

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



**PROPUESTA CONCEPTUAL DE UNA SILLA DE RUEDAS  
TELEOPERADA PARA NIÑOS CON DISCAPACIDAD FÍSICA  
MOTRIZ**

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

Autor:

**Kenzo Nicolas Manrique Gómez**

Asesor:

**Dr. Ing. Dante Ángel Elías Giordano**

Lima, Agosto, 2022



© 2022, Kenzo Nicolas Manrique Gómez

Se autoriza la reproducción total o parcial,  
Con fines académicos a través de cualquier  
Medio o procedimiento, incluyendo la cita  
Bibliográfica del documento.

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realizó el diseño conceptual de una silla de ruedas teleoperada para niños con discapacidad física motriz entre los 6 y 12 años. El diseño planteado de la silla de ruedas teleoperada posee dos modalidades, conducción manual y remota por medio de un dispositivo móvil. Además, el paciente tiene la posibilidad de realizar sus necesidades higiénicas con mayor facilidad y comodidad desde la propia silla de ruedas, ubicando la silla sobre el inodoro.

Primero, se realizó un marco teórico donde se identificó la situación actual de los niños con discapacidad física motriz y las diversas enfermedades que afrontan. Posteriormente, se realizó un análisis del estado del arte para comparar las tecnologías existentes, y en base a estas y a los requisitos de usuario, se identificaron los requisitos de diseño. Con esta información se definió las principales funciones y subfunciones del sistema, así como los componentes requeridos para su correcto funcionamiento por medio de una solución óptima a la problemática.

Por último, para explicar el funcionamiento del sistema mecatrónico diseñado se presentó los diagramas de arquitectura mecatrónica y dominio eléctrico electrónico en base a la solución óptima seleccionada, así como un primer bosquejo técnico del sistema físico y, un diagrama de operaciones general que describe la lógica y secuencia del sistema diseñado.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	i
APROBACIÓN DEL TEMARIO DE TESIS	ii
DEDICATORIA	iii
ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
INTRODUCCIÓN	1
I. MARCO TEÓRICO	4
1.1 Situación de niños con discapacidad	4
1.2 Tipos de discapacidad motora	9
1.3 Tipos de sillas de ruedas	12
1.4 Biomecánica en las sillas ruedas	16
II. ESTADO DEL ARTE	32
2.1 Estado de la tecnología en sillas de ruedas eléctrica	32
2.2 Estudio comparativo de silla de ruedas eléctricas	38
2.3 Normativa para el diseño de silla de ruedas	42
III. DISEÑO CONCEPTUAL	47
3.1 Requisitos de Usuario	47
3.2 Requisitos de Diseño	48
3.3 Descomposición funcional y síntesis de medios	53
3.4 Arquitectura del Sistema Mecatrónico	70
3.5 Arquitectura del Dominio Eléctrico y Electrónico	73
3.6 Bosquejo Técnico	75
3.7 Diagrama de Operaciones	79
CONCLUSIONES	86
BIBLIOGRAFÍA	88
ANEXOS	A
Anexo A: Asignación del peso relativo de los requisitos de diseño	A1
Anexo B: Matriz de Requisitos de Diseño	A2
Anexo C: Diagrama de Funciones y síntesis de medios	A3

