la gran mayoría son realizados en el extranjero, lo que hace que sea mucho más difícil llegar a adquirirlos.

En consecuencia, se realiza una propuesta de diseño conceptual de una silla de ruedas con un sistema de posicionamiento bípedo que ayude a los usuarios a simular la posición de una postura erecta y le permita una mayor autonomía. Para esto, se elabora el estado del arte sobre la biomecánica de bipedestación, con énfasis en el cambio de la posición sentada a la de pie y viceversa, así como sobre las técnicas y tecnologías relacionadas con mecanismos y sillas de ruedas para bipedestación. Luego, se establecen los requerimientos de diseño y, usando la metodología de diseño VDI 2221 (Norma Alemana) para el desarrollo de sistemas técnicos y productos. Finalmente, se propone el diseño conceptual que cumpla con todos los requerimientos a partir de la propuesta de solución elegida.

Con este trabajo se espera inspirar o servir de guía para futuras exploraciones y trabajos en el ámbito del desarrollo tecnológico del país proporcionando información útil y estructurada, al igual que una estructura de ideas y razonamiento para cualquier persona o grupo de personas que muestren interés en investigación.

## **CAPÍTULO 1**

### **MARCO TEÓRICO**

Por un lado, en el presente capítulo se detalla la problemática a tratar, con datos estadísticos y gráficas, al igual que los problemas de las personas discapacitadas y los usuarios de sillas de ruedas. Por otro lado, se realiza una descripción general de la biomecánica humana necesaria para realizar la bipedestación.

#### **1.1 Problemática**

De acuerdo al Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), el 5,2% de la población en el Perú (1 millón 575 mil personas) presenta algún tipo de discapacidad [INEI, 2013]. De este total, el estudio mostró que la discapacidad relacionada con moverse, caminar y/o usar brazos o piernas es predominante con 932 mil personas (52,9%). Esta limitación permanente incluye: dificultad para caminar dentro o fuera de casa, no mantener el equilibrio y no poder usar las piernas ni los pies para mover o alejar un objeto, entre otras cosas. De este último total, el 56,4% de los afectados son mujeres y el 43,6% restante varones. Además, la Figura 1.1 muestra los porcentajes de causas de discapacidad motora en el país, siendo las causas más predominantes las enfermedades comunes, crónicas y genéticas con un 41%, la edad avanzada con un 33% y los accidentes con un 14% como el tercer causante. Asimismo, en la Figura 1.2 se muestra el resultado de una encuesta acerca del rango de edades de personas en el país que presentan dificultad en locomoción.

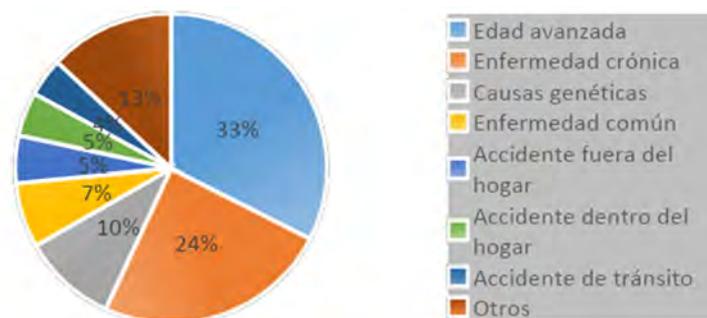


Fig. 1.1. Distribución de causas de discapacidad motora en el Perú. [INEI, 2013]

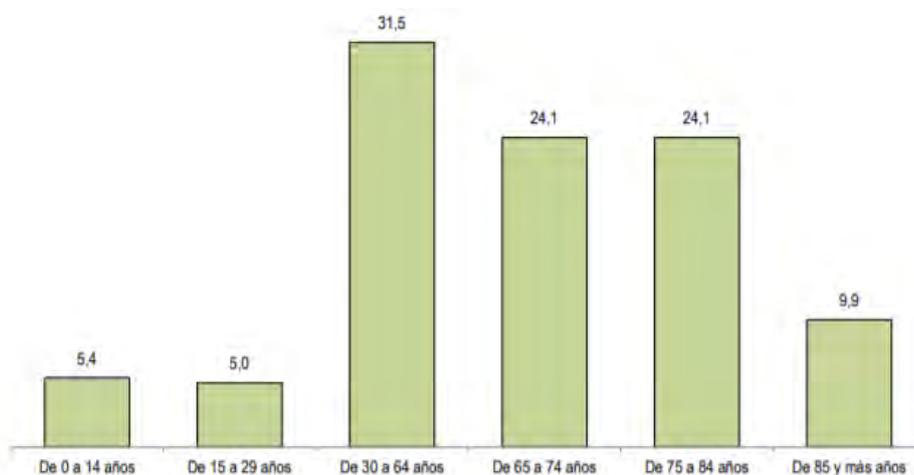


Fig. 1.2: Personas con discapacidad de locomoción y/o destreza según grupo de edad.

Como se puede deducir, más del 31.5% de la población que presenta esta dificultad está entre los 30 a 64 años. Con esto se puede concluir que la gran parte de la población en silla de ruedas en el país son personas adultas o de edad avanzada. Debido a esta información serán considerados como público objetivo de este trabajo junto con el 5,0% de las personas de 15 a 29 años, ya que, si bien no son mayoría, también son beneficiarios y posibles usuarios del diseño a desarrollar al poseer el nivel de madurez mínimo necesario para la complejidad del sistema. Cabe resaltar que este dispositivo será dirigido solo a personas paraplégicas, es decir, aquellas que solo presenten imposibilidad para movilizar los miembros inferiores.

La misma necesidad de utilizar una silla de ruedas desemboca en el surgimiento de otras más y al ser cada persona distinta como individuo, estas también son bastante variadas. Algunos de estos requisitos son: adecuarse al usuario, ya sea a sus patologías, tamaño, peso o maniobrabilidad, el confort siendo uno de los más importantes al igual que la buena postura y la facilidad para ser transportada. También debe ser estable y brindar seguridad

al usuario, tanto física como psicológicamente, para que este se sienta confiado usando este equipo y no pierda el control [Armstrong, 2008].

De la misma forma, también surgen muchos otros problemas para el usuario de silla de ruedas. Uno de los mayores limitantes son las barreras económicas y políticas, ya que el 80% de las personas con discapacidad viven en países con bajos ingresos donde rara vez se cuenta con financiamiento público para el suministro de sillas de ruedas, por lo que muchas personas no logran acceder a una. Además, solo el 9.8% de las personas con discapacidad tienen conocimiento acerca de las normas que están a favor de estas [INEI, 2012]. Pero el mayor problema que suelen tener son las barreras físicas, ya que no basta con el simple hecho de conseguir una silla de ruedas porque, muchos usuarios, al vivir en la pobreza, residen en casas pequeñas, lugares inaccesibles, lugares donde el pavimento no es uniforme o inexistente [Armstrong, 2008].

Asimismo, está la falta de acceso que tienen a determinados centros, como bancos, edificios públicos, restaurantes y demás, generando dependencia en los usuarios de sillas de ruedas. Además, hasta hechos de la vida cotidiana como alcanzar objetos a los que una persona podría llegar parada, se vuelve una tarea imposible o riesgosa sin la ayuda de un acompañante.

En el país, según el INEI, el 29,3% de las personas con discapacidad tienen problemas para ingresar a centros de salud, el 18% a bancos o entidades financieras, el 17,5% a oficinas públicas, entre otros [INEI, 2013]. Asimismo, el INEI registró en el 2013 que el 40,6% de las personas con discapacidad dependen de una persona para realizar sus actividades diarias, siendo algunos de estos los cónyuges, padres, hijos o no parientes. Las actividades en las que se da este tipo de dependencia son: los quehaceres del hogar con 46,7%, trabajar y estudiar con 31,6% y atender el negocio con 4,5%.

Por lo tanto, se puede concluir que los usuarios de silla de ruedas presentan una gran necesidad de independencia en sus labores rutinarias. La cual puede disminuirse permitiendo alcanzar posiciones como la bipedestación gracias al desarrollo de la tecnología que los ayuda a moverse. Además, se denota la falta de inversión en el Perú en temas de salud, desarrollo y disponibilidad de tecnologías de apoyo para los usuarios,

al igual que políticas y normativas de inclusión en las ciudades para las personas discapacitadas.

## 1.2 Biofísica de la bipedestación

La bipedestación se puede definir como la acción o situación de mantenerse erguido sobre dos pies, siendo esta posición erecta una característica debido al sentido que tiene de la situación en el espacio o al equilibrio. Para que esta posición logre realizarse, intervienen diversos factores como la información visual, vestibular y propioceptiva de la posición del cuerpo, una alineación biomecánica correcta, fuerza suficiente en los músculos y coordinación para la activación de estos [Luengas, 2013].

Con el fin de poder mantener el equilibrio, el cual evita las caídas, el sistema de control del cuerpo mantiene su centro de masa (COM, *Center of Mass*) sobre la base de apoyo (BOS, *Base of Support*), siendo esta última el área de contacto mínima entre el suelo y el cuerpo. Todo esto se mantiene gracias al equilibrio entre las fuerzas musculares anti gravitatorias y la gravedad [Luengas, 2013].

Por el hecho de que se necesita mantener siempre el COM sobre el BOS para mantener la postura erecta, es que se considera al proceso de control postural como un proceso de estabilidad dinámica [Luengas, 2013]. Pudiéndose modelar a este como un movimiento oscilatorio al igual que un péndulo en donde, debido a perturbaciones externas e internas, el cuerpo humano varía la posición de su COM hacia adelante y hacia atrás de la línea perpendicular proyectada desde el área de contacto del BOS y el suelo [Winter, 1995], como se muestra en la Figura 1.3.



Fig. 1.3: Proyección de la vertical sobre la tierra que atraviesa al BOS y COM. [Luengas, 2013]

A este movimiento oscilatorio, Winter [1995] lo divide en cinco momentos en los que el COM presenta diferentes posiciones para mantener la postura bípeda (Figura 1.4).

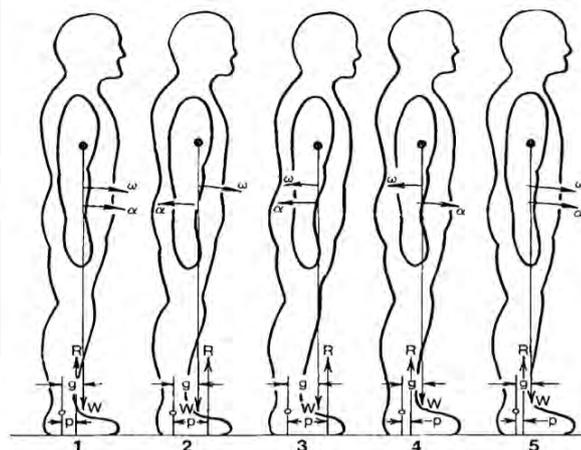


Fig. 1.4: Momentos del COM para mantener la posición bípeda y el balance. [Winter, 1995]

- Momento 1: Empieza con una perturbación que mueve el COM, junto con todo el cuerpo hacia adelante donde su velocidad angular ( $\omega$ ) y aceleración angular ( $\alpha$ ) están en el mismo sentido.
- Momento 2: Debido a las fuerzas musculares en las piernas y los movimientos de los dedos de los pies, la aceleración angular del movimiento del COM cambia de sentido y lo desacelera pivotando en el tobillo.
- Momento 3: Cambia el sentido de la velocidad angular del COM y toma el mismo que el de su aceleración, haciendo que este mueva en la dirección contraria.

- Momento 4: Al igual que en el momento 2, la aceleración cambia de sentido para desacelerar el movimiento.
- Momento 5: Se retorna al estado inicial del momento 1 y se repite el proceso de estabilidad dinámica.

### 1.3 Análisis del movimiento al levantarse

También es necesario analizar la dinámica del movimiento que realiza la persona al momento de levantarse, ya que la propuesta de solución busca simular este proceso. Para ello, se modeló el cuerpo humano como un sistema de tres barras rígidas con tres grados de libertad y con tres articulaciones, las cuales representan la articulación del tobillo, el centro de masa de la cadera y de las rodillas [Shi, 2019]. Además, también se le asignan coordenadas a la articulación del hombro para calcular su posición durante el movimiento.

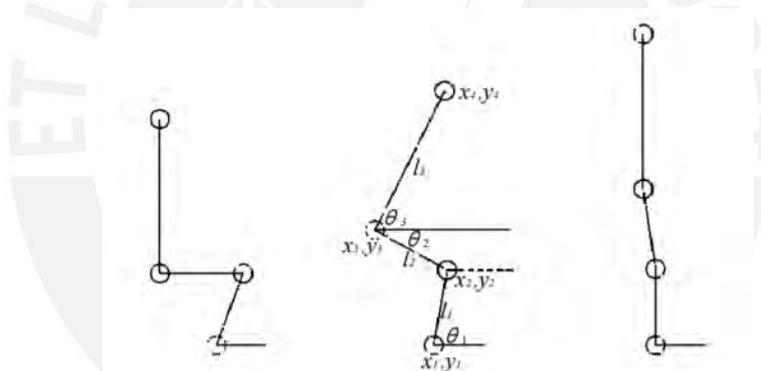


Fig. 1.5: Representación del cuerpo humano mediante modelo de tres barras. [Shi, 2019]

Como se muestra en la Figura 1.5, cada unión, que representa a una articulación necesaria para que la persona pueda levantarse, tiene variables asignadas para poder calcular su posición en todo momento con el método vectorial, como si fuera un mecanismo. Las Ecuaciones 1.1 a 1.3 representa las ecuaciones, en el plano sagital, para la ubicación de la rodilla, la cadera y el hombro en el movimiento, respectivamente, respecto de un sistema de referencia absoluto (inercial).

$$\begin{cases} x_2 = x_1 + l_1 \cos \theta_1 \\ y_2 = y_1 + l_1 \sin \theta_1 \end{cases} \quad (1.1)$$

$$\begin{cases} x_3 = x_1 + l_1 \cos \theta_1 - l_2 \cos \theta_2 \\ y_3 = y_1 + l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (1.2)$$

$$\begin{cases} x_4 = x_1 + l_1 \cos \theta_1 - l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_3 \\ y_4 = y_1 + l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_3 \end{cases} \quad (1.3)$$

#### 1.4 Modelo biomecánico en sillas bipedestadoras

Un factor que también es necesario en tomar en cuenta es el comportamiento de las fuerzas originadas cuando un cuerpo entra en contacto con una silla de ruedas que tiene un sistema de posicionamiento vertical. Siguiendo una forma sumamente básica y simplificada, el sistema de silla bípoda-usuario puede modelarse como un sistema cuasi-estático [Cooper, 1995]. Gracias a esto se pueden utilizar sistemas de fuerzas y momentos simples para analizar las fuerzas en ambos ejes desde un punto de vista sagital, tal como se puede observar en la Figura 1.6.

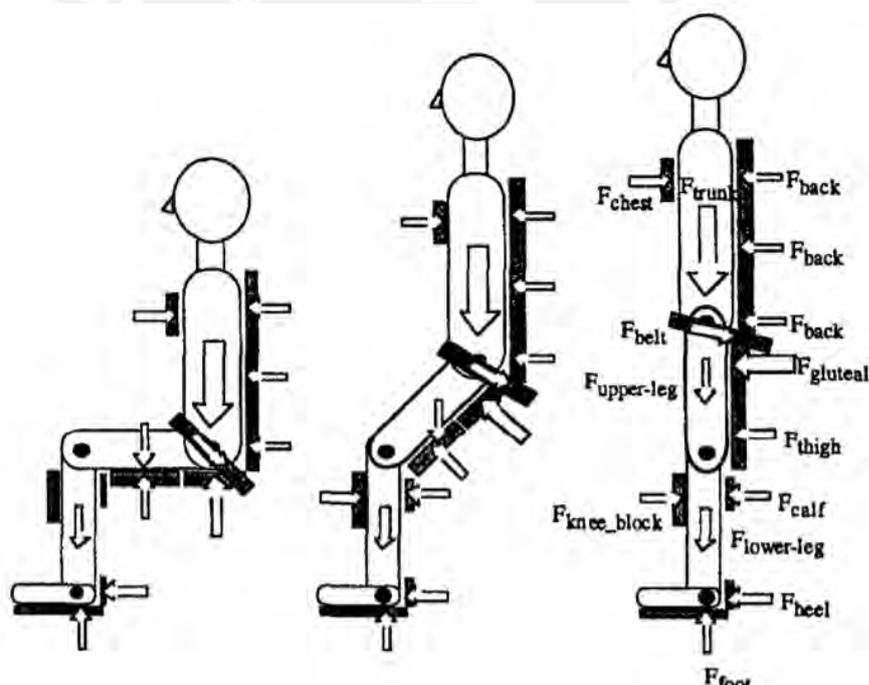


Fig. 1.6: Esquema de fuerzas en el cuerpo, sistema bípodo y soportes (plano sagital) [Cooper, 1995].

El sistema puede ser fácilmente resuelto utilizando los ángulos referenciales en la Figura 1.7 y realizando algunas simplificaciones como descartar fuerzas cortantes entre el cuerpo y los sistemas de soporte de la silla, al igual que asumir que el usuario no puede generar momentos en las articulaciones. Además, se pueden obtener las fuerzas de la rodilla y el asiento asumiendo como nulo el peso del soporte de la cadera y que las fuerzas del soporte del pecho y el espaldar se anulan mutuamente [Cooper, 1995].

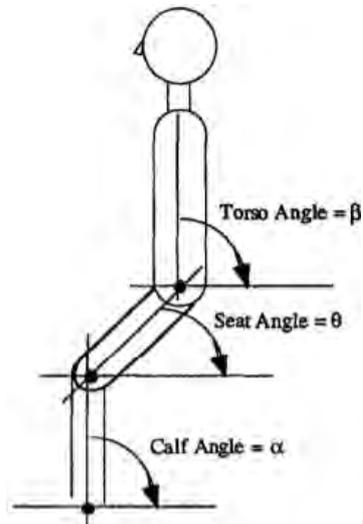


Fig. 1.7: Angulos de referencia para el modelo estático [Cooper, 1995].

Entonces, aplicando equilibrio estático, Cooper [1995] propuso las Ecuaciones 1.4 a 1.6.

En el tobillo:

$$\begin{aligned} \text{En x: } F_{\text{heel}} - F_{\text{ankle}} \cos\alpha &= 0 \\ \text{En y: } 0.43 * M_{\text{lower\_leg}} g + F_{\text{ankle}} \text{sen}\alpha &= F_{\text{foot}} \end{aligned} \quad (1.4)$$

En la rodilla:

$$\begin{aligned} \text{En x: } F_{\text{ankle}} \cos\alpha - F_{\text{knee}} \cos\theta + F_{\text{knee\_block}} &= 0 \\ \text{En y: } F_{\text{ankle}} \text{sen}\alpha + F_{\text{knee}} \text{sen}\theta &= 0.57 * M_{\text{lower\_leg}} g + 0.44 * M_{\text{upper\_leg}} g \end{aligned} \quad (1.5)$$

En la cadera:

$$\begin{aligned} \text{En x: } F_{\text{knee}} \cos\theta - F_{\text{hip}} \cos\beta &= 0 \\ \text{En y: } F_{\text{knee}} \text{sen}\theta + F_{\text{hip}} \text{sen}\beta &= 0.56 * M_{\text{upper\_leg}} g + M_{\text{trunk}} g \end{aligned} \quad (1.6)$$

## **CAPÍTULO 2**

### **ESTADO DEL ARTE**

En este segundo capítulo, continuando con la metodología, se mencionan tecnologías comerciales y en desarrollo, así como artículos académicos, que al igual que toda la información recopilada anteriormente, serán de utilidad para determinar los requerimientos de diseño.

#### **2.1 Estado de la tecnología**

En el presente apartado es necesario entrar en más detalle acerca de las partes esenciales de una silla de ruedas, así como una breve distinción entre sillas auto asistidas y eléctricas. Por último, se realiza un repaso a través de las tecnologías comerciales e investigaciones que serán de utilidad para el desarrollo del trabajo.

##### **2.1.1 Partes esenciales de una silla de ruedas**

Según Armstrong, en el manual realizado para la OMS [2008], en el diseño de una silla se deben considerar los siguientes elementos:

- I. Manillas de propulsión: En caso de que el usuario no pueda mover la silla por sí mismo o necesite ayuda para ciertos tipos de caminos o lugares empinados.
- II. Ruedas traseras: Aquellas que aportan la fuerza y velocidad en el movimiento de la silla.

- III. Rebotes para empujar: Aros que se encuentran en la parte exterior a las ruedas traseras que permiten al usuario sostenerlas para impulsarse y moverse de manera autónoma (usado principalmente en sillas auto asistidas).
- IV. Frenos: Encargados de detener y mantener estable y segura la silla en caso de que se requiera.
- V. Ruedas orientales: Ruedas encargadas de dar dirección a la silla durante su movimiento, permitiendo el giro y un apoyo delantero.
- VI. Espaldar: Sostiene la espalda del usuario y está adaptada para que este mantenga una correcta postura durante su uso.
- VII. Apoya brazo: Sostienen los brazos del usuario y permiten que estos descansen.
- VIII. Cojín: Mantiene el confort y ayuda a la buena postura del usuario, dependiendo de la necesidad que presente, sosteniendo la parte inferior donde este apoya los glúteos y los muslos.
- IX. Asiento: Sostiene el cojín y el peso de la persona utilizando la silla de ruedas.
- X. Armazón: Estructura de la silla en la que se usen todas las demás piezas y soporta todas las cargas realizadas a esta.
- XI. Correa de pantorrilla: Sostiene las piernas del usuario ya que estas se ubican con un cierto ángulo de inclinación respecto al suelo.
- XII. Pisaderas (apoya pies): Sostiene los pies del usuario, evitando que estos cuelguen, arrastren o se lastimen durante el movimiento de la silla.

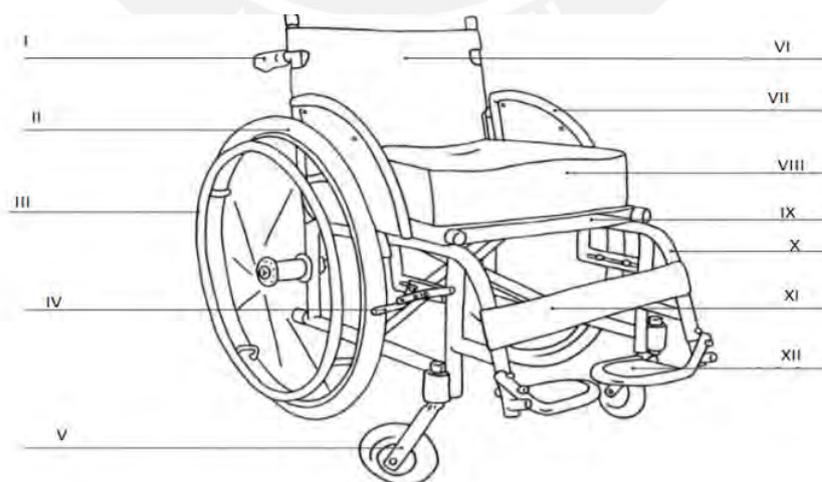


Fig. 2.1: Partes esenciales de una silla de ruedas. [Armstrong, 2008]

### 2.1.2 Tipos de sillas de ruedas en el mercado

Actualmente existen diferentes tipos de sillas de ruedas con distintos ajustes y funcionalidades para el usuario. Entre estos, las más comunes son la patología del usuario, las actividades que este realiza, el entorno en el cual este se desenvuelve, el poder adquisitivo, el acceso que la persona a determinados productos, entre otros. Pero en resumen pueden catalogarse como dos grandes tipos, las sillas auto asistidas y las eléctricas, quienes tienen como principal distinción el cómo impulsan su movimiento.

Las sillas auto asistidas, en su mayoría, son aquellas que poseen un chasis de acero cromado o lacrado. Su característica principal es el método de propulsión, el cual es realizado por el propio usuario utilizando los rebotes para empujar, los cuales están ubicados en la parte exterior de las ruedas traseras, las que suelen tener alrededor de 600 mm de diámetro. Además, estas cuentan con ruedas delanteras de 130-200 mm de diámetro, que se encargan de dar la dirección del movimiento a la silla [Gorgues, 2005].

Dependiendo de la gama de la silla (Figura 2.2), estas suelen tener distintas funciones, características y/o accesorios que mejoran la experiencia del usuario, como el hecho de ser fácilmente plegables, reposapiés retirables, mayor número de cojines, capacidad de reclinar el espaldar y hasta sistemas manuales de posicionamiento vertical como se puede observar en la Figura 2.3 [Guillon, 2009].



Fig. 2.2: Silla auto asistida cómoda de gama alta. [Guillon, 2009]



Fig. 2.3: Silla de ruedas manual con posicionamiento vertical auto asistido. [Guillon, 2009]

Por otro lado, las sillas eléctricas pueden dividirse en: silla de ruedas eléctrica (SRE) con chasis fijo, con chasis plegable, motorizados eléctricos para sillas manuales y scooters eléctricos, pero las SRE con chasis fijo son las más comunes en el mercado [Guillon, 2009]. Cabe destacar que todos los modelos de esta categoría se distinguen por el hecho de ser impulsados mediante motores que les proporcionan la potencia necesaria a las ruedas traseras, siendo la velocidad y dirección controladas de manera eléctrica por el usuario.

Las SRE plegables (Figura 2.4), si bien pueden ser compactadas para realizar su traslado, en su mayoría son difícilmente desmontables, incluso muchos usuarios aseguran que apenas consiguen lograr el desmontaje. Al tratar de ser lo más transportables posible se sacrifica en la capacidad de sus componentes para reducir el peso, lo que genera en una carencia de autonomía por solo llegar hasta los 10-25 km por carga. En cambio, las sillas manuales motorizadas (Figura 2.5), que padecen de los mismos problemas, son más fáciles de transportar porque solo tienen la parte motorizada agregada, la cual es fácilmente separable [Guillon, 2009].



Fig. 2.4: SRE con chasis plegable. [Guillon, 2009]



Fig. 2.5: Silla manual motorizada y controlada a través de un manillar. [Guillon, 2009]

Por otro lado, las SRE de chasis fijo son más pesadas (alrededor de los 100kg), pero al ser más robustas brindan mayor seguridad, estabilidad, permiten agregar más componentes y funcionalidades extra como la reclinación del respaldo, elevador eléctrico del asiento y demás. En adición, estas poseen la autonomía necesaria por carga al permitir 20-40 km de recorrido. Este modelo de silla, al ser controlado eléctricamente posee ruedas traseras más pequeñas que realizan el movimiento y ruedas delanteras de tracción que ayudan a dirigirlo. Como mayor desventaja está el hecho de ser difícilmente transportables y la dificultad que estas tienen para franquear obstáculos [Guillon, 2009]. En la Figura 2.6 se muestra un modelo básico y estándar de SRE con chasis fijo.



Fig. 2.6: SRE con modelo de chasis fijo<sup>2</sup>

Adicionalmente, debido a la gran robustez que tienen este tipo de SRE, es que se pueden implementar funciones más complejas o con requerimientos más avanzados. Siendo este el caso del posicionamiento bípedo o vertical, todas con un sistema bastante similar, en el que el usuario se sostiene en los reposabrazos, el asiento y respaldar son levantados mediante barras rígidas que se despliegan realizando una ligera rotación. En la zona inferior de estas sillas, los apoyas pies son unidos para que el usuario pueda apoyarlos como una plataforma y para evitar la caída se tiene un soporte a la altura de las rodillas que las sostiene y evita la flexión de las piernas. Ver Figura 2.7 y 2.8.

---

<sup>2</sup> Silla de ruedas eléctrica R320. Ortopedia MIMAS. <https://www.ortopediamimas.com/movilidad/sillas-de-ruedas-electricas/4939-silla-de-ruedas-electrica-r320.html> 15/04/21



Fig. 2.7: Modelo de SRE con sistema bípedo y soporte acolchado para rodillas<sup>3</sup>



Fig. 2.8: Modelo de SRE bipedestadora con soporte cuadrado para las rodillas<sup>4</sup>.

### 2.1.3 Desarrollos comerciales y académicos para el alcance de la bipedestación

El interés por simular la bipedestación en los usuarios de sillas de ruedas viene siendo objetivo de desarrollo de muchas empresas y estudios académicos a lo largo del tiempo,

<sup>3</sup> Silla bipedestadora Storm. RehaCare. <https://www.rehacare.cl/shop/muller/sillas-electricas/silla-de-rueda-storm-bipedestadora/> 15/04/21

<sup>4</sup> SRE bipedestadora Innova 901. Innova Ingeniería. <http://www.sillasderuedas.pe/sillas-de-ruedas-innova/innova-901/> 15/04/21

tanto que existen actualmente diseños y avances de sillas de ruedas bípedas correctamente funcionales que servirán de guía para el desarrollo de este proyecto.

#### **a) Sillas de ruedas comerciales con bipedestación**

En lo comercial, existen empresas como Loh Medical [2019], en donde se encargan del desarrollo de distintos tipos de sillas de ruedas, estando entre estas la silla bipedestadora Setonix. Este modelo es una silla auto asistida, la cual posee un sistema eléctrico de posicionamiento vertical, la cual funciona con un motor que activa un émbolo que a su vez impulsa un cilindro unido a la parte inferior del asiento y esto le permite subir. El asiento se encuentra pivotado por su parte delantera a ambos lados de la silla, lo que le permite girar al momento de ser elevado por el cilindro.

Como sistema de seguridad tiene una cinta que rodea toda la parte abdominal para sostener al usuario y evitar que este se incline hacia adelante. El sistema de posicionamiento vertical es activado mediante dos botones ubicados en un mando de control junto a la silla (Ver Figura 2.9 y 2.10).



Fig. 2.9: Silla bipedestadora Setonix en funcionamiento<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Silla Bipedestadora Setonix. Loh Medical. <https://colombia.lohmedical.com/p/silla-bipedestadora-setonix/> 17/04/21



Fig. 2.10: Enfoque del sistema de posicionamiento bípedo de la silla Setonix. [Loh Medical, 2019]

Asimismo, la empresa Kiron tiene un modelo bastante similar (Ver Figura 2.11), pero el soporte de seguridad superior puede ponerse en forma de chaleco y en los reposa pies también hay una cinta de velcro que mantiene los pies firmes sobre el apoyo. Además tiene como soporte extra una cinta gruesa y acolchada que se ubica justo debajo de las rodillas para evitar que estas se doblen hacia adelante por el peso del usuario<sup>6</sup>.



Fig. 2.11: Silla Bipedestadora Get Up <sup>7</sup>.

En el mercado actual también existen sillas de ruedas completamente eléctricas que poseen un sistema de posicionamiento bípedo, el cual tiene un funcionamiento bastante similar, pero aprovecha la robustez de las mismas para realizar una mejor distribución del

<sup>6</sup> Review Get Up. [https://www.youtube.com/watch?v=HqEF5EAmyw&ab\\_channel=KIR%C3%93NStore](https://www.youtube.com/watch?v=HqEF5EAmyw&ab_channel=KIR%C3%93NStore) 17/04/21

<sup>7</sup> Silla Bipedestadora Get Up. Kiron store. [https://kironstore.com/getup/#iLightbox/gallery\\_image\\_1/3](https://kironstore.com/getup/#iLightbox/gallery_image_1/3) 17/04/21

peso. Empresas como Orthos XXI (Figura 2.12) o Comfort (Figura 2.13) tienen a su disposición modelos de SRE con sistemas de posicionamiento vertical logrando hacer que cualquier movimiento de la silla sea completamente eléctrico.



Fig. 2.12: SRE de bipedestación Oceania de Orthos XXI<sup>8</sup>.



Fig. 2.13: SRE de bipedestación Angel de Comfort<sup>9</sup>

De la misma forma que en modelos anteriores, los asientos de estas sillas son elevados con cilindros impulsados con un embolo y un motor, con la diferencia que en este caso son dos cilindros ubicados a en los dos extremos del asiento. De esta forma se distribuye

<sup>8</sup> Silla de ruedas eléctrica Ocenia. Ortopedia Mimas. <https://www.ortopediamimas.com/ortopedia-infantil/sillas-de-ruedas-electricas-infantiles/6055-silla-de-ruedas-electrica-de-bipedestacion-oceania.html#Caracteristicas-tecnicas> 17/04/21

<sup>9</sup> Silla de ruedas eléctrica Angel. Comfort. [http://www.comfort-mobility.com/es\\_product\\_detail.php?fcid=138&scid=168&cid=638](http://www.comfort-mobility.com/es_product_detail.php?fcid=138&scid=168&cid=638) 17/04/21

mejor el peso del usuario y da la posibilidad de regular las diferentes posiciones sentadas. Además estas cuentan con sistema de seguridad de cinturones que se posicionan a cada lado del torso para mantenerlo pegado al respaldar<sup>10</sup>, incluso en el modelo de Orthos XXI se tiene soporte en las rodillas acolchados para cada pierna.

Tabla 2.1. Detalle de principales características de los modelos comerciales mencionados

	Sillas Bipedadoras			
	Silla Setonix	Silla Get Up	Silla Oceania	Silla Angel
Tipo de propulsión de la silla	Auto asistido	Auto asistido	SRE	SER
Accionamiento y control del sistema bípedo	Eléctrico	Eléctrico	Eléctrico	Eléctrico
Duración de la batería	7 días	3 a 5 días	-	-
Material de la estructura	Acero	Acero-carbono	Acero	Acero
Peso de levante	120kg	125kg	100kg	135-160kg
Soportes de seguridad	Rodillas y torso	Rodillas, torso y pies	Rodillas y torso	Rodillas y torso

### b) Sillas de rueda en desarrollo con bipedestación

Por el lado de la investigación académica, se han realizado numerosos avances con diseños sistemas bípedos o similares bastante variados para todo tipo de usuario de silla de ruedas, al igual que con diferente activación, tanto mecánica como eléctrica.

El modelo de silla de ruedas bípeda desarrollado por R. Churchward [1985], el cual posee un sistema de posicionamiento vertical completamente mecánico, un sistema de cuatro barras para mover la parte superior de asiento y espaldar, y un sistema para mover los soportes para pies. Como se puede observar en la Figura 2.14, el sistema de cuatro barras inferior es el encargado de permitir el posicionamiento del soporte de pies debajo del asiento para poder lograr la posición vertical. Luego el sistema superior se encarga de girar el asiento, mientras que el espaldar desliza a la vez para nivelarse con la altura de la espalda del usuario.

Además, al ser todo completamente mecánico, este sistema posee dos manijas, en el reposabrazos derecho se encuentra la encargada de mover la posición del reposapiés al ser girada, mientras que la izquierda realiza el movimiento para conseguir la posición bípeda de

<sup>10</sup> Silla de ruedas eléctrica Angel. Comfort. [http://www.comfort-mobility.com/es\\_product\\_detail.php?fcid=138&scid=168&cid=638](http://www.comfort-mobility.com/es_product_detail.php?fcid=138&scid=168&cid=638)  
17/04/21

la silla. Adicionalmente, como se muestra en la Figura 2.15, el usuario posee un sistema de seguridad que consta de un arnés para la parte superior del cuerpo junto con un soporte para las rodillas y evitar que estas doblen [Churchward, 1985].

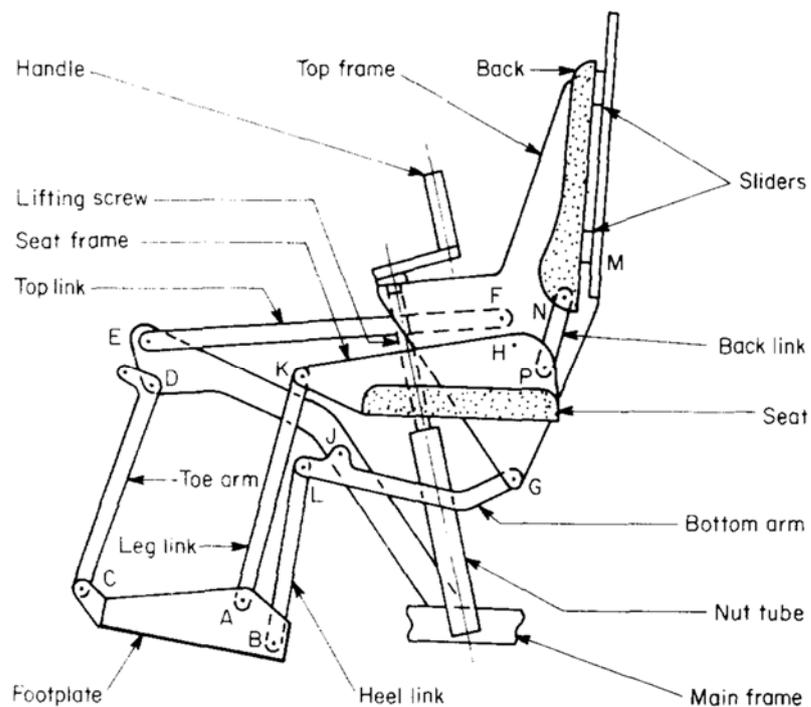


Fig. 2.14: Sistemas de cuatro barras inferior y superior de la silla de ruedas bípoda. [Churchward, 1985]



Fig. 2.15: Silla de ruedas desarrollada en posición bípoda. [Churchward, 1985]

Groher desarrolló el diseño y modelamiento de una silla reconfigurable con función para pararse y sentarse para un niño con discapacidad [Goher, 2013]. Esta propuesta tiene un sistema de posicionamiento vertical que se basa principalmente en dos enlaces a cada lado de la silla, el primero se encuentra unido a una base inferior donde gira relativamente respecto a esta. El segundo enlace se encuentra unido por su extremo inferior a la parte superior del primero, mientras que su unión superior se encuentra adherida debajo del asiento en la zona posterior. Esta unión es accionada por un motor en el primer enlace, lo que genera el movimiento entre ellos como se observa en la Figura 2.16 y el movimiento general como en la Figura 2.17.



Fig. 2.16: Movimiento entre links del sistema de posicionamiento vertical. [Goher, 2013]

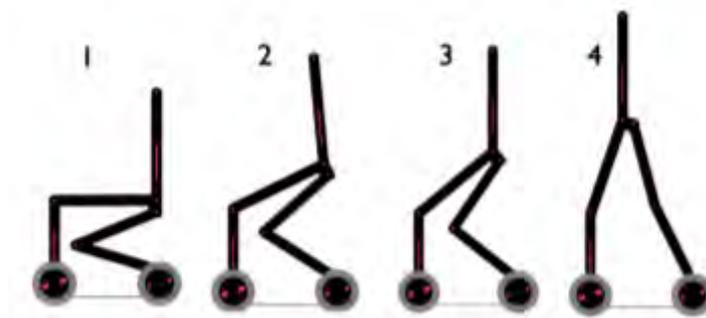


Fig. 2.17: Movimiento general del todo el sistema al ser accionado por el motor. [Goher, 2013]

Al ser este un dispositivo destinado principalmente a la rehabilitación, cuenta con un sistema de seguridad que consta de correas superiores en la zona del torso, las cuales se encargan de mantener el cuerpo del usuario seguro y “pegado” al respaldar de la silla, casualmente durante los movimientos parciales que se realizan hasta alcanzar la posición vertical, como se muestra en la Figura 2.18 [Goher, 2016].