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1: Población con y sin discapacidad que asiste a algún colegio, instituto o universidad, según grupos de edad	7
Tabla 2.1: Comparación de sillas de ruedas manuales en el mercado actual	37
Tabla 2.2: Comparación de sillas de ruedas eléctricas en el mercado actual	39
Tabla 3.1: Resumen de los requerimientos para el diseño	53
Tabla 3.2: Propuestas de solución del nivel 2	60
Tabla 3.3: Alternativas para propulsar rueda derecha e izquierda de la silla	62
Tabla 3.4: Alternativas para desplazar la silla de ruedas	62
Tabla 3.5: Alternativas para controlar el desplazamiento de la silla de ruedas	63
Tabla 3.6: Ventajas y desventajas de sistemas de freno eléctricos y de disco	64
Tabla 3.7: Ventajas y desventajas de los encoders magnéticos y ópticos	65
Tabla 3.8: Ventajas y desventajas de los sensores de ultrasonido e infrarrojos	66
Tabla 3.9: Ventajas y desventajas de discos hidráulicos y mecánicos	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1: Distribución de la población con y sin discapacidad, según grupos de edad y sexo	5
Figura 1.2: Población con y sin discapacidad por grandes grupos de edad	6
Figura 1.3: Población por tipo de discapacidad, según área de residencia	6
Figura 1.4: Nivel de educación por población de 15 años y más con y sin discapacidad	7
Figura 1.5: Personas con discapacidad de locomoción y/o destreza, según características de la limitación	8
Figura 1.6: Barreras que manifiesta la población con discapacidad para acceder a un centro educativo	8
Figura 1.7: a) Silla de ruedas autopropulsada. b) Silla de ruedas asistida	13
Figura 1.8: Silla de ruedas eléctrica	14
Figura 1.9: Silla de ruedas de bipedestación	14
Figura 1.10: Silla de ruedas para deporte	15
Figura 1.11: Silla de ruedas bariátrica	15
Figura 1.12: Silla de ruedas para subir escaleras	16
Figura 1.13: Partes de una silla de ruedas convencional	17
Figura 1.14: Posición correcta de las ruedas para autopropulsión	19
Figura 1.15: a) Ángulo neutro. b) Ángulo positivo. c) Ángulo negativo.	20
Figura 1.16: Grados de movilidad del usuario para propulsión de la silla	20
Figura 1.17: Determinación de ancho de silla de ruedas	21
Figura 1.18: Medición de la longitud del muslo para profundidad de la silla	22
Figura 1.19: Medición de la longitud de la pantorrilla par altura de la silla	22
Figura 1.20: Medición de la altura inferior de la escápula para respaldo de la silla	23
Figura 1.21: Medición de la altura del hombro para respaldo de la silla	23
Figura 1.22: Sistema coordinado de la silla de ruedas	24

Figura 1.23: Diagrama de cuerpo libre general de vehículo	26
Figura 1.24: Porcentaje de pendientes	27
Figura 1.25: Comportamiento estático y cinético del rozamiento	28
Figura 1.26: Diagrama de la rueda motriz de un vehículo	28
Figura 1.27: Diagrama de cuerpo libre de un vehículo en dinámica de frenado	30
Figura 2.1: Patente JP2002045402A	33
Figura 2.2: Prototipo de silla de ruedas eléctrica para subir y bajar veredas	34
Figura 2.3: Silla de ruedas multifuncional para niños entre 6 y 12 años	35
Figura 2.4: Silla de ruedas multifuncional para un adulto con paraplejia	36
Figura 2.5: Silla de ruedas eléctrica controlada por dispositivo móvil	36
Figura 2.6: Silla de ruedas eléctrica K450 MX	40
Figura 2.7: Silla de ruedas eléctrica K300 PS Jr.	41
Figura 2.8: Silla de ruedas eléctrica controlada por un dispositivo móvil	42
Figura 2.9: Características de diseño en rampas	44
Figura 2.10: Características de diseño en rampas consecutivas	44
Figura 2.11: Características de diseño de inodoros	45
Figura 2.12: Radio de giro de silla de ruedas en cubículo de baño	45
Figura 2.13: Características de diseño de urinarios	46
Figura 3.1. Arquitectura General del Sistema Mecatrónico modificado	55
Figura 3.2: Estructura del Sistema Mecatrónico	70
Figura 3.3: Arquitectura del Sistema Mecatrónico	72
Figura 3.4: Arquitectura del Dominio Eléctrico/Electrónico	74
Figura 3.5: Vista general de la silla de ruedas	75
Figura 3.6: Caja de componentes electrónicos	76
Figura 3.7: Vista trasera de la silla de ruedas	76
Figura 3.8: Módulo de joystick	77
Figura 3.9: Brazo abatible. a) Posición horizontal. b) Posición vertical.	78

Figura 3.10: Rueda antivuelco lateral	78
Figura 3.11: Diagrama de operaciones según la perspectiva del usuario	80
Figura 3.12: Diagrama de operaciones según la perspectiva del sistema	82
Figura 3.13: Diagrama de interrupción del botón On/Off	83
Figura 3.14: Diagrama de interrupción del frenado	84
Figura 3.15: Diagrama de interrupción en caso de emergencia	84
Figura 3.16: Diagrama de interrupción de la velocidad	85





## INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen más de mil millones de personas, es decir, alrededor del 15% de la población mundial presenta alguna discapacidad (OMS, 2020). Según la OMS esta cifra se mantiene en constante aumento debido en parte al envejecimiento de la población y el aumento de las enfermedades crónicas que generan dificultades considerables para recurrir a una asistencia sanitaria. La realidad es que la población con discapacidad aún enfrenta barreras para sentirse parte de la sociedad, pues muchas veces son aislados y discriminados de servicios médicos, oportunidades de empleo y educación, así como participación en normas y políticas. Estas desventajas generan un ambiente desfavorable y una gran repercusión en la experiencia y en el grado de la discapacidad que afrontan.

La coyuntura mundial por el COVID-19 ha minimizado mucho más este concepto del estilo de vida de las personas con discapacidad, pues ante el temible contagio los servicios públicos y asistencias se encuentran saturados y las naciones no han incluido una respuesta de medida de control para las personas con discapacidad durante la pandemia, expandiéndose a riesgos más devastadores (OMS, 2020).

La situación resulta ser más influyente en el caso de los niños, que son uno de los grupos más excluidos de la sociedad, ya que experimentan barreras más significativas que limitan su desarrollo físico, mental y social. Un niño con limitación de movilidad o discapacidad motriz muchas veces requiere el uso de una silla de ruedas que les permita moverse con facilidad y adecuarse lo mejor posible en su entorno, Sin embargo, la adquisición de las sillas de ruedas que se ajusten a la necesidad de la persona no siempre es obtenida.

Las circunstancias sociales muchas veces limitan a estos niños a formar parte de su entorno, pues no se aplican adecuadamente las medidas necesarias en los centros educativos como, por ejemplo, colocar rampas o elevadores para subir de niveles, servicios higiénicos para personas con discapacidad, protocolos y capacitación para la inclusión del tema de discapacidad en el ambiente educativo, etc. Esto promueve que

los niños se aferran a la educación no presencial ya que piensan que no recibirán el apoyo y recursos necesarios (Sánchez, 2018).

Esta situación afecta muchas veces el estado emocional del niño y de los familiares. Los niños tienden a reprimirse y evadir situaciones de la vida diaria, como ir al colegio, relacionarse con sus pares y tomar decisiones con respecto al progreso psicológico de su limitación. El Banco Mundial registró en el 2017 a 19 países en desarrollo, incluido el Perú, con una tasa de finalización de la escuela primaria de niños con discapacidad de solo el 48%, y que “3 de cada 10 niños con discapacidad jamás han asistido a la escuela” (Male, 2017). Estos niños se enfrentan diariamente a actitudes negativas, estereotipos, abusos, aislamiento y baja autoestima; debido a que no pueden realizar sus actividades diarias con normalidad, sienten incomodidad al tener que acostumbrarse a usar una silla de ruedas, y se sienten inferiores a sus pares y formándose la idea de que no podrán tener una vida normal. Es por eso por lo que el entorno familiar es primordial para incentivar al niño a formar parte de la sociedad.

El Perú no es ajeno a esta situación ya que, siendo un país subdesarrollado, aún no dispone de medidas suficientes que puedan mejorar el estilo de vida de estos niños y permitirles formar parte de la sociedad. La situación económica del país se ha visto comprometida por la necesidad de adquirir recursos para combatir el COVID-19 y, además, las importaciones realizadas se hacen bajo cierto criterio financiero aceptable por el gobierno, el cual se inclina a la obtención de productos económicamente viables y de gama media-baja. En el caso de las sillas de ruedas, el Perú no importa sillas de ruedas especializadas para niños ya que, el comercio de esta área es cubierto sólo para sillas de ruedas estándar para adultos importadas mayormente desde China, Estados Unidos y Bélgica (OEC, 2019). Bajo estas circunstancias los niños se ven obligados a adquirir estas sillas que no son ajustables a su medida, que no les permite realizar sus actividades de la mejor manera posible y que puede provocar más daños a su condición física.

Algunas organizaciones y voluntarios han contribuido con la donación de sillas de ruedas convencionales a adultos y niños del litoral peruano con escasos recursos

económicos (MINSA, 2017); sin embargo, aún se les puede ofrecer un servicio de atención que mejore su calidad de vida.

Por lo tanto, se propone un diseño conceptual de una silla de ruedas eléctrica para niños con discapacidad física motriz permanente entre los 6 y 12 años, que también pueda ser controlada por medio de un dispositivo móvil y que les permita realizar sus actividades higiénicas con mayor accesibilidad. Para ello, se identifica la situación actual de los niños con discapacidades físicas motrices en el ámbito educativo primario, la biomecánica de las sillas de rueda y los tipos de silla de ruedas existentes. Seguidamente, se determinan los requerimientos del usuario y del sistema para obtener un diseño conceptual de una propuesta de solución óptima a través de la metodología del diseño mecatrónico “Design Methodology for Mechatronic Systems”, propuesta por la Profesora Karol Muñoz, el Ingeniero Víctor De Negri y el Magíster Vinícius Vígolo (De Negri, 2021). El diseño conceptual desarrollado comprende los bosquejos técnicos, diagrama de operaciones y arquitectura mecatrónica de la silla de ruedas propuesta.