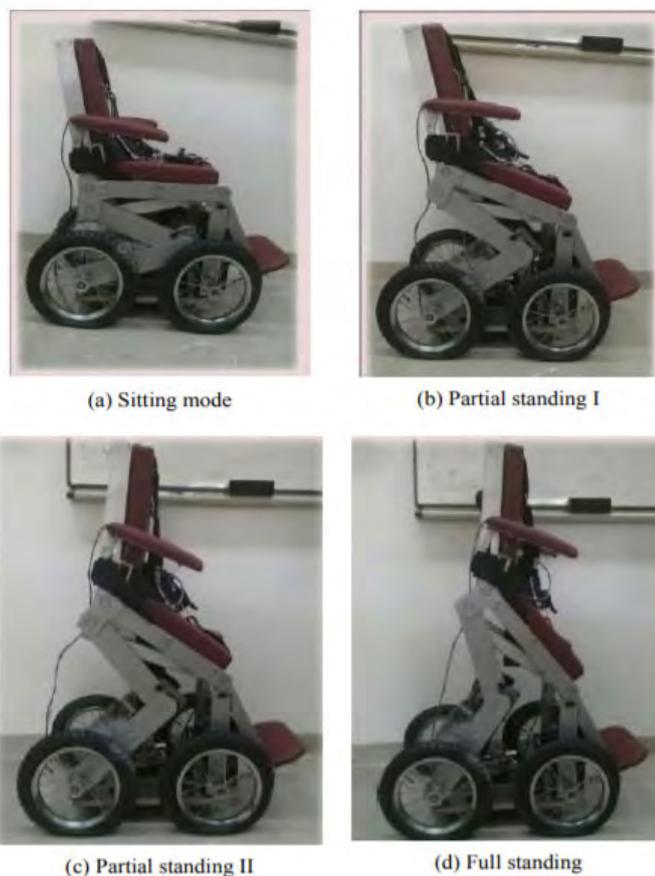


Fig. 2.18: Posiciones parciales del posicionamiento vertical en la silla de rehabilitación. [Goher, 2016]

Un proyecto con sistema vertical de ayuda es el diseño de una silla de ruedas que asista a los ancianos al bajar las escaleras y a pararse [Jiang, 2019]. El sistema se basa en la unión de un sistema de cuatro barras con un sistema paralelo, como se muestra en la Figura 2.19, en donde la barra AC controla el movimiento girando en sentido de las agujas del reloj (siendo pivotado en A). El movimiento generado por esta barra eleva la parte posterior de la silla (asiento y espaldar) y ayuda al usuario a pararse sin tener que realizar un esfuerzo completo [Jiang, 2019]. Ver Figura 2.20.

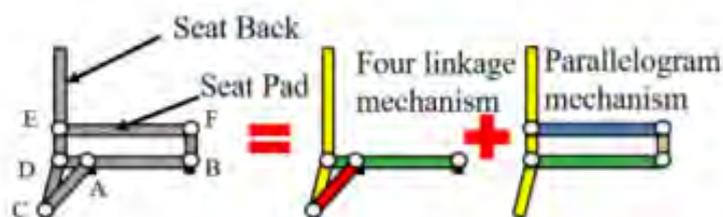


Fig. 2.19: Unión del sistema de cuatro barras junto con el mecanismo paralelo. [Jiang, 2019]



Fig. 2.20: Funcionamiento del mecanismo de ayuda para la posición bípeda. [Jiang, 2019]

Asimismo, también se presenta el diseño de un vehículo de movimiento bípedo en donde se utiliza un exoesqueleto para realizar los cambios de posición del usuario [Eguchi, 2013]. Este se basa en una plataforma con cuatro ruedas, siendo las delanteras más grandes en comparación con las traseras, y un exoesqueleto que mantiene al usuario erguido, el cual está unido a este mecanismo con unos cinturones abdominales como se muestra en las Figura 2.21.



Fig. 2.21: Posiciones parada y sentada del usuario del sistema móvil con exoesqueleto. [Eguchi, 2013]

En el exoesqueleto se hace uso de resortes de gas (ver Figura 2.22), los cuales se encargan de generar el momento necesario para que el usuario pueda mantenerse en cualquiera de las dos posiciones. Estos resortes de gas se encargan de generar momento en el tobillo y la rodilla para modular la postura, la cual cambia de acuerdo a como la persona que lo maneja desee. El cambio de posición empieza cuando el usuario genera momentos superiores a los designados mediante mediciones iniciales de acuerdo a sus características. Siendo así, para pararse es necesario realizar una inclinación del torso

hacia adelante y para sentarse es necesaria una inclinación hacia atrás. Además, existe un soporte individual que se ubica debajo de cada rodilla, con esto evita que se doblen con el peso del cuerpo y con ello, la caída del usuario, mientras que una plataforma se apoya en los glúteos de la persona [Eguchi, 2013].



Fig. 2.22: Estructura interna del exoesqueleto para mantener la postura. [Eguchi, 2013]

A continuación se detalla el mecanismo presentado por Gautam Dawar y otros [2020], quienes diseñaron una silla con sistema bípedo completamente mecánico que se activa a través de una fuerza vertical aplicada a los reposabrazos usando los brazos del usuario. El sistema se basa en una simple unión de mecanismos de barras que pivotean unos respecto a otros para que el asiento logre subir (Figura 2.23), además de agregar resortes de gas para que el usuario pueda elevarse fácilmente.

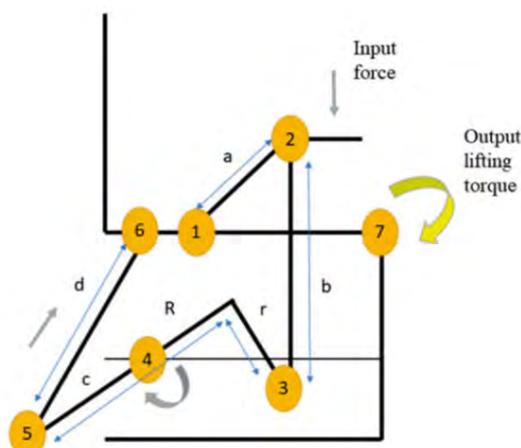


Fig. 2.23: Sistema de barras y pivotes encargados de realizar el posicionamiento bípedo. [Dawar, 2020]



Fig. 2.24: Funcionamiento del sistema mecánico de posicionamiento vertical. [Dawar, 2020]

Finalmente, se tiene el diseño de una silla completamente eléctrica, al igual que su sistema bípedo, siendo este desarrollado teniendo como público objetivo la población de Indonesia que necesite rehabilitación o evitar problemas de sedentarismo prolongado en una silla de ruedas. La silla cuenta con dos motores DC encargados de generar el movimiento hacia adelante, atrás y los giros. Además, en el sistema de posicionamiento vertical se tiene un motor lineal ubicado entre la base y la parte posterior del asiento (Figura 2.25). Este motor, con una capacidad de extensión de 12.5 cm, es el encargado de iniciar el movimiento de posicionamiento bípedo, mientras que un sistema de dos barras a cada lado del asiento sigue el movimiento (ver Figura 2.26), soportando las fuerzas y manteniendo la estabilidad [Putra, 2017].

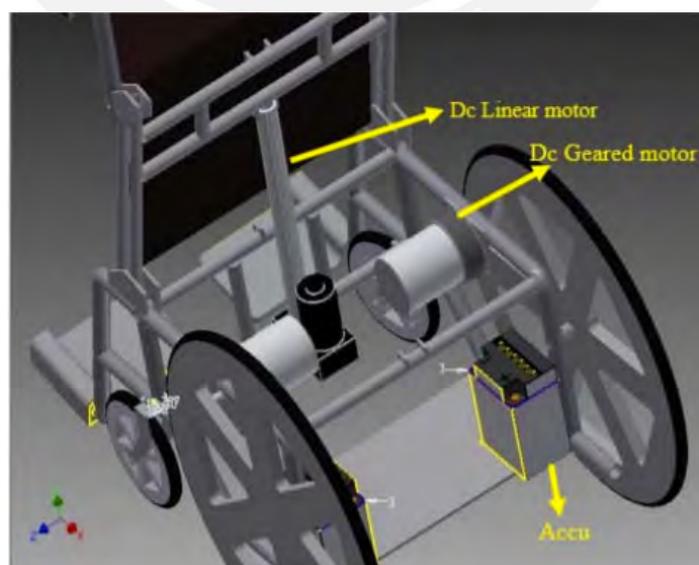


Fig. 2.25: Ubicación de los motores y estructura del sistema bípedo. [Putra, 2017]



Fig. 2.26: Modelamiento completo de la silla junto con su funcionamiento bípedo. [Putra, 2017]

Tabla 2.2. Detalle de las principales características de las investigaciones mencionadas

	<b>Churchward</b>	<b>Goher</b>	<b>Jiang</b>	<b>Eguchi</b>	<b>Dawar</b>	<b>Putra</b>
Tipo de accionamiento del sistema	Manual-Mecánico	Eléctrico	Eléctrico	Eléctrico	Manual-Mecánico	Eléctrico
Sistema utilizado para el movimiento vertical	Sistema de barras y manijas	Sistema de barras	Sistema de 4 barras + mecanismo paralelo	Sistema de barras y resortes de gas	Sistema de barras	Sistema de barras y un resorte de gas

### c) Sillas de rueda patentadas con bipedestación

En búsqueda de guías útiles para el diseño de un sistema que sea lo más óptimo posible, se debe tener en cuenta documentos como patentes que demuestran desarrollos más a detalle de sistemas de posicionamiento bípedo en sillas de ruedas.

En la primera patente, US6231067B1 titulada “Motorized Standing Wheelchair”, se presenta un modelo de silla de ruedas eléctrico, al igual que su sistema de posicionamiento bípedo [Manual, 2001]. En esta patente se señala un ensamble en el cual, un conjunto del asiento se encuentra conectado al extremo delantero del marco o base, desde la cual puede pivotar desde una posición completamente horizontal. Adicionalmente, según la Figura 2.27, un actuador es ubicado entre la parte delantera y trasera del asiento, lo que permite que este cambie de posición sentada a parada. Para evitar cualquier volcadura hacia adelante por parte del usuario, el asiento está ubicado en el extremo posterior de toda la

silla, cambiando con esto el centro de gravedad, y realizando un movimiento que evita las molestias de este por el rozamiento al levantarse [Manual, 2001].

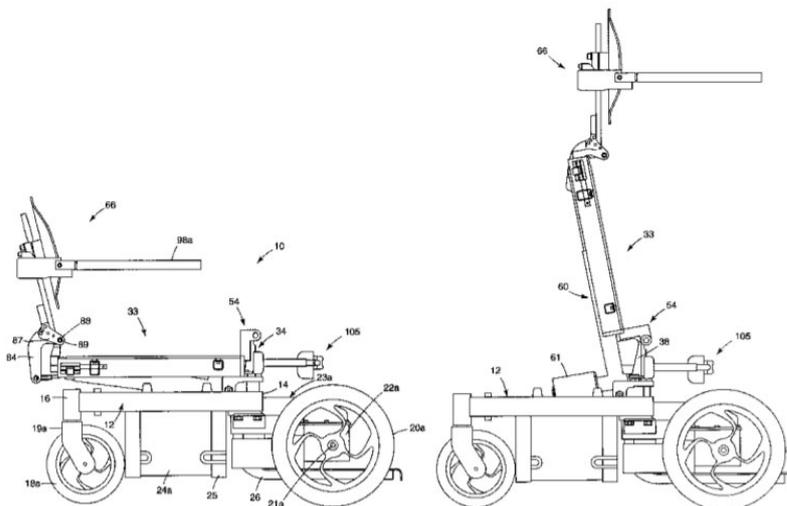


Fig. 2.27: Ubicación del asiento en ambas posiciones con el movimiento del sistema de posicionamiento vertical. [Manual, 2001]

En la patente WO2016181173A1 con el título “Motorized standing wheelchair of variable and alternating geometry” se identifica el diseño de una silla completamente eléctrica, al igual que su posicionamiento vertical, en el cual se necesita un movimiento de las ruedas para conseguirlo [Petrotos, 2016].

La silla consta de dos pares de ruedas con motores independientes en cada par, donde las delanteras son más grandes que las traseras para mantener lo más centrado posible el centro de gravedad al momento de tomar la posición vertical. Para realizar la posición vertical, esta silla cuenta con dos resortes de gas ubicados simétricamente a cada lado de la silla.

En la Figura 2.28 se observan los resortes 6 y 9, los cuales elevan el espaldar y la parte posterior del asiento [Petrotos, 2016]. Además, el movimiento completo del cambio de posición también necesita que las ruedas giren en dirección al centro de la silla. Logrando de esta manera que los componentes 1 y 2 giren alrededor de la unión 4, logrando así elevar toda la zona inferior del cuerpo [Petrotos, 2016]. En la Figura 2.29 se muestra un esquema de la silla de ruedas de Petrotos.

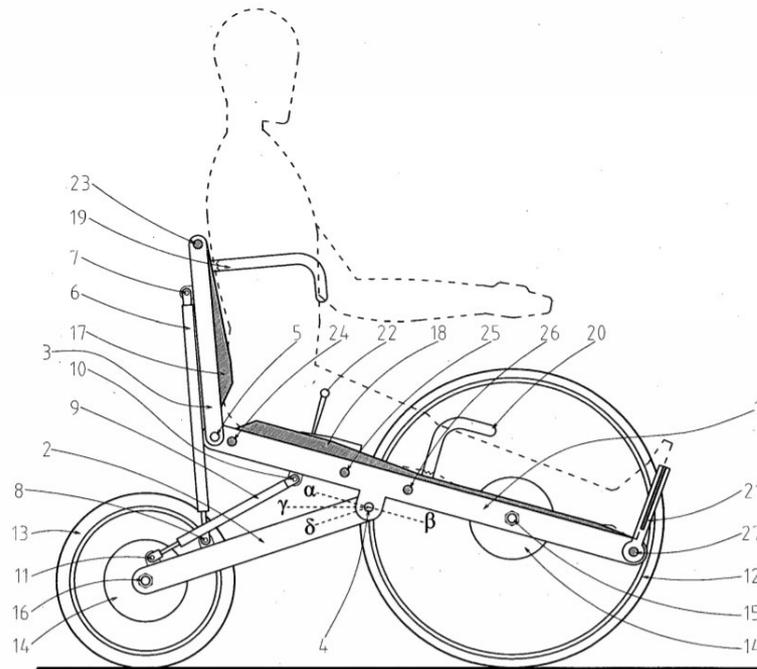


Fig. 2.28: Posición horizontal de la silla de ruedas. [Petrotos, 2016]

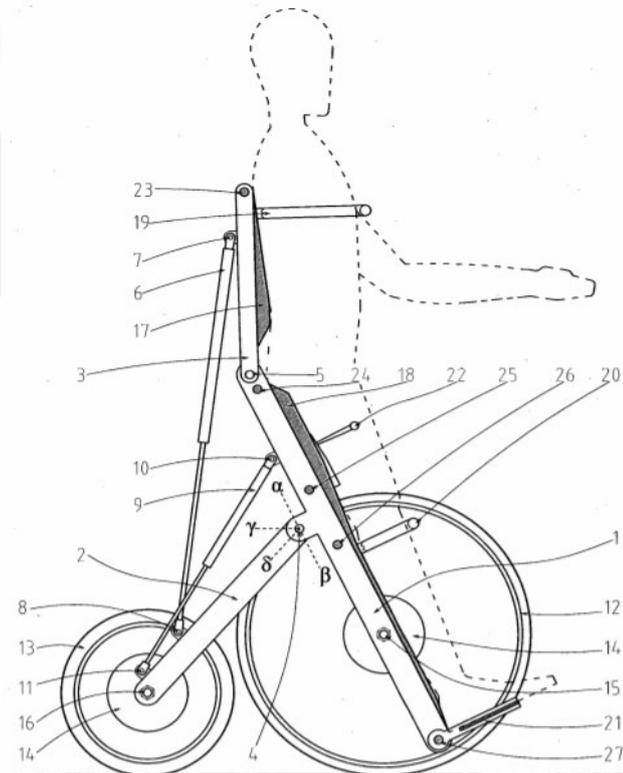


Fig. 2.29: Posición vertical de la silla de ruedas. [Petrotos, 2016]

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL

Continuando con el presente capítulo, se procederá a realizar las actividades necesarias para elaborar y detallar un diseño conceptual. Para realizar el diseño conceptual se seguirá la metodología VDI 2221 de la Norma Alemana. Esta misma empieza por establecer los requerimientos, seguido de una estructura de funciones del sistema, junto con un black box. Luego se procede con la matriz morfológica y el bosquejo de cierto número de conceptos de solución, los cuales son evaluados de acuerdo con determinados aspectos para conseguir el modelo óptimo.

#### 3.1 Requerimientos del sistema

Antes de empezar a definir las funciones que se esperan que realice el diseño o bosquejar un concepto, es necesario delimitar los requerimientos básicos que este debe cumplir para poder utilizarlos como indicador de estar alcanzando los objetivos.

**Función:** El sistema debe efectuar el mismo comportamiento al del ser humano durante el movimiento que realiza al momento de levantarse desde una posición sentada. Logrando con esto llevar al usuario en una posición vertical simulada y mantenerlo en la misma durante todo el tiempo que este requiera. Este proceso lo realizará la persona de manera autónoma con un simple control del sistema de bipedismo eléctrico.

**Geometría:** Las dimensiones generales de la silla no deben sobrepasar los tamaños de los vanos para las puertas de acuerdo al Reglamento Nacional de Edificaciones, donde el ancho mínimo que se tiene es 0.8 m y como alto mínimo se indican 2.10 m [MVCS, 2006]. Además, la parte del asiento, las piernas, espaldar, apoyas pies, apoya brazos y demás, deben tener las medidas necesarias para un ciudadano peruano con una altura límite de 1.80 m que cumpla con la mayoría de edad. Para determinar estas distancias se tiene como guía las proporciones sugeridas por Yáñez [2009] donde cada distancia está relacionada con la altura del individuo, como se observa en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Principales medidas antropométricas del usuario para el diseño del sistema

PARÁMETRO	VARIABLE	MEDIDA (cm)
Altura de pies a cabeza sentado	Hpc	0.520*H
Altura desde el muslo hasta el cuello	Hmc	0.288*H
Altura desde el codo hasta los glúteos sentado	Hcg	0.145*H
Altura de la rodilla (parte posterior) hasta el pie	Hrp	0.261*H
Altura de la rodilla (parte frontal) hasta el pie	Hrf	0.285*H
Largo del pie	Lp	0.152*H
Ancho máximo	An	0.259*H

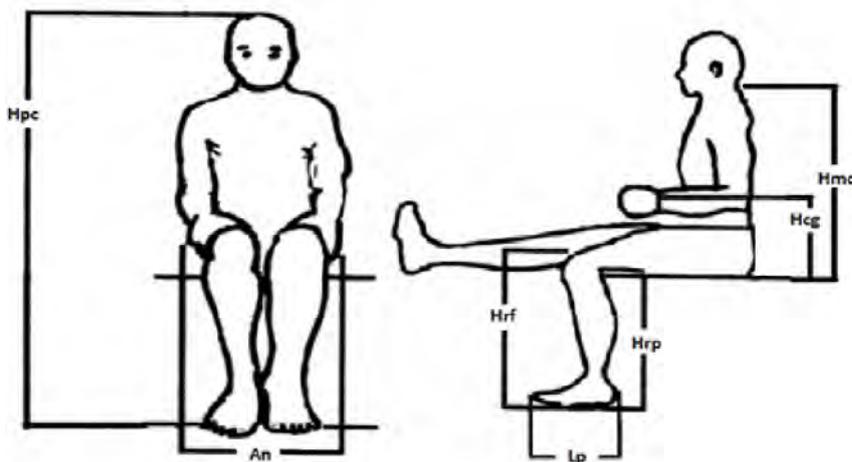


Fig. 3.1: Ubicación de las principales medidas antropométricas del usuario. [Ramírez, 2013]

**Cinemática:** En el caso del sistema de posicionamiento vertical, es necesario conocer la velocidad del giro que realizará el movimiento para alcanzar el bipedismo. A falta de una velocidad de referencia mencionada en las investigaciones identificadas, se procedió a

cronometrar el tiempo que demora en cambiar de posición un modelo del mercado<sup>11</sup>. Siendo el cambio de ángulo de 0 a 80°, se determinó un tiempo de 33s para realizar este movimiento. Por lo tanto, la velocidad de giro máxima a tomar en cuenta será de 2.5° por segundo.

**Fuerzas:** El sistema debe ser capaz de soportar el peso del peruano promedio mayor a 18 años. Sabiendo que el 35.5% de la población de 15 años a más tiene sobrepeso con un IMC de 26.2<sup>12</sup> y la altura límite que se considerará será 1.80 metros, por lo que consideran estos datos y los de la Figura 3.2, se tendrá como peso límite los 85 kg. Asimismo, el sistema bípedo debe lograr los torques necesarios para elevar y mantener la posición vertical del usuario tomando esta consideración.