Este trabajo busca incentivar la inclusión de las personas con discapacidad motriz a la sociedad, a través de tecnologías automáticas para el desplazamiento de los niños de 6 a 12 años con discapacidad motriz permanente y para una mejor accesibilidad en sus actividades cotidianas. La propuesta de solución conceptual plantea mejorar las condiciones actuales de estos niños en el ámbito educativo a nivel primaria, de tal manera que puedan desarrollarse, participar en sus actividades educativas con normalidad como el resto de sus pares y cambiar la perspectiva actual de estos niños con respecto a su limitación. Además, este trabajo también busca promover la realización de más proyectos y futuras investigaciones en esta área de la tecnología.

## **CAPÍTULO 1**

### **MARCO TEÓRICO**

En el presente capítulo se presenta una descripción estadística de la situación de los niños con discapacidad en el mundo y en el Perú, identificando las barreras de accesibilidad que más enfrentan y el nivel de asistencia escolar. Luego, se presentan los tipos de enfermedades variantes de la discapacidad física motriz, las cuales según diversos factores imposibilitan el uso de los miembros inferiores del niño. Posteriormente, se presenta la clasificación de sillas de ruedas según su aplicación y necesidad del usuario. A partir de esto, se explica también la biomecánica de estas sillas de ruedas para correcto funcionamiento y aplicación según la necesidad del usuario.

#### **1.1 Situación de niños con discapacidad**

Según el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF) en América Latina y el Caribe se estima que más de 9 millones de niños menores de 14 años sufren de alguna discapacidad y según el registro de información de 18 países, las mayores prevalencias se relacionan con la limitación visual y de movilidad (UNICEF, 2019).

Las circunstancias que afrontan estos niños según su limitación son muy complicadas ya que la demanda de recursos de rehabilitación o soporte médico como las sillas de ruedas, por ejemplo, superan las cifras de la oferta comercial. Las cifras de la OMS registradas en el año 2013 presentaban que 70 millones de personas en el mundo requieren sillas de ruedas, pero solo entre el 5% y 15% tiene acceso a ellas.

En Perú se registró que las personas con discapacidad representan el 10.4% de la población, es decir, por cada 10 pobladores del Perú existe un poblador que presenta alguna discapacidad (INEI, 2019).

En el 2017, el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) presentó que la población de varones menores a los 18 años representa el 17.9% de personas con discapacidad y el 12.6% representa a las mujeres menores a los 18 años. En la Figura 1.1 se presenta a la población con y sin discapacidad según grupos de edad y sexo.

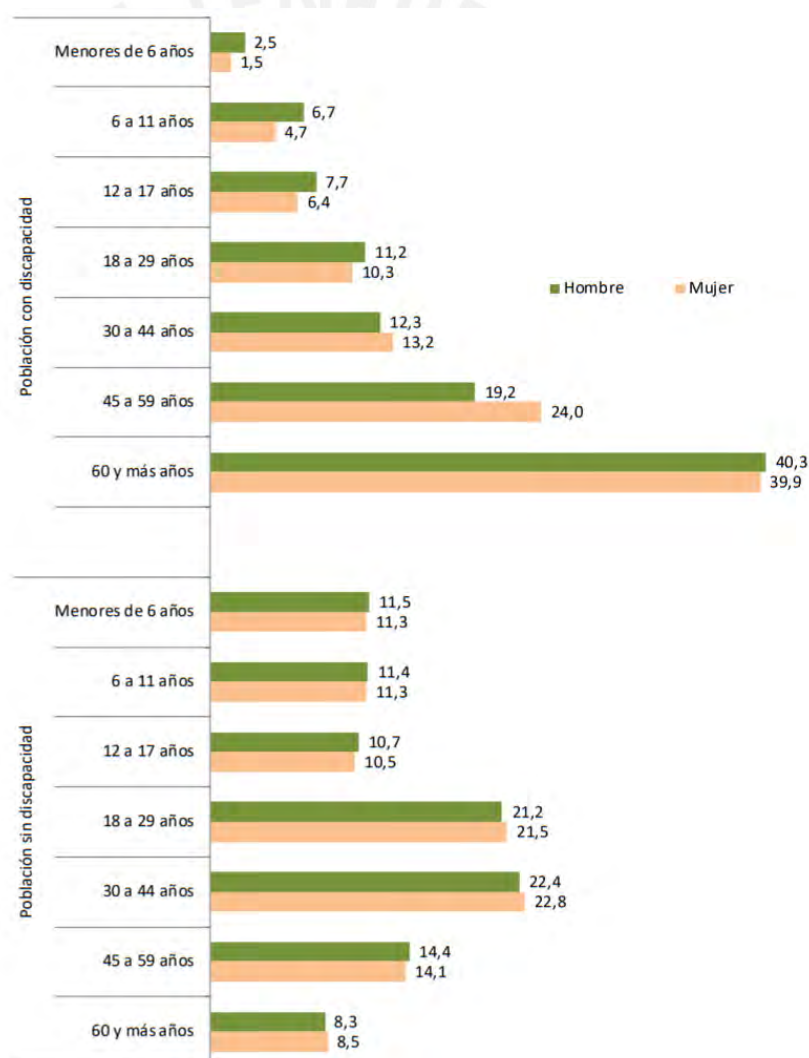


Fig. 1.1. Distribución de población con y sin discapacidad, según grupo de edad y sexo (INEI, 2017).

En la Figura 1.1 se puede observar que la población menor a 18 años sin discapacidad (66.7%) tiene una diferencia superior de 36.2% con respecto a la población menor a

18 años con discapacidad (30.5%), lo cual refleja que los niños menores a 18 años con discapacidad representan aproximadamente un tercio porcentual de toda la población de niños en el Perú.

En el 2019 se registró que el 6.7% de la población con discapacidad representaba a la población menor a los 15 años, como se muestra en la Figura 1.2. Dentro de las diferentes limitaciones, se registró que la dificultad para caminar es la segunda discapacidad más relevante en el Perú con el 15.1%, dentro del cual el 43% corresponde a los hombres y el 57% corresponde a las mujeres. En la Figura 1.3 se presenta que el 22.5% de personas con discapacidad residen en zonas rurales y el 13.8% reside en zonas urbanas.

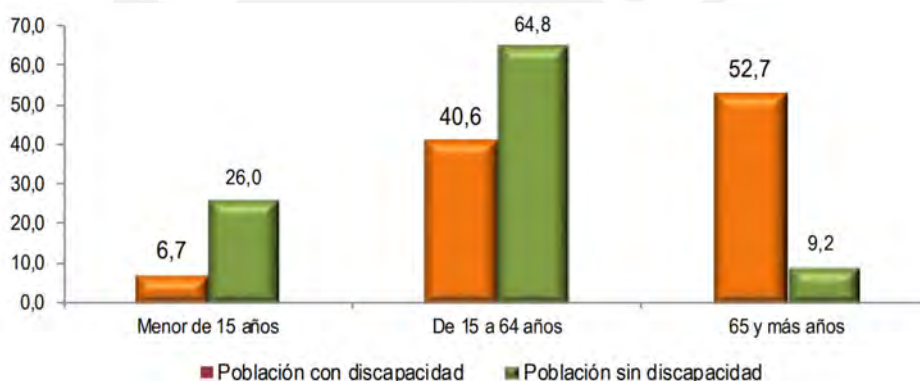


Fig. 1.2. Población con y sin discapacidad por grandes grupos de edad (INEI, 2019).

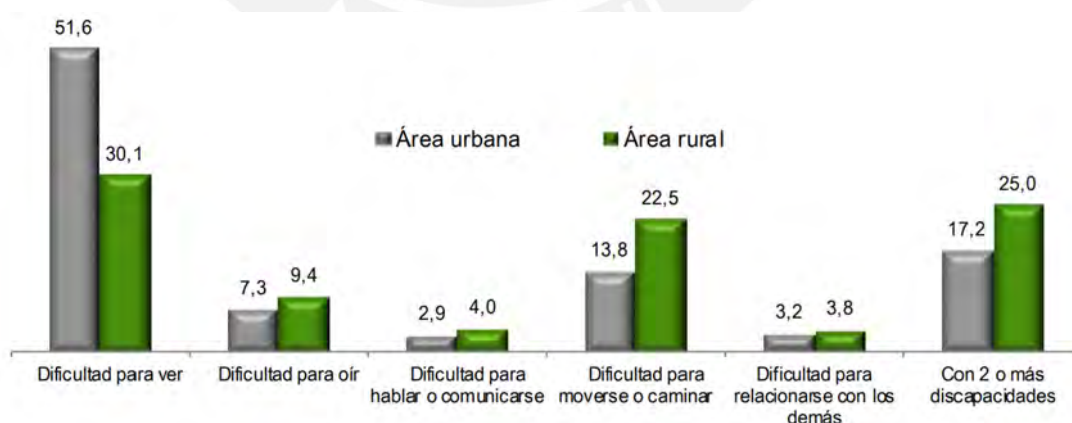


Fig. 1.3. Población por tipo de discapacidad, según área de residencia (INEI, 2017).