	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85	1,91
70	33	31	29	27	26	24	23	22	20	19
75	36	33	31	29	28	26	24	23	22	21
80	38	36	33	31	29	28	26	25	23	22
85	40	38	35	33	31	29	28	26	25	24
90	43	40	37	35	33	31	29	28	26	25
95	45	42	40	37	35	33	31	29	28	26
100	48	44	42	39	37	35	33	31	29	28
105	50	47	44	41	39	36	34	32	31	29
110	52	49	46	43	40	38	36	34	32	30
115	55	51	48	45	42	40	38	35	34	32
120	57	53	50	47	44	42	39	37	35	33
125	59	56	52	49	46	43	41	39	37	35
130	62	58	54	51	48	45	42	40	38	36
135	64	60	56	53	50	47	44	42	39	37
140	67	62	58	55	51	48	46	43	41	39
145	69	64	60	57	53	50	47	45	42	40

Fig. 3.2. Tabla de IMC de acuerdo con la talla y peso<sup>13</sup>

**Energía:** El sistema poseerá una batería recargable que permita operar el sistema de posicionamiento bípedo, la cual debe durar de 3 a 5 días (tomando como guía el modelo Get Up de la empresa Kiron). Además, debe poder ser cargada a 220 VAC y 60 Hz.

<sup>11</sup> Motion Concepts Standing Power Chair. [https://www.youtube.com/watch?v=cqjJ3uhms\\_M&ab\\_channel=MotionConcepts](https://www.youtube.com/watch?v=cqjJ3uhms_M&ab_channel=MotionConcepts) 24/04/21

<sup>12</sup> El 35% de la población peruana de 15 y más años de edad padece sobrepeso. INEI. <https://www.inei.gob.pe/prensa/noticias/el-35-de-la-poblacion-peruana-de-15-y-mas-anos-de-edad-padece-de-sobrepeso-9161/>

<sup>13</sup> Como medir la obesidad. IMC. Índice de masa corporal. Capítulo I. <https://www.doctorjosevicenteferrer.com/como-medir-la-obesidad-imc-indice-de-masa-corporal-capitulo/>

**Señales:** El sistema bípedo debe recibir la señal de encendido/apagado, subida, bajada y parada de emergencia por parte del usuario. El sistema general mostrará si se encuentra encendido, también la silla está completamente vertical o en posición sentada, al igual que el nivel de carga.

**Comunicación:** Se usará una comunicación alámbrica entre todos los sensores, actuadores y controlador.

**Seguridad:** El sistema de posicionamiento debe incluir todas las medidas de seguridad que necesita el usuario el momento de elevarse, como reposa pies, soporte de rodillas y soporte de tronco. Al igual que la silla, se debe contar con elementos como apoya brazos, y debe ser lo suficientemente estable y nivelada para evitar volcaduras. Al estar en contacto directo con el usuario, todos los cableados y uniones eléctricas deben estar recubiertos y no deben existir elementos o segmentos punzocortantes. Además, contará con un botón de emergencia que detendrá todo movimiento en caso de algún problema.

**Ergonomía-Confort:** El usuario debe poder subir y sentarse en la silla fácilmente. El acolchonado debe brindar comodidad al usuario, la cual debe mantenerse durante todo el movimiento para llegar al posicionamiento vertical, y también mientras esta se mantiene. Además, los reposapiés deben permitir un ajuste de elevación de 0 a 90 grados para mayor comodidad.

**Material:** El material del sistema debe ser lo suficientemente resistente, con una resistencia mecánica mínima de  $70\text{-}75\text{kg/mm}^2$  tomando como guía los materiales que son comúnmente usados para la fabricación de las sillas de ruedas.

**Fabricación:** Los componentes deben poder ser fabricados en el país. Por otro lado, los sensores, actuadores y controlador deben ser posibles de conseguir, ya sea en el mercado peruano o mediante importación.

**Montaje:** Tanto el montaje como el mantenimiento de la silla y el sistema de posicionamiento bípedo deben poder ser realizados por un especialista. Mientras que los actuadores, sensores y controlador estarán recubiertos de tal forma que sea requieran herramientas para acceder a ellos, evitando así el contacto directo con el usuario.

**Uso:** Al tener como público objetivo personas del territorio peruano, especialmente de la costa, este sistema debe operar en temperaturas de 16 °C a 27 °C y con una humedad del 90%.

**Mantenimiento:** El mantenimiento debe ser semestral, ya que esta clase de equipo es parte del uso rutinario del usuario, por lo que no se le puede someter a una revisión constante, pero si debe ser lo más periódica posible.

Finalmente, en la Tabla 3.2 se presenta una síntesis de los requerimientos de diseño establecidos

Tabla 3.2. Requerimientos del sistema.

TIPO	DETALLE
Función	Efectuar el mismo comportamiento al del ser humano durante el movimiento que realiza al momento de levantarse desde una posición sentada.
Geométrico	Medidas deben estar de acuerdo a las de una persona con un 1.80m de altura como máximo, al igual que respetar las medidas mínimas de construcción con un ancho y alto mínimo de 0.8 m y 2.1 m respectivamente
Cinemático	El sistema de bipedismo debe realizar todos sus giros con 2.5°/s como máximo
Fuerza	El sistema debe soportar un peso máximo de 85kg al igual que realizar torques que logren cambiar la posición de este peso.
Energía	Duración de batería de 3 a 5 días. La batería debe poder cargarse en una conexión eléctrica de una vivienda peruana (220V y 60Hz)
Material	Debe poseer una resistencia mecánica mínima de 75kg/mm <sup>2</sup>
Señales	Encendido/apagado, subir, bajar, parada de emergencia. Indicadores de sistema encendido, alcance de la posición máxima vertical o sentada y nivel de batería.
Comunicación	Conexión de manera alámbrica
Seguridad	Aislamiento de componentes eléctricos, soportes a ser usados durante el posicionamiento vertical, botón de emergencia.
Ergonomía-Confort	Fácil de subir y bajar, comodidad estando sentado, en movimiento y parado
Fabricación	Realizable en talleres del país
Montaje	Realizado por especialistas y componentes electrónicos separados del usuario
Uso	Funcional en la costa peruana
Mantenimiento	Mantenimiento semestral

### 3.2 Entradas y salidas del sistema

Acorde con los requerimientos descritos en la lista descrita anteriormente, se designa como función principal cambiar la posición de un usuario de silla de ruedas sentado a parado y viceversa. Con el fin de definir las funciones que lograrán este funcionamiento, es necesario realizar el Black Box correspondiente, el cual engloba todas las funciones del sistema dentro de un cuadro al cual le ingresan y salen señales, energía y materia.

Además, es necesaria una breve descripción de las entradas y salidas del Black Box mostrado en la Figura 3.3:

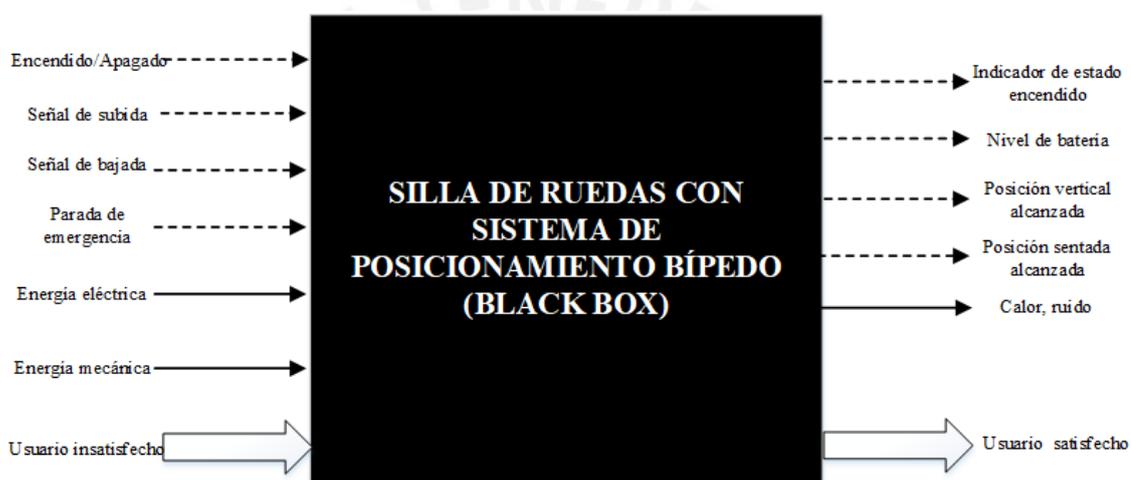


Fig. 3.3: Black Box del sistema.

#### Entradas

- **Encendido/Apagado:** es la señal introducida por el usuario para encender todo el sistema antes de operarlo.
- **Señal de subida:** es la señal generada por el usuario al presionar un botón para iniciar el movimiento de posicionamiento vertical.
- **Señal de bajada:** es la señal generada por el usuario al presionar un botón para iniciar el movimiento de vuelta a la posición sentada.
- **Parada de emergencia:** es la señal generada por el usuario al presionar un botón que detiene todas las operaciones en casos de emergencia.
- **Energía eléctrica:** es la energía suministrada por las baterías.
- **Energía mecánica:** es la energía usada por el usuario para posicionarse y utilizar la silla.

- **Usuario insatisfecho:** es la persona con discapacidad permanente que no puede pararse y no posee una herramienta.

### Salidas

- **Indicador de estado encendido:** es el indicador que da la señal de que el sistema se encuentra listo para iniciar el movimiento.
- **Nivel de batería:** es el indicador del nivel de carga de batería que suministra el sistema.
- **Posición vertical alcanzada:** es el indicador luminoso que denota el final del movimiento al alcanzar el bipedismo.
- **Posición sentada alcanzada:** es el indicador luminoso que denota el final del movimiento al alcanzar la posición sentada.
- **Funciones detenidas:** es el indicador que alerta que las funciones se han detenido por completo.
- **Calor, ruido:** es la energía calorífica y el ruido emitido por los actuadores durante el movimiento.
- **Usuario satisfecho:** es la persona con discapacidad permanente que usó la silla de ruedas con la posibilidad de optar por una posición vertical.

### 3.3 Diagrama de Funciones

Siguiendo con lo establecido en la metodología a utilizar, se presenta el diagrama de funciones detallado para el sistema completo en la Figura 3.4. Sistema el cual fue dividido en seis dominios: eléctrico, mecánico, sensores, actuadores, control e indicadores. Donde los cuales se ubican las funciones de cada subsistema en los que se ha segmentado el funcionamiento de estos.

- **Subsistema de energía:** se encarga de distribuir la energía eléctrica a todo el sistema, así como mantener la carga eléctrica.
- **Subsistema de preparación:** comprende todos los procesos necesarios que debe realizar el usuario antes de activar el movimiento de cambio de posición. De la misma forma, incluyen los pasos necesarios para dejar la silla.
- **Subsistema de movimiento:** abarca todos los procesos involucrados en el cambio de posición del usuario.

- **Subsistema de procesamiento y control:** se encarga de validar continuamente la información brindada por los sensores, al igual que controlar actuadores, funciones e indicadores del sistema.
- **Subsistema de interfaz:** procesos que comprenden la activación de las señalizaciones luminosas de cada estado del sistema que lo requiera, al igual que los botones que envían las señales de movimiento.



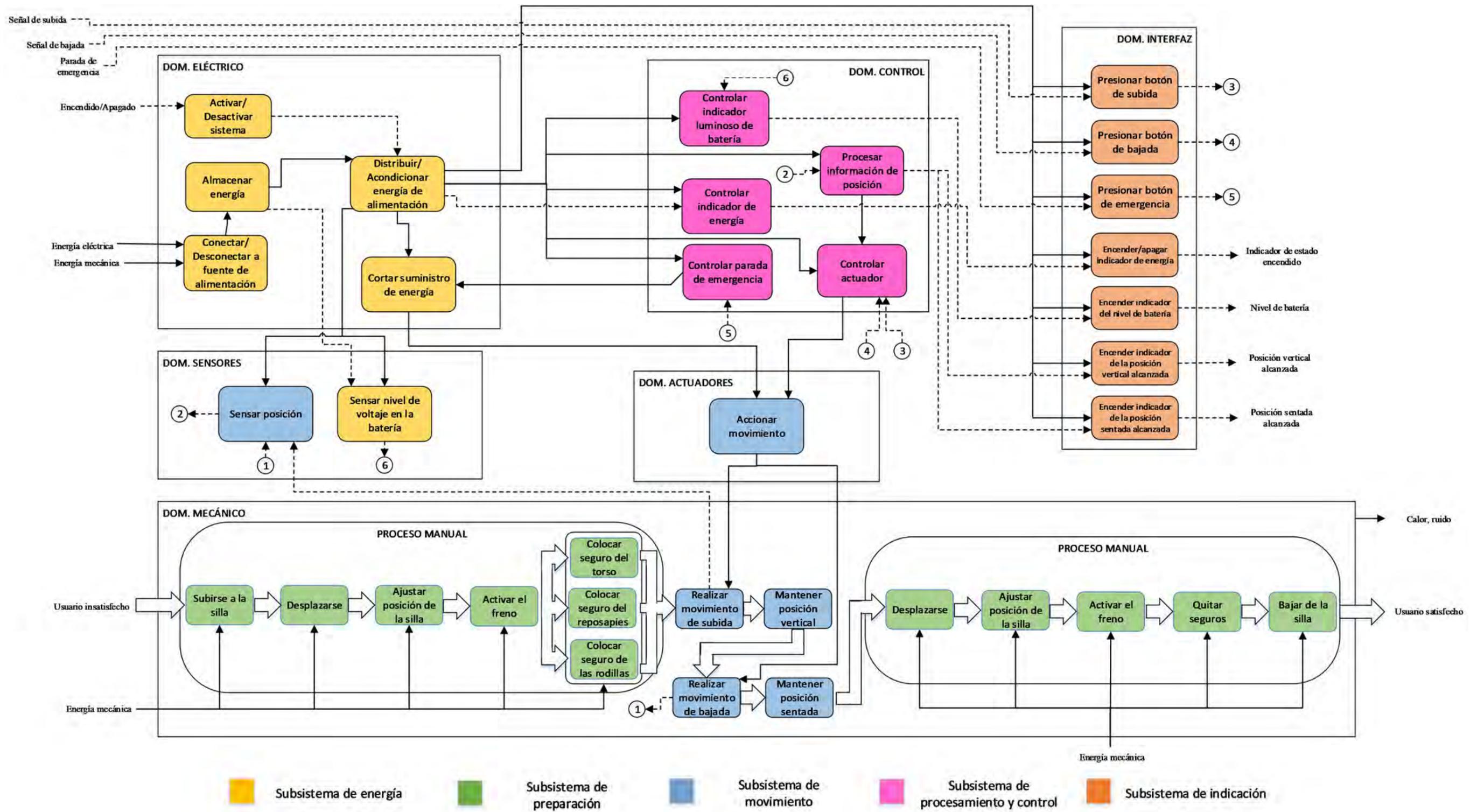


Fig. 3.4: Diagrama de funciones del sistema

Lo especificado en adelante es una breve descripción de cada función del sistema ubicada en el dominio correspondiente.

### Dominio Mecánico

El presente dominio se divide en dos partes, la primera (Figura 3.5 y 3.7) son los procesos manuales realizados por el usuario antes y después de iniciar el sistema, mientras que la segunda (Figura 3.6) son las funciones ejecutadas por el sistema activo.

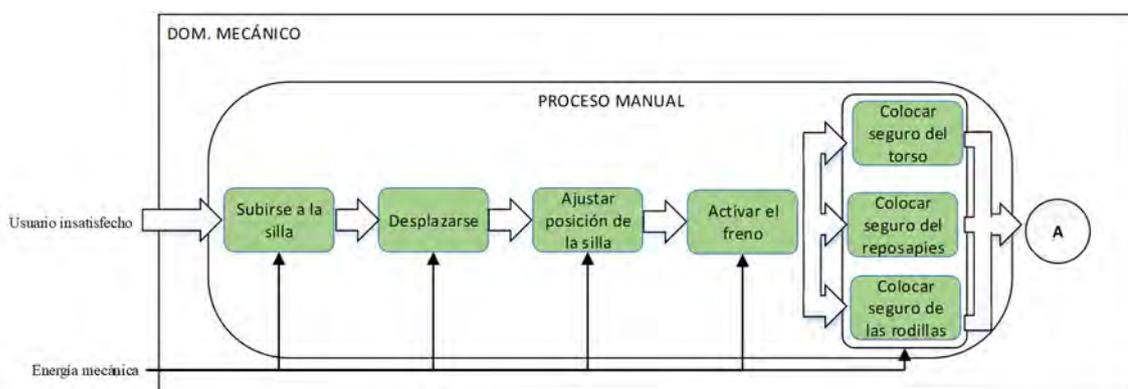


Fig. 3.5: Funciones del dominio mecánico-1ra parte manual

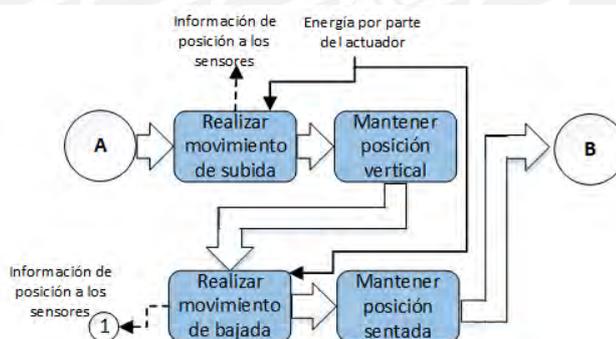


Fig. 3.6: Funciones del dominio mecánico encargadas el movimiento del sistema

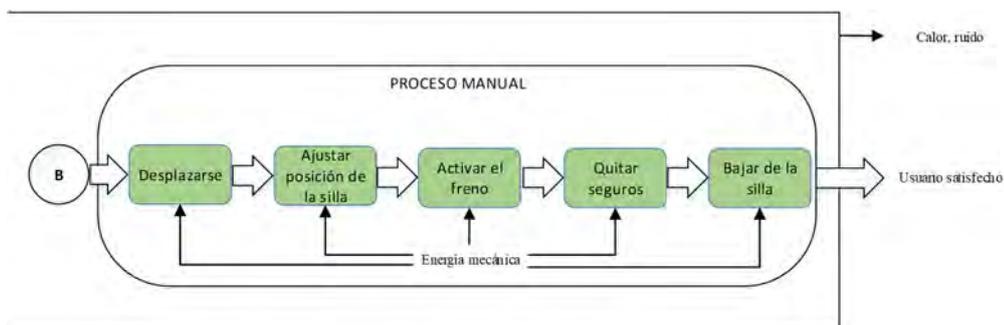


Fig. 3.7: Funciones del dominio mecánico-2da parte manual

Las funciones del dominio mecánico presentadas en las Figuras 3.5 a 3.7 son descritas a continuación:

- **Subirse a la silla:** movimiento del usuario, de preferencia con asistencia, para sentarse en la silla con sistema de posicionamiento vertical.
- **Desplazarse:** movimiento realizado por el usuario moviendo las ruedas de la silla para llegar al lugar deseado.
- **Ajustar posición de la silla:** actividad realizada por el usuario donde este mueve la silla al lugar donde quiera estar parado.
- **Activar el freno:** el usuario debe poner los frenos de la silla para evitar cualquier movimiento mientras se esté en posición vertical.
- **Colocar seguro del reposapiés:** el usuario ajusta sus pies en el reposapiés para mantenerlos firmes.
- **Colocar seguro de las rodillas:** el usuario ubica correctamente el soporte de rodillas para evitar caídas causadas por el pivote de esta articulación.
- **Colocar segura del torso:** el usuario asegura su cuerpo pegado al respaldar para mantenerse en contacto con la silla en todo momento.
- **Realizar movimiento de subida:** los actuadores elevan el asiento hasta alcanzar la posición vertical.
- **Mantener posición:** el sistema mantiene la posición parada o sentada hasta que se le dé una nueva instrucción de movimiento o se apague el sistema.
- **Realizar movimiento de bajada:** los actuadores descienden el asiento hasta alcanzar la posición sentada.
- **Quitar seguros:** proceso realizado por el usuario para remover todos los implementos de seguridad.
- **Bajar de la silla:** proceso realizado por el usuario para dejar la silla.

### **Dominio Sensores**

La distribución presentada en la Figura 3.8 muestra las funciones del dominio de sensores.

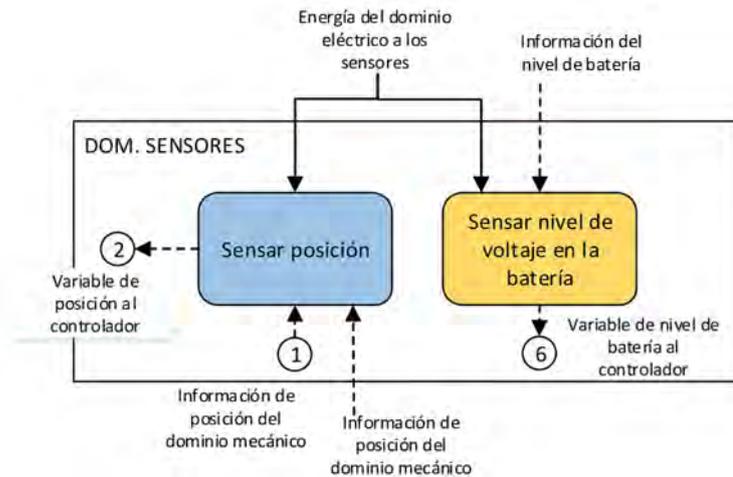


Fig. 3.8: Dominio de sensores del sistema.

- **Sensar posición:** mide el ángulo de inclinación del asiento en todo momento (señales entrantes del dominio mecánico), para luego enviarlo al controlador mediante la salida 2.
- **Medir nivel de voltaje en la batería:** mide el nivel de carga de la batería del sistema para luego enviar esa información al controlador, como se señala en la salida 6.

### Dominio de Control

El dominio de control mostrado en la Figura 3.9 contiene las funciones necesarias para la toma de decisiones en el sistema.

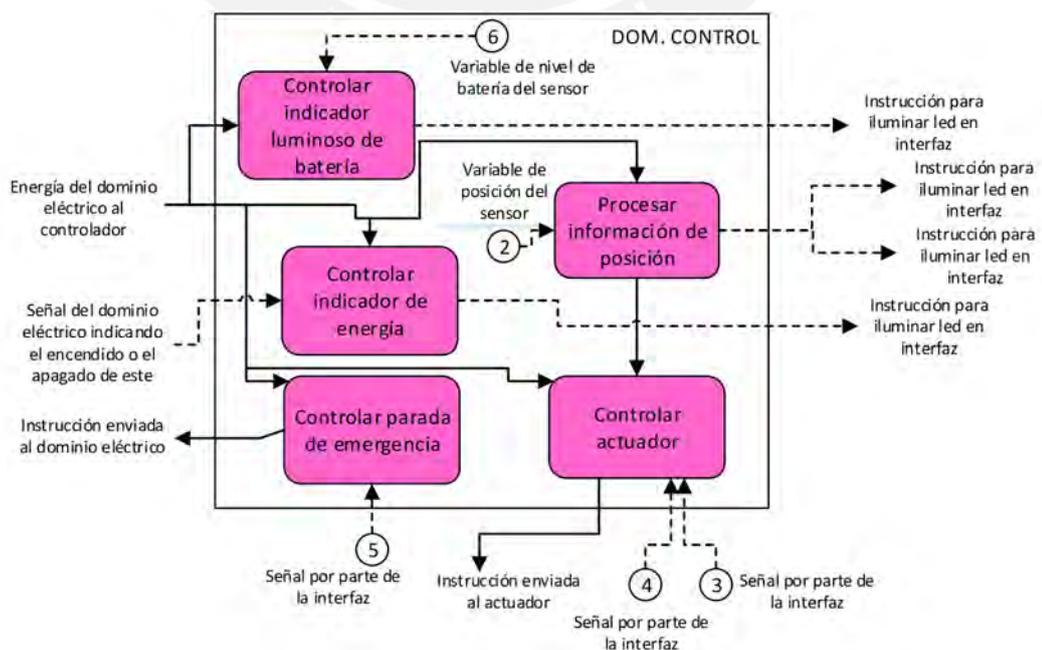


Fig. 3.9: Dominio control del sistema.

Las funciones del dominio control presentada en la Figura 3.9 son descritas a continuación:

- **Controlar parada de emergencia:** recibe la información de la señal 5 y envía una instrucción de desactivación al dominio eléctrico.
- **Controlar indicador de energía:** recibe la información de la señal por parte del dominio eléctrico y envía una instrucción de activación o desactivación al dominio interfaz.
- **Controlar actuador:** procesa la información recibida en las entradas 3 y 4 de la interfaz, recibiendo las instrucciones de los botones de subir o bajar y del sensor, y envía instrucciones al actuador.
- **Controlar indicador luminoso de batería:** procesa la información recibida, por la entrada 6 del sensor de nivel de energía en la batería y envía una instrucción al dominio de interfaz.
- **Procesar información de posición:** procesa la información recibida en la entrada 2, y envía una instrucción al dominio de interfaz. Asimismo, envía información al controlador del actuador.

### Dominio Actuadores

En la Figura 3.10 se muestra el dominio de actuadores junto con las entradas y salidas correspondientes. En este caso la única función es:

- **Accionar movimiento:** activa los actuadores involucrados para elevar y descender el asiento del usuario.

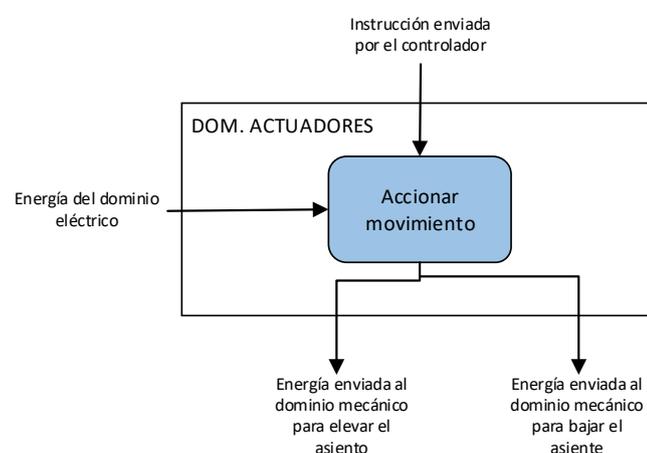


Fig. 3.10: Dominio de actuadores del sistema.

## Dominio Eléctrico

Como se observa en la Figura 3.11, se presenta el dominio eléctrico del sistema, donde a este mismo ingresan flechas discontinuas que provienen del dominio de control, mientras que la flecha entrante continua es la energía mecánica del usuario.

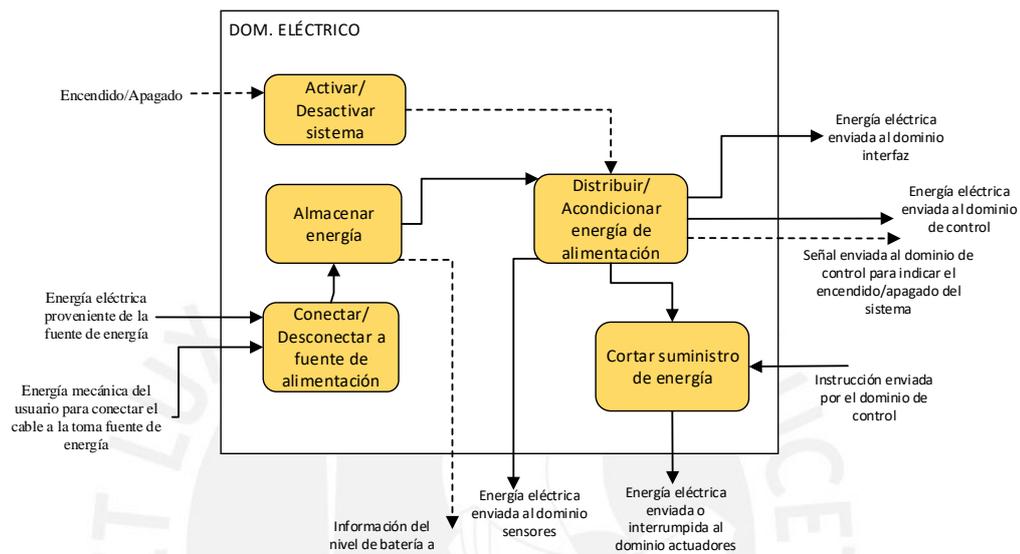


Fig. 3.11: Dominio eléctrico del sistema.

Las funciones del dominio eléctrico presentada en la Figura 3.11 son descritas a continuación:

- **Conectar/desconectar a fuente de alimentación:** acción realizada por el usuario donde conecta el sistema a una fuente de energía para cargar la batería.
- **Almacenar energía:** resguarda la energía de la batería para cuando el sistema se use sin estar conectado a una red eléctrica. Además, envía información del nivel de carga al dominio sensores.
- **Activar/Desactivar sistema:** El usuario envía una señal que permite o corta el paso de la energía de la batería destinada a ser distribuida a todo el sistema.
- **Distribuir/Acondicionar energía de alimentación:** envía la energía eléctrica a todo el sistema, así como una señal al dominio de control.
- **Cortar suministro de energía:** función que se activa en caso de recibir una instrucción del dominio de control. Está corta el envío de energía al dominio actuador en caso de emergencia.

## Dominio Interfaz

En la Figura 3.12 se muestra el dominio de interfaz, el cual comprende de los indicadores luminosos y los botones que usará el usuario para mandar instrucciones.

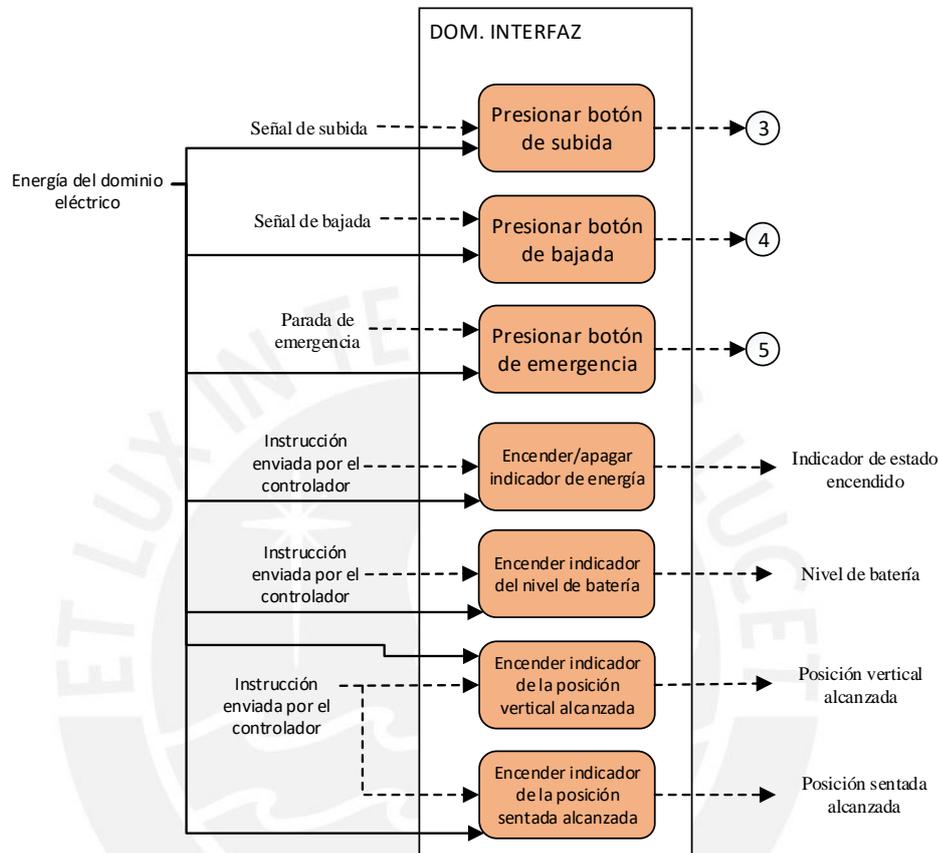


Fig. 3.12: Dominio interfaz del sistema.

Las funciones del dominio interfaz presentada en la Figura 3.12 son descritas a continuación:

- **Presionar botón de subida:** realizado por el usuario, envía la señal al sistema de control para iniciar el ascenso.
- **Presionar botón de bajada:** realizado por el usuario, envía la señal al sistema de control para iniciar el descenso.
- **Presionar botón de emergencia:** realizado por el usuario, envía la señal al sistema de control para cortar la energía en los actuadores y detener el sistema.
- **Encender/apagar indicador de energía:** enciende el indicador luminoso del sistema cuando este se encuentra encendido.
- **Encender indicador del nivel de batería:** enciende el indicador luminoso que indica el nivel de batería que posee el sistema.

- **Encender indicador de la posición vertical alcanzada:** enciende el indicador luminoso de cuando la silla alcanza la posición vertical.
- **Encender indicador de la posición sentada alcanzada:** enciende el indicador luminoso de cuando la silla alcanza la posición sentada.

### 3.3 Matrices Morfológicas

Culminando la definición de las estructuras de funciones, es necesario realizar a continuación una matriz morfológica de cada dominio. En este mismo se asignan los mecanismos o elementos necesarios en cada uno de los conceptos de solución propuestos. Esta matriz se detalla desde la Tabla 3.3 hasta la 3.8, cada uno para su dominio indicado.

De acuerdo a cada tipo de flecha en las tablas, se han elaborado tres tipos de concepto de solución diferentes, estos serán descritos en el siguiente punto. En la Tabla 3.9 se detalla la pertenencia de cada flecha a su respectivo concepto.

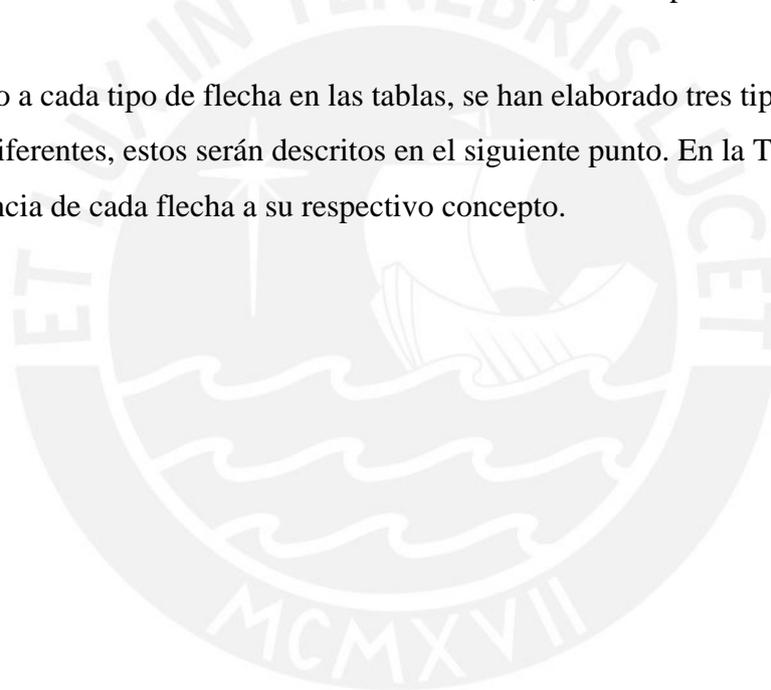


Tabla 3.3. Matriz Morfológica – Dominio Mecánico.

Funciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Subirse a la silla			
Desplazarse			
Ajustar posición de la silla	Manual	Manual	Manual
Activar el freno	 Freno de palanca de aluminio	 Freno de palanca universal	
Colocar seguro de reposapiés	 Cintas de velcro	 Correa con hebilla de clip	 Clip de hebilla a presión
Colocar seguro de las rodillas	 Cintas de velcro	 Correa con hebilla de clip	
Colocar segura del torso	 Cintas de velcro	 Broche para cinturón de seguridad	
Realizar movimiento de subida		 Sistema de barras pivotadas	
Mantener posición	 Actuador y sistema de barras	 Resortes de gas	
Realizar movimiento de bajada		 Sistema de barras pivotadas	
Quitar seguros			
Bajar de la silla	Manual	Manual	Manual

Tabla 3.4. Matriz Morfológica – Dominio Sensores.

Funciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Sensar posición	 Sensor efecto hall	 Acelerómetro	
Medir nivel de voltaje en la batería		 Sensor de voltaje	

Tabla 3.5. Matriz Morfológica – Dominio Control

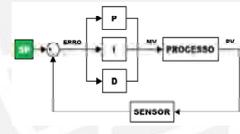
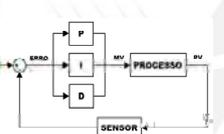
Funciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Controlar parada de emergencia	  Microcontrolador + Control PID	  FPGA + Control PID	
Controlar indicador de energía			
Controlar actuador			
Controlar indicador luminoso de batería			

Tabla 3.6. Matriz Morfológica – Dominio Actuadores

Funciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Accionar movimiento	 Actuador lineal eléctrico	 Motor DC lineal	

Tabla 3.7. Matriz Morfológica – Dominio Eléctrico

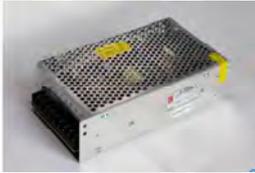
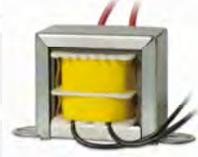
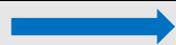
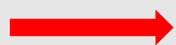
Funciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Conectar a fuente de alimentación	 Manual	 Manual	 Manual
Almacenar energía		 Batería de litio	
Activar/desactivar sistema	 Interruptor On/Off	 Pulsador	 Interruptor de palanca
Distribuir/Acondicionar energía de alimentación	 Fuente conmutable	 Transformador	 Fuente lineal
		 Selector	
Cortar suministro de energía	 Tiristor SCR	 Mosfet	 Relé

Tabla 3.8. Matriz Morfológica – Dominio Interfaz

Funciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Presionar botón de subida			
Presionar botón de bajada		<b>Pulsador</b>	
Presionar botón de emergencia	 <b>Botón</b>	 <b>Pulsador</b>	 <b>Palanca</b>
Encender indicador de energía			
Encender indicador del nivel de batería			
Encender indicador de la posición vertical alcanzada			
Encender indicador de la posición sentada alcanzada		<b>Led RGB</b>	

Tabla 3.9. Leyenda de conceptos de solución

	Tipo de flecha
<b>Concepto de solución 1</b>	
<b>Concepto de solución 2</b>	
<b>Concepto de solución 3</b>	

## 2.4. Conceptos de Solución

En la presente sección se detallan, con imágenes y con descripciones, los tres conceptos propuestos para el diseño del sistema. Tomando en cuenta lo presentado en la matriz morfológica, se sigue la misma elección y agrupación de sensores, actuadores y mecanismos.

### 3.4.1. Primer Concepto de Solución

En la Figura 3.13 se muestran dos vistas del primer concepto propuesto, donde los soportes mostrados para el torso, rodillas y pies son cintas de velcro que se ajustan a la forma del usuario. Asimismo, se utilizan frenos de mano comunes, como los señalados en la matriz morfológica, en cada lado de la silla, y en la parte lateral izquierda de esta, se posiciona (colgando) el mando de control del sistema de posicionamiento bípedo.

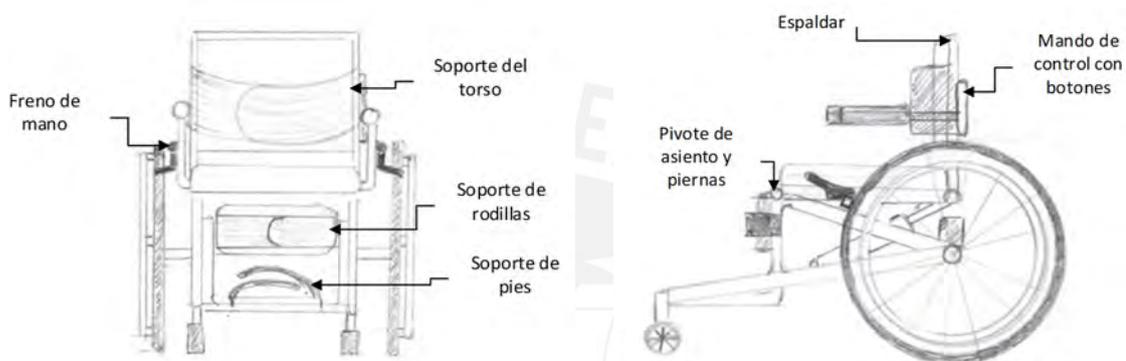


Fig. 3.13: Vistas frontal y lateral del primer concepto de solución.

El mando de control presentado en la Figura 3.14 sigue la misma lógica, forma y diseño en los tres conceptos de solución, por lo que solo será presentado en esta sección del trabajo. En esta figura se muestra la ubicación de los indicadores led, así como de los botones de comando y emergencia del sistema para ser controlado por el usuario.



Fig. 3.14: Mando de control propuesto para los tres conceptos de solución.

El sistema utilizado para realizar el movimiento de subida y de bajada del usuario es presentado en la Figura 3.15 (concepto en posición bípeda) y en la Figura 3.16, donde el

actuador, el cual también se encarga de mantener la posición, es un actuador lineal. Además, se muestra la ubicación del acelerómetro utilizado para enviar la señal de posición al controlador, el cual está alojado dentro de la caja electrónica, donde el botón ON/OFF también se encuentra ubicado. El contenido interno de la caja se detalla en la Figura 3.17, donde se encuentra el componente de control, los eléctricos y uno de los sensores.

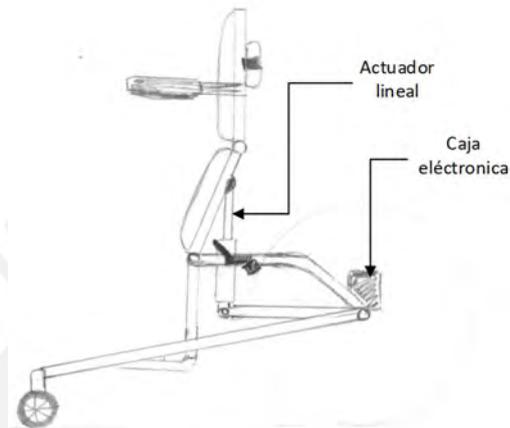


Fig. 3.15: Vista lateral del sistema del primer concepto de solución en posición bípeda.

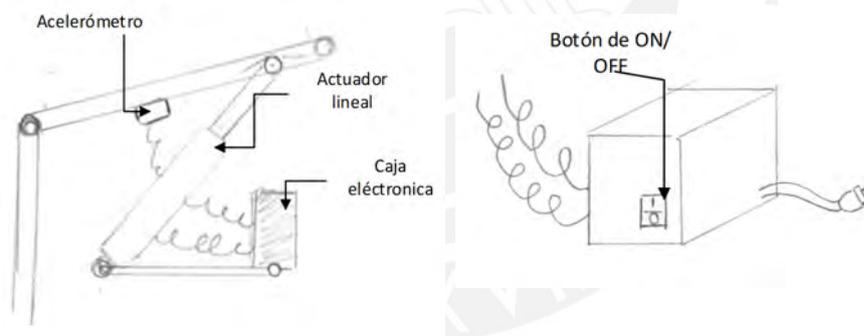


Fig. 3.16: Mecanismo de movimiento (izquierda) y detalle exterior de la caja electrónica (derecha) del primer concepto de solución.

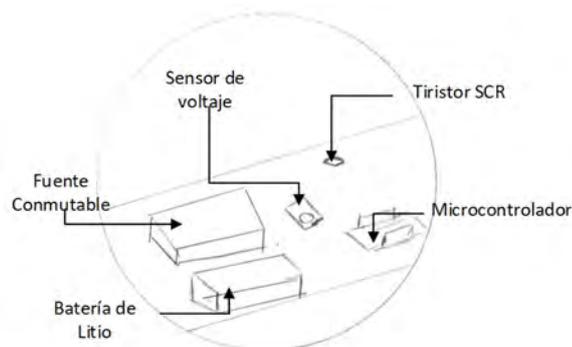


Fig. 3.17: Detalle interno de la caja electrónica del primer concepto de solución.

### 3.4.2. Segundo Concepto de Solución

En la Figura 3.18 se muestran dos vistas del segundo concepto propuesto, donde los soportes mostrados para las rodillas y pies están compuestos por correas con hebillas de “dip”, mientras que el soporte para el torso utiliza un broche de cinturón de seguridad. Asimismo, se utilizan frenos de mano comunes, al igual que en los otros dos conceptos, en cada lado de la silla y, en la parte lateral izquierda de esta, se posiciona (colgando) el mando de control del sistema de posicionamiento bípedo.

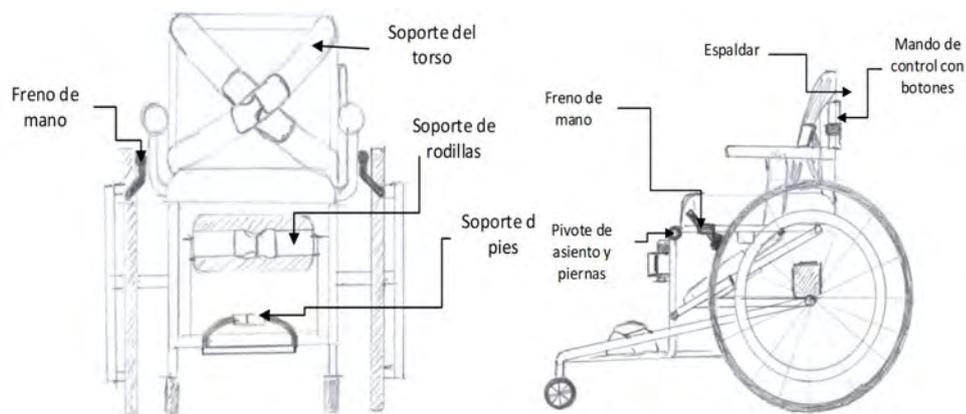


Fig. 3.18: Vistas frontal y lateral del segundo concepto de solución.

El sistema utilizado para realizar el movimiento de subida y de bajada del usuario es presentado en la Figura 3.19 (con la vista lateral en posición bípeda) y en la Figura 3.20, donde el actuador, el cual también se encarga de mantener la posición, es un actuador lineal, el cual tiene dos resortes de gas a cada lado de la silla que ayudan a mantener el movimiento suave y estable, al igual que la posición estática. Además, se muestra la ubicación del acelerómetro utilizado para enviar la señal de posición al controlador, el cual está dentro de la caja electrónica, donde el botón ON/OFF también se encuentra ubicado. El contenido interno de la caja se muestra en la Figura 3.21, donde se encuentra el componente de control, los eléctricos y uno de los sensores.

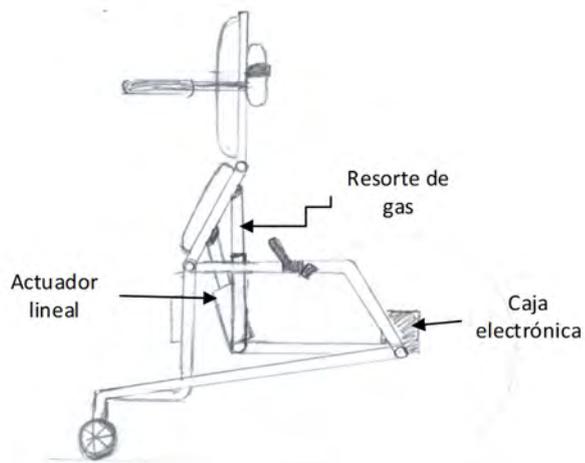


Fig. 3.19: Vista lateral del sistema del segundo concepto de solución en posición bípeda.

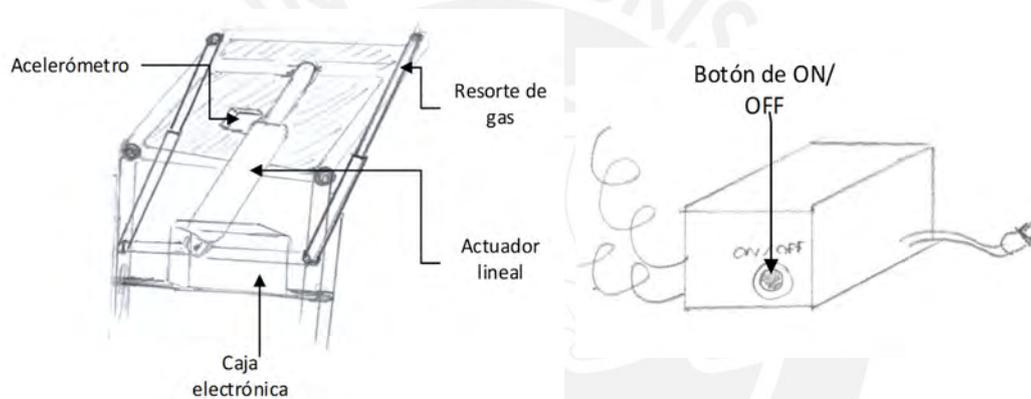


Fig. 3.20: Sistema de movimiento (izquierda) y detalle exterior de la caja electrónica (derecha) del segundo concepto de solución.

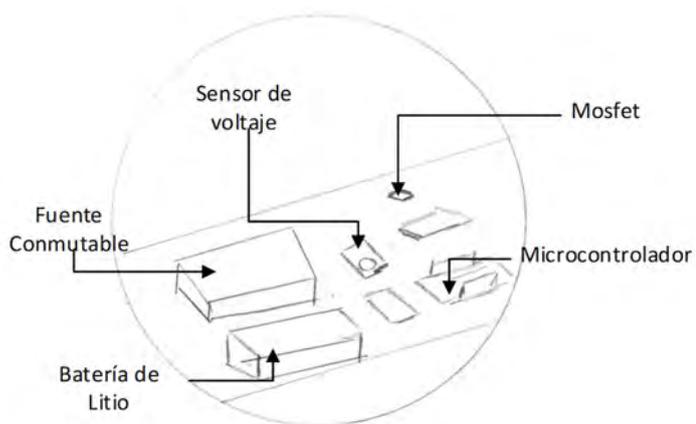


Fig. 3.21: Detalle interno de la caja electrónica del segundo concepto de solución.

### 3.4.3. Tercer Concepto de Solución

El diseño del presente concepto es similar al segundo en lo que a la silla y soportes se refiere, con la diferencia de que en el soporte de pies se ajusta con un clip de hebilla a presión. La Figura 3.22 detalla el sistema de movimiento y soporte del diseño en este último concepto, donde el movimiento es efectuado por un motor DC lineal y también hace uso de resortes de gas al igual que el concepto anterior. En la misma imagen también se muestra el interruptor de palanca ON/OFF en la caja electrónica. Finalmente, en la Figura 3.23 se detalla el interior de la misma, donde se utiliza un transformador y selector para el acondicionamiento energético a diferencia de la fuente conmutada de los otros conceptos.

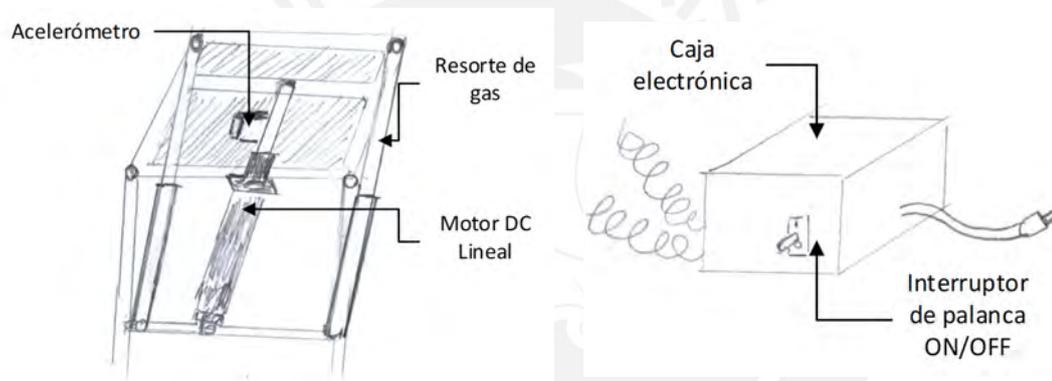


Fig. 3.22: Sistema de movimiento (izquierda) y detalle exterior de la caja electrónica (derecha) del tercer concepto de solución.

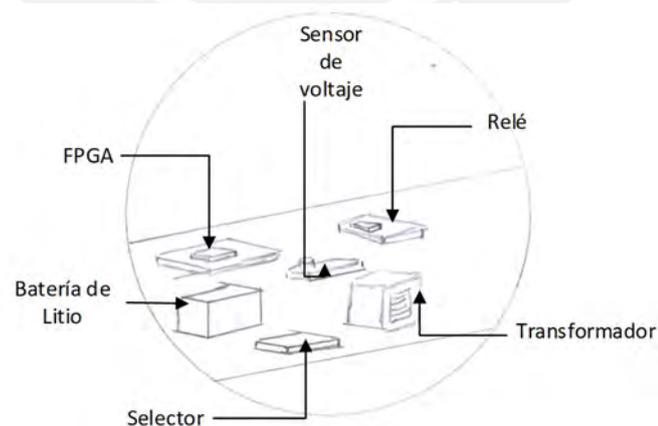


Fig. 3.23: Detalle interno de la caja electrónica del concepto de solución propuesto.

### 3.5. Evaluación técnica y económica

El paso siguiente es evaluar los conceptos de acuerdo con ciertos criterios y pesos para cada uno de estos en el aspecto técnico y económico, para poder ser luego analizados y comparados con el fin de obtener el concepto de solución óptimo.

#### 3.5.1. Evaluación técnica

La evaluación de los aspectos técnicos del proyecto tiene en consideración factores como la fabricación, el montaje, seguridad, confortabilidad, entre otros. Para ello, a cada uno de estos le es asignado un peso relativo comprendido ente 1 y 4 de acuerdo a la importancia o relevancia que tiene el aspecto mencionado en el proyecto (siendo 4 el número que indica mayor relevancia). Cada uno de los criterios seleccionados son luego evaluados con un valor de 1 a 3 dependiendo de la cercanía que tengan estos con el valor de la solución ideal, a la cual le es asignada un valor de 4 a todos sus criterios. Para realizar este análisis se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- **Fabricación:** este criterio abarca todo lo relacionado a la simplicidad de la fabricación, considerando los métodos y materiales que pueden ser utilizados, así como el acceso a los mismos en el territorio peruano. El presente factor posee un peso “g” de 2 ya que mientras más simple sea la fabricación del sistema aumenta la posibilidad de su producción en el país (teniendo siempre como prioridad la seguridad y estabilidad del usuario).
- **Montaje:** evalúa la comodidad, rapidez y simplicidad del montaje del concepto de solución, cosas como el número de piezas y el tamaño de las mismas son determinantes a la hora de señalar un montaje más sencillo que el otro. El presente factor tiene un peso “g” de 2 ya que, está fuertemente ligado con la fabricación, un montaje simple aumenta las probabilidades de producir el sistema.
- **Seguridad:** determina que tan ajustado está el usuario a la silla, la fuerza y resistencia de los soportes, al igual que la robustez para sostener el peso de quien la utilice. Por el hecho de movilizar una persona con discapacidad es que este factor tiene asignado un peso “g” de 3, ya que este factor involucra la integridad del usuario en todo momento (en su mayoría son momentos estáticos).

- **Confortabilidad:** evalúa el nivel de comodidad que los soportes, su ubicación, movimiento y el sistema en general es capaz de brindarle a usuario. Este factor tiene un peso “g” de 1 ya que, si bien es importante que el usuario se sienta cómodo con el sistema, en el presente trabajo se tiene como objetivo principal realizar el cambio de posición de forma segura
- **Estabilidad en movimiento:** evalúa el equilibrio y estabilidad que tiene el usuario montado en la silla durante el cambio de posición. Siendo este factor el que representa más peligro y vulnerabilidad, se le asignó un peso “g” de 4.

Con todos estos criterios, se les es asignado un peso “p” para cada solución, obteniendo los puntajes presentados en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Evaluación técnica de los conceptos de solución propuestos.

Evaluación técnica									
Criterio técnico	Sol 1		Sol 2		Sol 3		Sol Ideal		
	g	P	gp	p	gp	p	gp	p	
Fabricación	2	3	6	2	4	2	4	4	8
Montaje	2	3	6	2	4	2	4	4	8
Seguridad	3	2	6	3	9	2	6	4	12
Confortabilidad	1	2	2	2	2	1	1	4	4
Estabilidad en movimiento	4	3	12	3	12	2	8	4	16
Sumatoria			32		31		23		48
<b>Valor técnico Xi</b>			0.67		0.65		0.48		1

Como se detalla en la Tabla 3.10, la primera solución tiene el mayor peso “p” en los criterios de fabricación y montaje ya que, presenta menos piezas que las soluciones competidoras por lo que ello permite un montaje más sencillo y facilita la fabricación. En seguridad, la segunda solución presenta una mayor robustez con el actuador lineal y los resortes de gas, mientras que la solución tres también los posee, pero el actuador es un motor lineal, el cual no es tan estable a comparación, y la primera solución presenta el mismo peso que la tercera porque no presenta los resortes, pero sí el actuador lineal. La misma lógica se aplica al evaluar la estabilidad de movimiento, es por ello que ambas soluciones que usan el actuador lineal eléctrico poseen un peso igual y mayor al de la tercera solución.

Por último, el criterio de confortabilidad fue determinado en su mayoría por la facilidad de colocar los seguros en pies, rodillas y torso, utilizar velcro o broches “dip” no genera

ningún impedimento a la hora de utilizarlos, pero en la tercera solución se utiliza un clip de hebilla a presión, lo que requiere un poco más de esfuerzo a comparación, por ello tiene un peso menor.

### 3.5.2 Evaluación económica

El análisis de los costos involucrados en el proyecto son el objetivo principal de la evaluación económica, aspectos como la obtención de componentes, sus costos y el número de piezas, fueron tomados para determinar el concepto más viable, económicamente. Al igual que en la evaluación técnica, cada uno fue asignado con un peso de 1 a 4 de acuerdo con su relevancia. Luego se le asigna un valor de 1 a 3 para cada criterio dependiendo del concepto evaluado, mientras que para la solución ideal se le asigna un valor de 4 en todos los criterios. La lista completa de los factores analizados se muestra continuación:

- **Número de piezas y componentes:** este criterio evalúa los costos que ligado a la cantidad de piezas que componen todo el sistema en su totalidad. El presente factor tiene asignado un peso “g” de 4 porque la cantidad de piezas delimita los factores siguientes como el costo de fabricación y obtención.
- **Costo de componentes:** en este criterio se consideran los costos de traslado o envío de ciertos componentes que tiene que ser importados, al igual que el costo de compra si es que estos son adquiridos en el país. Al tener componentes similares entre los tres conceptos, se asigna un peso g de “2” a este, por lo que los componentes no son el factor determinante al diferenciar el costo entre los otros conceptos.
- **Costo de fabricación y montaje:** evalúa el costo relacionado a la producción del sistema general, así como la unión y ensamblado de todas las partes (el cual va de la mano con la complejidad del montaje). De la misma forma que el factor anterior, el presente tiene un peso “g” de 2 porque entre los tres conceptos no existe una gran diferencia de geometría que involucre una gran diferencia en el costo.
- **Obtención de componentes:** determina la facilidad de obtención de los componentes, ya que muchos de ellos son productos importados, mientras que otros pueden ser comprados en el país. El peso “g” asignado tiene un valor de 3 porque al

estar relacionado con el número de componentes, aumenta el precio de importaciones y traslados realizados para conseguirlos.

Con todos estos criterios, se les es asignado un peso y un valor para cada solución, obteniendo los puntajes presentados en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11. Evaluación económica de los conceptos de solución propuestos.

Evaluación económica									
Criterio económico	Sol 1			Sol 2		Sol 3		Sol Ideal	
	g	P	gp	p	gp	p	gp	p	gp
Numero de piezas y componentes	4	3	12	2	8	2	8	4	16
Costo de componentes	2	3	6	2	4	2	4	4	8
Costo de fabricación y montaje	2	3	6	2	4	2	4	4	8
Obtención de componentes	3	2	6	2	6	2	6	4	12
Sumatoria			30		22		22	4	44
<b>Valor económico Yi</b>			0.68		0.5		0.5		1

Como se detalla en la Tabla 3.11, la primera solución tiene el peso “p” mayor en el número de piezas a comparación de sus competidoras porque requiere un número menor en su diseño. Esta lógica también es utilizada para calcular los costos de componentes y los de fabricación, al usar menos piezas el costo de componentes por función disminuye, así como la necesidad de fabricar uniones adicionales o piezas geometrías más complicadas que involucren mayores costos. Por último, el peso “p” asignado para la obtención de componentes en las tres soluciones es el mismo, porque al ser componentes similares entre unos y otros, siendo los más importantes de importación (como los actuadores y resortes de gas), el costo del traslado no influirá en el costo total entre soluciones.

Con los datos obtenidos de la evaluación técnica y económica, se utilizan los valores Xi e Yi calculados en cada concepto de solución, los que son comparados con la solución ideal, tal como se muestra en la Figura 3.24. Como se puede ver, el primer concepto de solución es el seleccionado, ya que se encuentra más cerca a la solución ideal, mientras que el segundo se encuentra más alejado y el tercero no forma parte de los conceptos de solución viables.

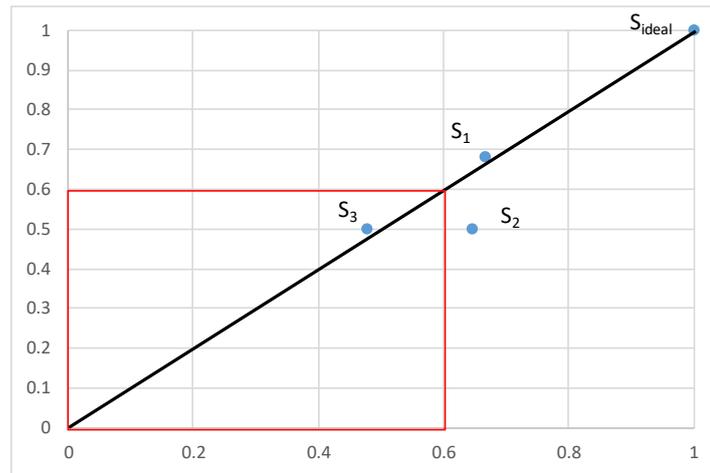
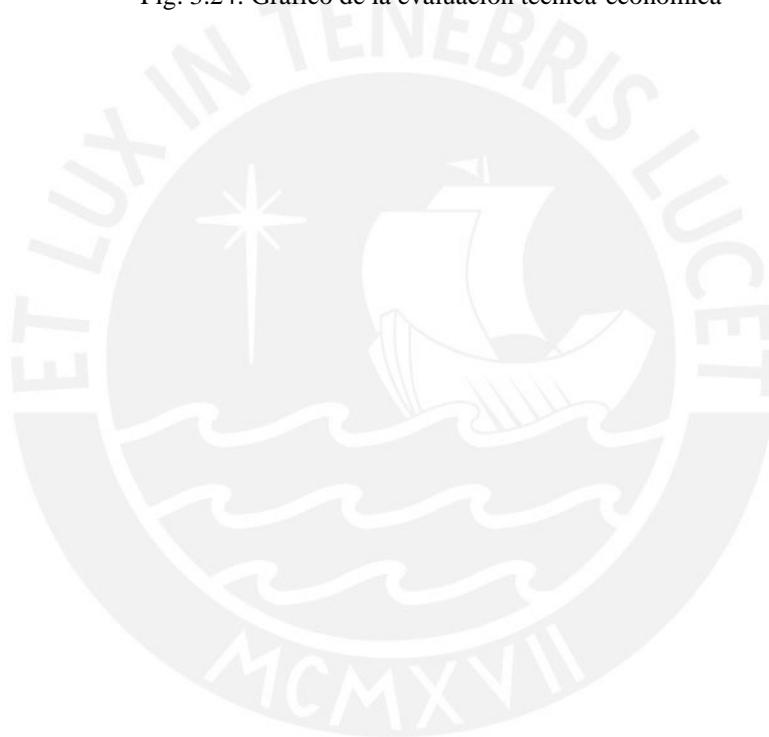


Fig. 3.24: Gráfico de la evaluación técnica-económica



## **CAPÍTULO 4**

### **PROPUESTA DE DISEÑO CONCEPTUAL**

En este último capítulo se verá a detalle la propuesta conceptual desarrollada, iniciando por el diseño mecánico y posicionamiento de componentes, siendo una mejora de la propuesta de solución ganadora en el capítulo anterior. Luego está el diagrama de operaciones que describe los pasos para usar el dispositivo. Finalmente se muestra el diagrama de bloques que expone las conexiones de comunicación entre los distintos componentes electrónicos y el diagrama de flujo que describe la lógica de control que seguirá el microcontrolador.

#### **4.1. Silla de ruedas propuesta**

El diseño conceptual mostrado en la Figura 4.1 está basado en la propuesta de solución ganadora. Este se compone de soportes para el torso, rodillas y pies con un ajuste mediante velcro. El sistema de posicionamiento bípedo realiza el movimiento con un actuador lineal eléctrico junto con un sistema de barras. Las ruedas delanteras, traseras y el freno manual son partes comerciales de sillas auto asistidas comunes. Además, el movimiento se controla con un mando con botones colgado en el lado izquierdo de la silla, el cual se comunica con el microcontrolador ubicado en la caja electrónica a través de un cable espiralado, al igual que el actuador lineal y el acelerómetro ubicado en la parte inferior del asiento. Asimismo, la Figura 4.2 muestra la vista lateral de la silla tanto en la posición sentada como en la bípeda para mostrar el funcionamiento del actuador, así como la distribución de partes y uniones del sistema.

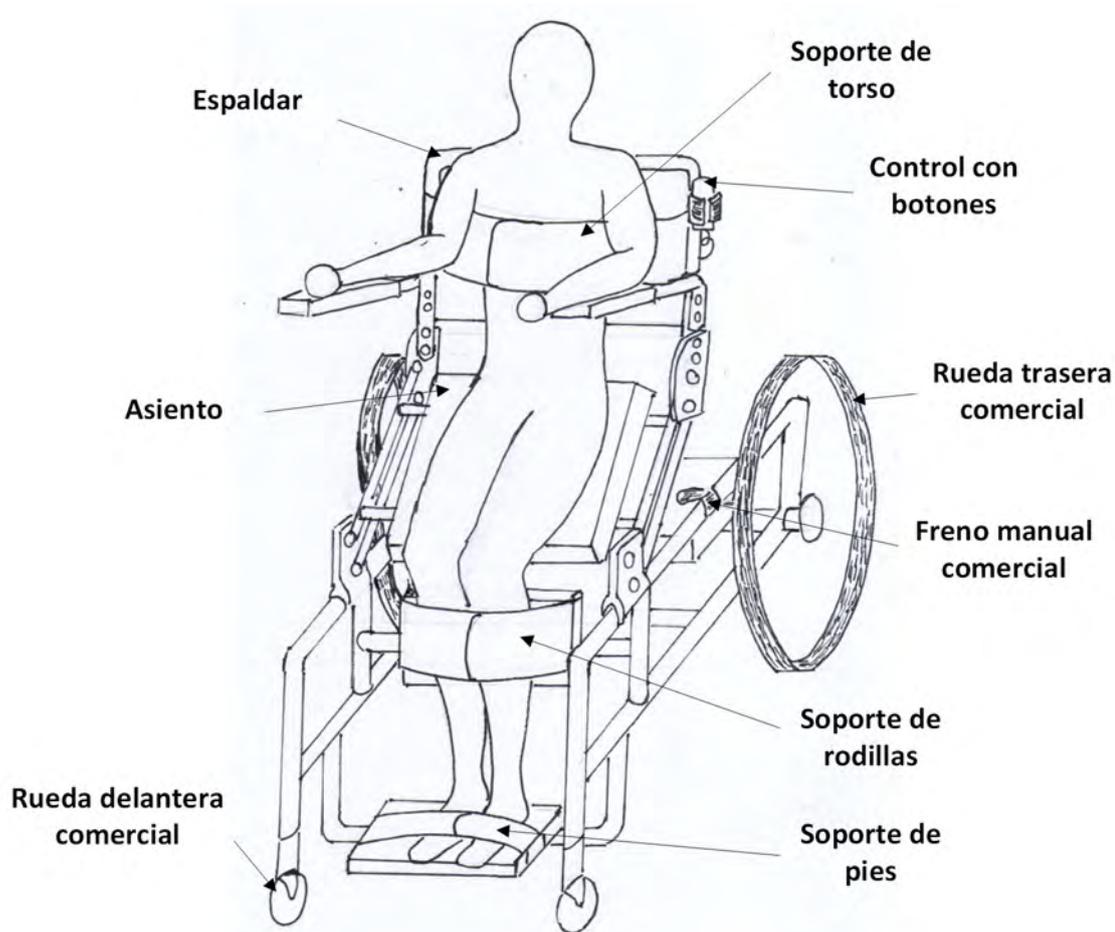


Fig. 4.1: Vista de la propuesta de diseño conceptual en posición bípeda.

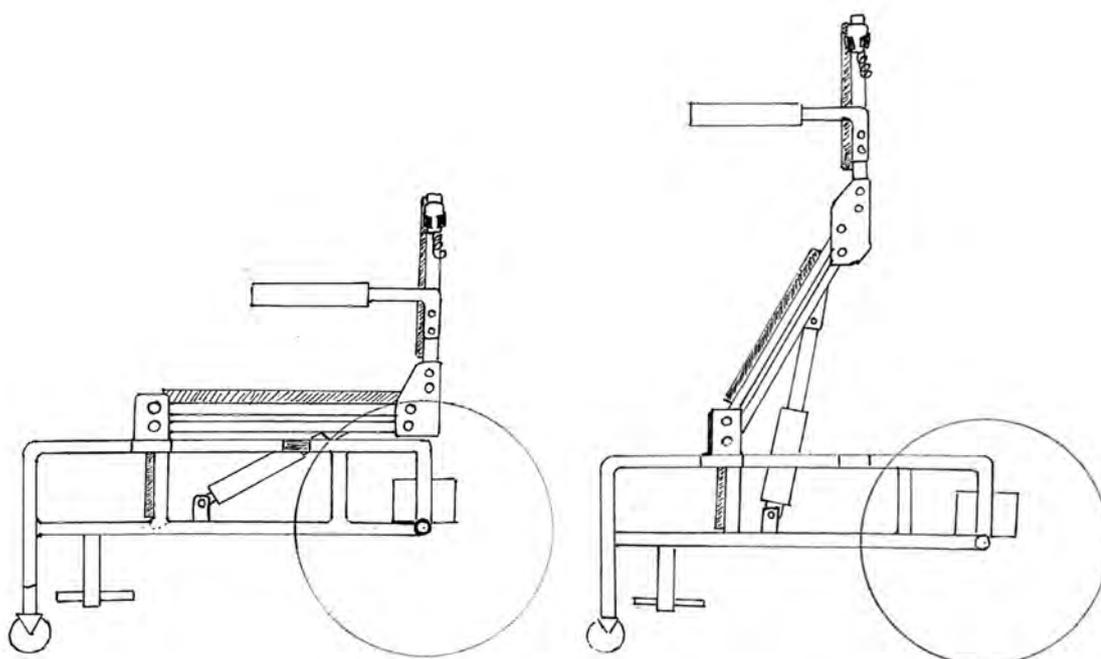


Fig. 4.2: Vista lateral de la propuesta de diseño conceptual en posición sentada y bípeda.

En la Figura 4.3 se muestra de manera más detallada el sistema de conexiones y uniones en la silla con el sistema de posicionamiento bípedo.

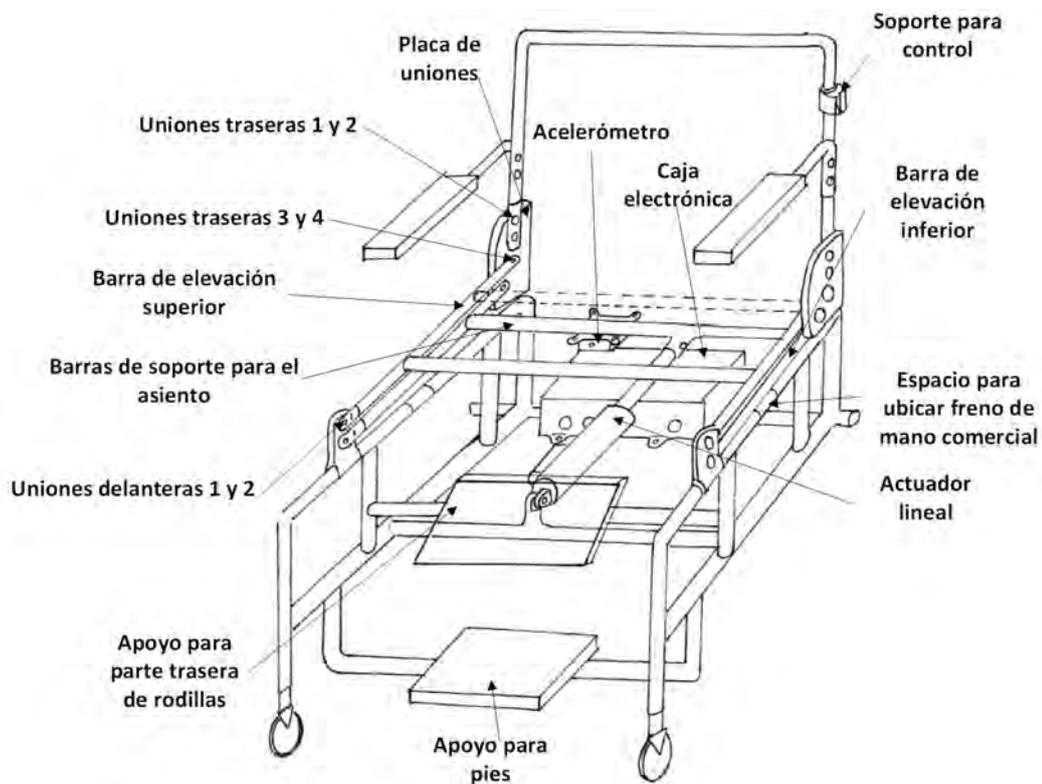


Fig. 4.3: Dibujo de uniones y conexiones de la silla con sistema de posicionamiento bípedo

En la parte inferior de las barras de soporte para el asiento se ubica el acelerómetro que está unido a una placa con tornillos en cuatro extremos con arandela y tuerca, al igual que la caja electrónica, el apoyo para pies, para rodillas y los posa brazos en sus respectivas posiciones. Además, en la Figura 4.3 se señala la posición y una vista general de las uniones del actuador lineal. Estas se encuentran con un pivote en la parte inferior, mientras que la parte superior es introducida y ajustada dentro de una unión con las barras de elevación inferior para realizar el movimiento de subida y bajada, mientras que las barras de elevación superiores se encargan de girar el espaldar de acuerdo con la posición.

La placa de uniones posicionada a cada lado de la silla tiene en la parte superior dos uniones de tornillo, arandela y tuerca que mantiene firme el espaldar (uniones traseras 1 y 2), mientras que en la parte inferior tiene dos uniones móviles (uniones traseras 3 y 4), tal cual como se muestra en la Figura 4.4. Estas uniones tienen un cojinete de fricción que se acopla a un eje cilíndrico, el cual pasa por ambos extremos. Finalmente, este eje es

ajustado con tornillos y arandelas a ambos lados a través del agujero roscado que presenta (las uniones delanteras 1 y 2 también presentan el mismo sistema).

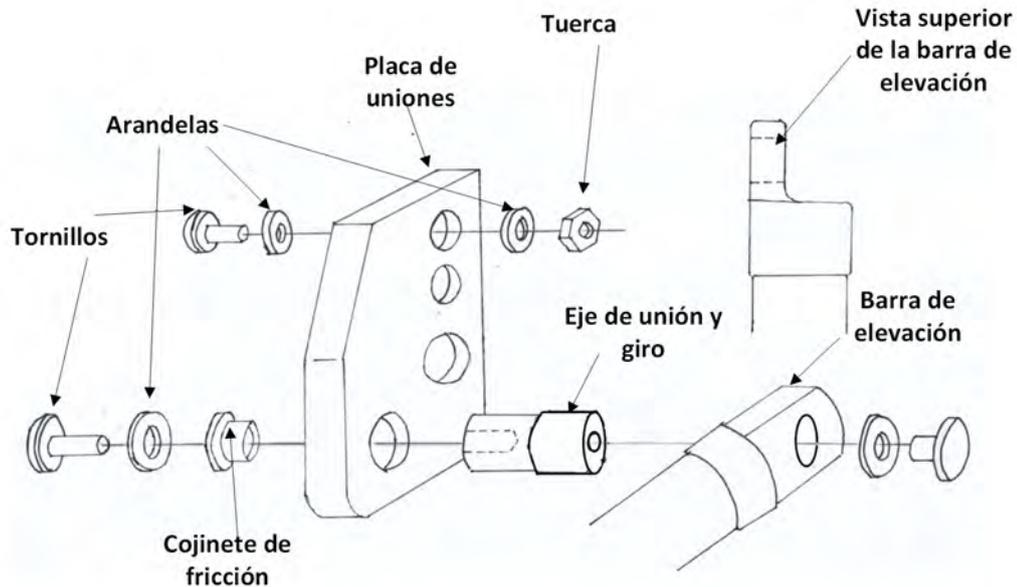


Fig. 4.4: Propuesta preliminar del ensamblaje en placa de uniones con barra de elevación y espaldar.

En la Figura 4.5 se muestra el detalle exterior de la caja electrónica, donde se observa el botón de ON/OFF, la salida del cable que va directo a la fuente de poder para cargar la batería y las tres entradas para los cables espiralados que conectan al acelerómetro, actuador lineal y al control. Por último, en la Figura 4.6a se muestra la imagen detallada del mando de control con sus botones respectivos, junto con el soporte que lo sostiene cuando no está siendo utilizado. Además, la Figura 4.6b presenta la distribución de hardware utilizado dentro de la caja electrónica.

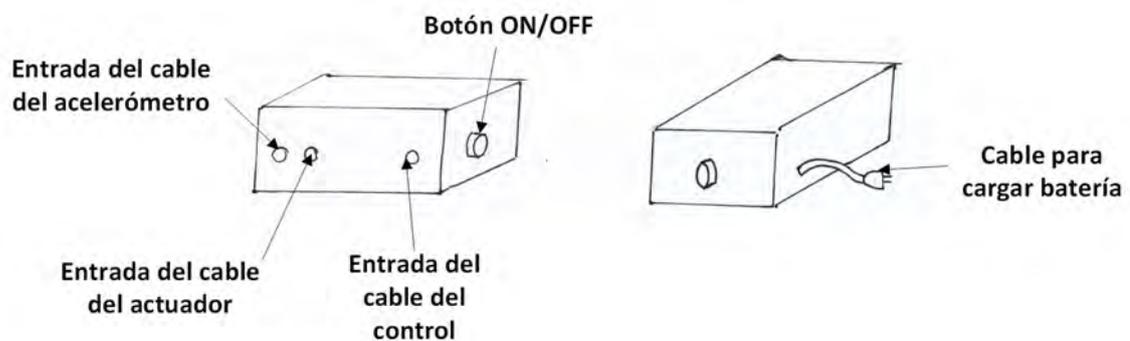


Fig. 4.5: Detalle exterior de la caja electrónica.

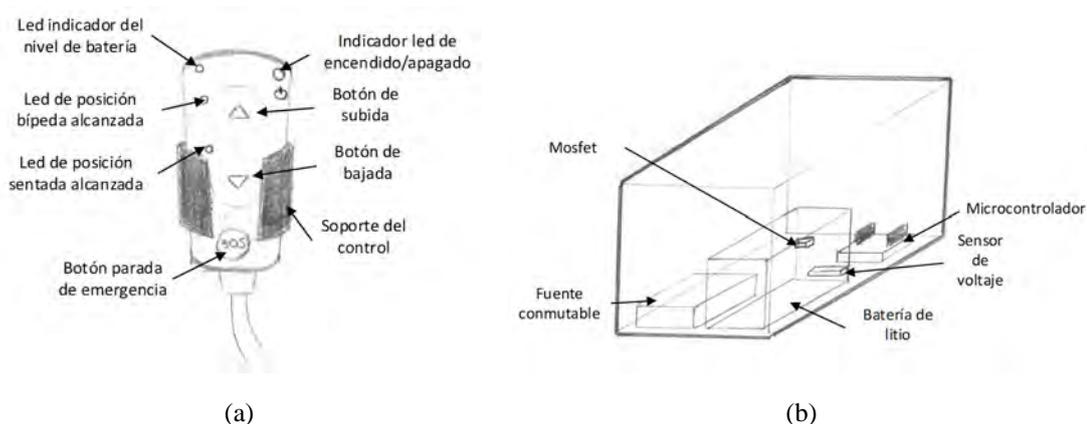


Fig. 4.6: (a) Vista ampliada del mando con botones y su soporte. (b) Distribución interna de la caja electrónica.

## 4.2. Diagrama de operaciones

Las operaciones que se realicen están ligadas a lo propuesto en el concepto de solución óptimo, donde se dividen en tres pasos: subir a la silla, bajar de esta y el accionamiento del movimiento para la posición bípoda. En la Figura 4.7a se muestra el diagrama de operaciones para el primer paso donde el usuario sube a la silla, se mueve, posiciona y termina con el accionamiento de los seguros.

En el segundo paso, como se muestra en la Figura 4.7b, el usuario procede a utilizar el sistema de posicionamiento bípodo, iniciando con el encendido de este, el uso del mando con botones para subir y bajar cuando lo requiera. Esta parte termina cuando el usuario vuelve a su posición sentada y retira los seguros para continuar con el uso regular de la silla.

Finalmente, la Figura 4.7c muestra las operaciones finales que realizar el usuario cuando decide dejar de utilizar la silla, donde este debe ubicarse en la posición específica y levantarse con ayuda de los brazos o ayuda externa.

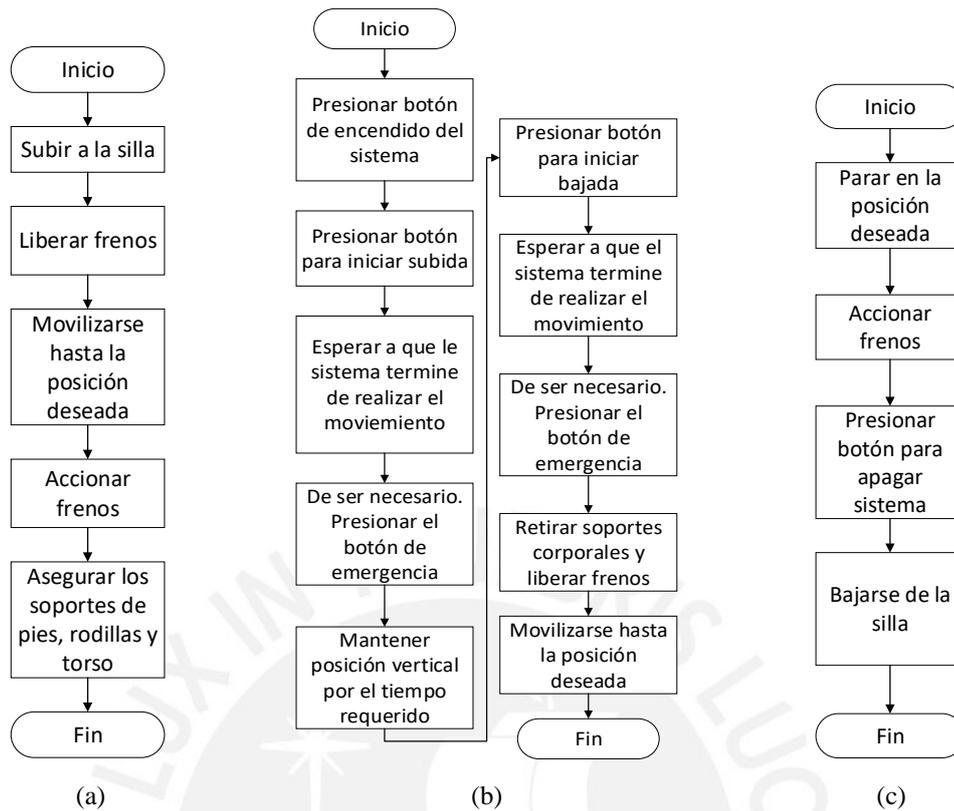


Fig. 4.7: (a) Diagrama de operaciones para la subida del usuario a la silla. (b) Diagrama de operaciones para el inicio del movimiento y cambio de posición del usuario. (c) Diagrama de operaciones para la bajada del usuario de la silla.

### 4.3. Diagrama de bloques

El diagrama de bloques presentado en la Figura 4.8 muestra la arquitectura que presenta el hardware del proyecto, junto con sus conexiones y el voltaje de alimentación respectivo para cada módulo. Una fuente conmutable es la que distribuye la energía al actuador lineal utilizado, al sensor de voltaje y al microcontrolador. Este último suministra energía a los leds y el acelerómetro, además de recibir la información del microcontrolador, de los botones y del sensor de voltaje para tomar las decisiones respectivas.

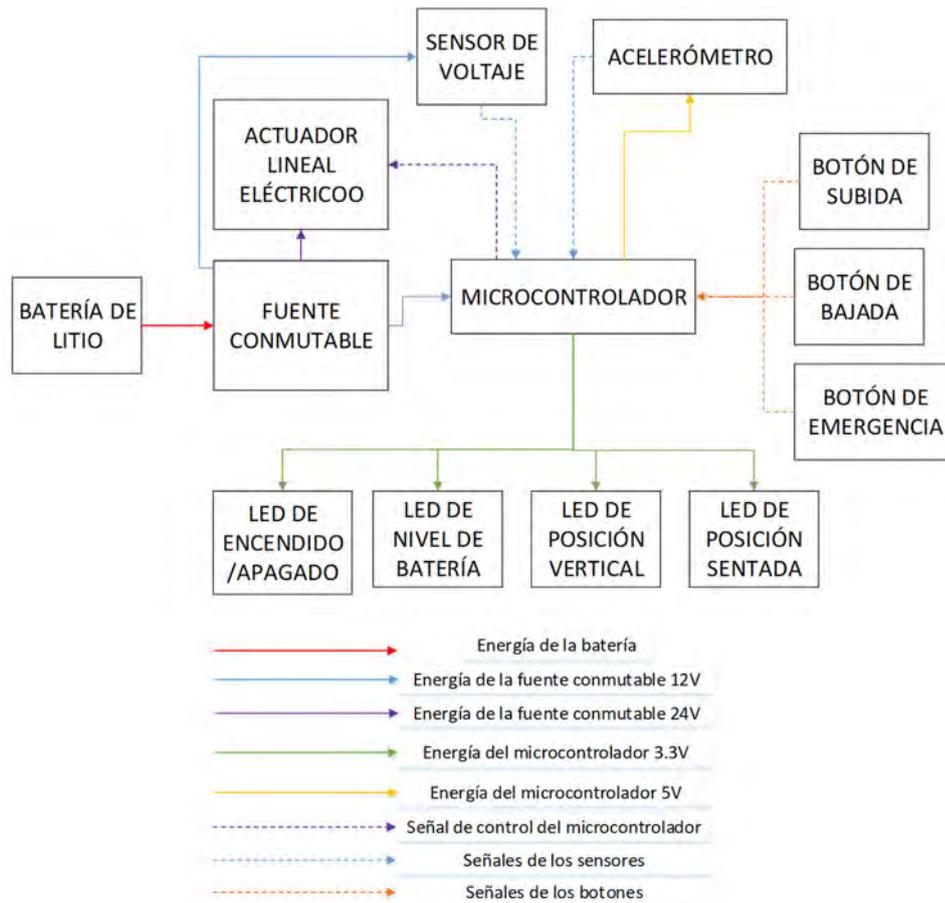


Fig. 4.8: Diagrama de bloques del sistema

#### 4.4. Diagrama de flujo

En la presente sección se detalla, mediante un diagrama de flujo en la Figura 4.9a y 4.9b, la lógica del procesamiento que seguirá el microcontrolador para ejecutar las instrucciones desde el encendido del sistema. Se muestran las decisiones que se toman de acuerdo a las instrucciones ingresadas y las variables medidas de los sensores para la realización de movimientos y control de notificaciones del nivel de batería.

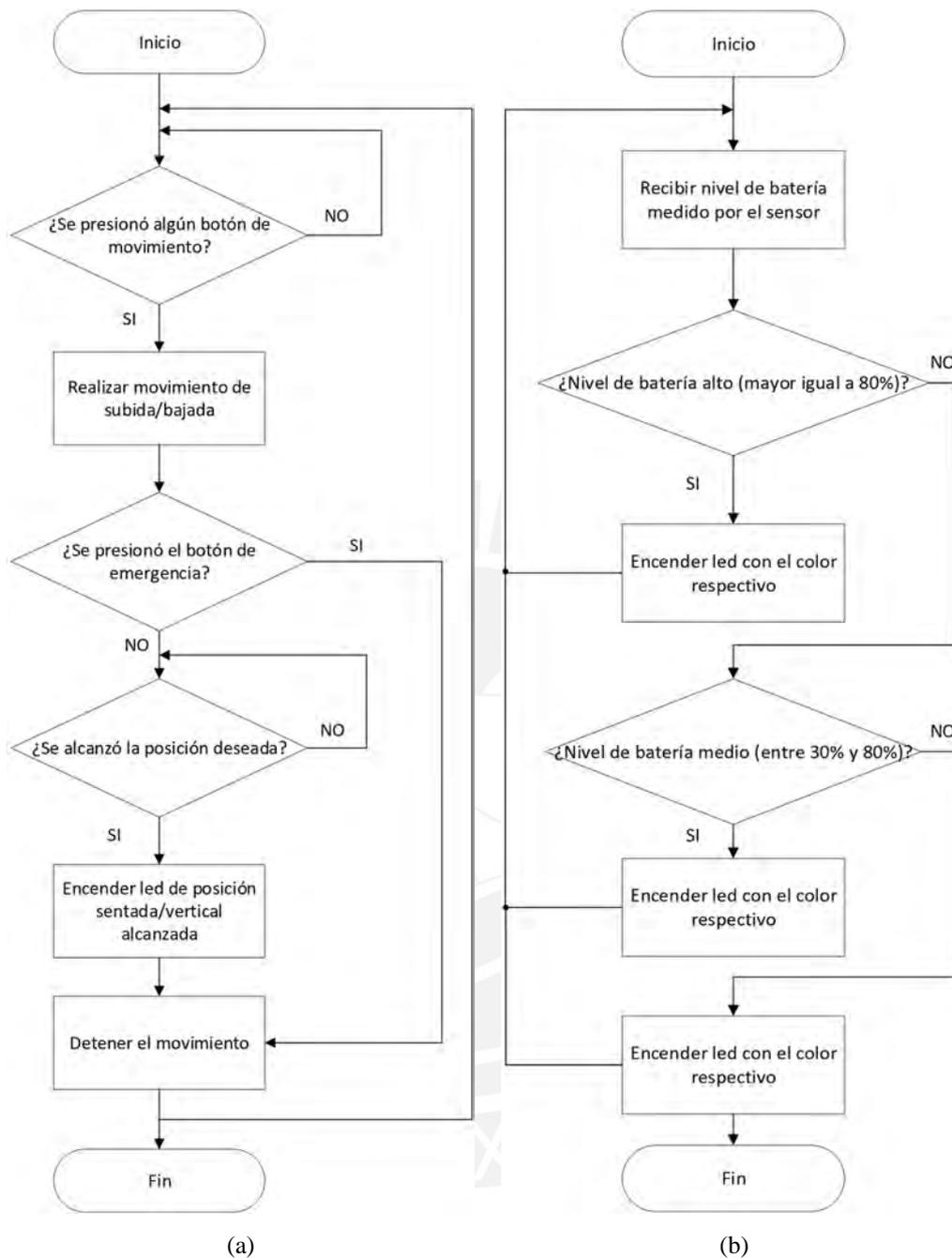


Fig. 4.9: (a) Diagrama de flujo para el control del movimiento. (b) Diagrama de flujo para el control del nivel de batería.

## CONCLUSIONES

Se logró realizar un diseño conceptual óptimo, el cual posee todos los implementos de seguridad necesarios para mantener estable al usuario en todo momento, así como un diseño que permite su fabricación dentro del país utilizando la menor cantidad de uniones posibles. Esto debido al seguimiento de la metodología VDI 2221, que contribuyó a plantear los objetivos, requerimientos, funciones y sistemas de evaluación necesarios para poder diseñar y elegir la mejor solución de la cual desprende el diseño conceptual.

Con una revisión exhaustiva de bases de datos, investigaciones académicas pasadas y desarrollos comerciales se pudo elaborar un estado del arte basado en una búsqueda con palabras clave (wheelchair, biped y paraplegic), las cuales permitieron que la investigación se centre en todo lo relacionado a sillas de ruedas que simulen el movimiento que realiza la persona al pararse y mantener aquella posición para un desempeño de sus actividades diarias. Con ello, se obtuvo un recopilado de información que resultó de utilidad y consulta al momento de realizar la propuesta conceptual y que se puede usar para el desarrollo de la silla de ruedas.

El análisis de la problemática, así como de las necesidades del usuario de sillas de ruedas promedio (en conjunto con el estado del arte) ayudaron a realizar la lista de requerimientos de diseño del dispositivo. Este listado fue de utilidad para hacer una elección de componentes que cumplan con las funciones necesarias. Se determinó como principal encargado del movimiento un actuador lineal eléctrico, ya que con este se pueden realizar movimientos más exactos, por lo que el posicionamiento del usuario resultaría más preciso al momento de controlarlo. De esta forma se lograría mantener el cuidado requerido al mover a una persona con discapacidad, además de que el uso del actuador como soporte del usuario también permite una mayor simpleza en el diseño de la estructura que soporta todos los componentes y pesos de la silla más usuario.

Finalmente, este trabajo podrá utilizarse como base o guía para la elaboración de proyectos o investigaciones futuras que consistan en el desarrollo de una silla de rueda para posicionamiento bípedo o similares.

## BIBLIOGRAFÍA

- [Armstrong, 2008] Armstrong, William; Borg, Johan; Krizack, Marc; Lindsley, Alida; Mines, Kylie; Pearlman, Jon; Reisinger, K., & Sheldon, S. (2008). Manuales Sillas De Ruedas Manuales. *Pautas Para El Suministro de Sillas de Ruedas Manuales*, 38–68. [who.int/disabilities/.../wheelchairguidelines\\_sp\\_finalforweb.pdf](http://who.int/disabilities/.../wheelchairguidelines_sp_finalforweb.pdf)
- [INEI, 2013] Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2013, December 2). *En el Perú 1 millón 575 mil personas presentan algún tipo de discapacidad*. <https://www.inei.gob.pe/prensa/noticias/en-el-peru-1-millon-575-mil-personas-presentan-alg/>
- [Churchward, 1985] Churchward, R. (1985). The development of a standing wheelchair. *Applied Ergonomics*, 16(1), 55–62. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(85\)90147-4](https://doi.org/10.1016/0003-6870(85)90147-4)
- [Cooper, 1995] Cooper, R. A., Ph, D., Robertson, R. N., Ph, D., & Boninger, M. L. (1995). *A biomechanical model for stand-up wheelchairs*. 2, 1183–1184.
- [Dawar, 2020] Dawar, G., Kejariwal, A., & Kumar, D. (2020). Design of a modular wheelchair with posture transformation capabilities from sitting to standing. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 15(6), 670–683. <https://doi.org/10.1080/17483107.2019.1604830>
- [Eguchi, 2013] Eguchi, Y., Kadone, H., & Suzuki, K. (2013). Standing mobility vehicle with passive exoskeleton assisting voluntary postural changes. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1190–1195. <https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6696501>
- [ENAHO, 2009] ENAHO. (2009). *Estado Nutricional en el Perú 2009*. 147.
- [Goher, 2016] Goher, K., Al-Yahmadi, A., & Bahadur, I. (2016). Kinematic analysis of the sit-to-stand mechanism of a reconfigurable wheelchair. *IECBES 2016 - IEEE-EMBS Conference on Biomedical Engineering and Sciences*, 3, 788–791. <https://doi.org/10.1109/IECBES.2016.7843558>
- [Goher, 2013] Goher, K. M., Shafiq, M., & Al-Yahmadi, A. (2013). Design of a reconfigurable wheelchair with a sit-to-stand facility for a disabled kid. *Nature-Inspired Mobile Robotics*, 133–140. [https://doi.org/10.1142/9789814525534\\_0020](https://doi.org/10.1142/9789814525534_0020)
- [Gorgues, 2005] Gorgues Zamora, J. (2005). Selección y adaptación de sillas de ruedas convencionales. *Offarm: Farmacia y Sociedad*, 24(8), 148–152.
- [Guillon, 2009] Guillon, B., Bouche, S., Bernuz, B., & Pradon, D. (2009). Sillas de ruedas: descripción, uso, criterios de elección. *EMC - Kinesiterapia - Medicina Física*, 30(2), 1–21. [https://doi.org/10.1016/s1293-2965\(09\)70732-7](https://doi.org/10.1016/s1293-2965(09)70732-7)
- [INEI, 2012] Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2012). Primera Encuesta Nacional Especializada sobre Discapacidad 2012. *Instituto Nacional de Estadística e Informática*, 588. [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1171/ENEDIS\\_2012\\_-\\_COMPLETO.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1171/ENEDIS_2012_-_COMPLETO.pdf)
- [Jiang, 2019] Jiang, T. C., Yin, S. H., & Tanaka, E. (2019). Wheelchair Able to Assist the Elderly to Move on Stairs and Stand up. *2019 58th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan, SICE 2019*, c, 1168–1173.

<https://doi.org/10.23919/SICE.2019.8859944>

- [Loh Medical, 2019] Loh Medical. (2019). *Manual del Propietario Setonix* (p. 6). [https://cdn2.totalcode.net/lohmedical-co/docs/538\\_SETONIXownersManual\\_2019.08.14S.pdf](https://cdn2.totalcode.net/lohmedical-co/docs/538_SETONIXownersManual_2019.08.14S.pdf)
- [Manual, 2001] Manual, C., Brochure, G., Products, I., Wheelchairs, R., Examiner, P., & Vanaman, F. (2001). *US 6,231,067 B1*.
- [MVCS, 2006] Ministerio de vivienda construcción y saneamiento. (2006). Reglamento Nacional De Edificaciones. In *Reglamento Nacional De Edificaciones*. <http://www3.vivienda.gob.pe/pnc/docs/normatividad/varios/Reglamento Nacional de Edificaciones.pdf>
- [Petrotos, 2016] Petrotos, D. M. P. (2016). *WO2016181173A1*.
- [Putra, 2017] Putra, R. H., Rahman, A. G. W., Ningrum, E. S., & Purnomo, D. S. (2017). Design and stress analysis on electric standing wheelchair. *Proceedings IES-ETA 2017 - International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications, 2017-Decem*, 112–117. <https://doi.org/10.1109/ELECSYM.2017.8240388>
- [Ramirez, 2013] Ramírez, A. V. (2013). Antropometría del trabajador minero de la altura. *Anales de La Facultad de Medicina*, 67(4), 298. <https://doi.org/10.15381/anales.v67i4.1311>
- [Luengas, 2013] Luengas, Lely; Camargo, Esperanza; Sánchez, G. (2013). Estudio de los rangos articulares en la bipedestación estática en personas normales vs. Amputados transtibiales. *Tecnura*, 17(2), 60–68. <https://doi.org/10.14483/22487638.7223>
- [Shi,2019] Shi, Y., Meng, L., & Chen, D. (2019). Human Standing-Up Trajectory Model and Experimental Study on Center-Of -Mass Velocity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 612(2). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/612/2/022088>
- [Yáñez,2009]Yáñez, J. (2009). La antropometría : un primer paso para conocer nuestro entorno un primer paso para conocer nuestro entorno. *Ide@s CONCYTEG*, 4(48).
- [Winter, 1995] Winter, D. (1995). Human balance and posture control during standing and walking. *Gait & Posture*, 3, 193–214. [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(86\)80927-9](https://doi.org/10.1016/0014-5793(86)80927-9)