Otro factor importante en la situación de niños con discapacidad es el nivel educativo alcanzado ya que, según las limitaciones que presentan existe un alejamiento o

exclusión de estos niños para poder realizar sus actividades educativas con las medidas y protocolos que requieren para poder realizarlas de la mejor manera posible.

El INEI registró que, de la población con discapacidad, el 19.5% no cuenta con instrucción inicial, el 41% no cuenta con educación primaria y el 27% no cuenta con instrucción secundaria. En la Figura 1.4 se presenta a la población con discapacidad de 15 años y más según el nivel de educación alcanzado.

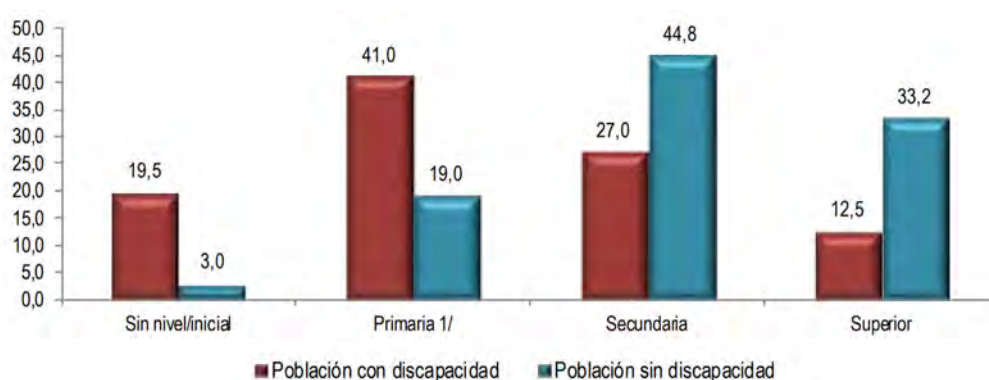


Fig. 1.4. Nivel de educación por población de 15 años y más con y sin discapacidad (INEI, 2019).

La asistencia escolar para las personas que declaran tener alguna discapacidad en el caso de los niños de 3 a 5 años tiene un porcentaje de 65.7%, para niños de 6 a 11 años, de 90.3%, para niños de 12 a 14 años, de 89.6% y para niños de 15 a 16 años, de 86.3%. Entonces, aproximadamente el 17.3% de los niños entre los 3 y 16 años no asiste a la escuela. En la Tabla 1.1 se muestra la asistencia escolar de las personas con discapacidad según el rango de edad.

Tabla 1.1. Población con y sin discapacidad que asiste a algún colegio, instituto o universidad, según grupos de edad (INEI, 2017).

Grupos de edad	Población con alguna discapacidad					Población sin discapacidad				
	Total	Si Asiste	%	No Asiste	%	Total	Si Asiste	%	No Asiste	%
<b>TOTAL</b>	<b>3 189 379</b>	<b>586 482</b>	<b>18,4</b>	<b>2 602 897</b>	<b>81,6</b>	<b>26 492 291</b>	<b>9 378 040</b>	<b>35,4</b>	<b>17 114 251</b>	<b>64,6</b>
3 a 5	41 528	27 273	65,7	14 255	34,3	1 657 339	1 181 400	71,3	475 939	28,7
6 a 11	179 398	162 004	90,3	17 393	9,7	3 182 855	3 068 852	96,4	114 003	3,6
12 a 14	113 562	101 734	89,6	11 828	10,4	1 539 157	1 448 423	94,1	90 734	5,9
15 a 16	73 021	62 318	85,3	10 703	14,7	949 248	828 740	87,3	120 508	12,7
17 a 18	71 241	49 898	70,0	21 343	30,0	983 030	628 491	63,9	354 539	36,1
19 a 20	64 647	39 536	61,2	25 111	38,8	973 084	499 599	51,3	473 486	48,7
21 a 29	243 644	77 761	31,9	165 883	68,1	4 511 906	1 090 583	24,2	3 421 323	75,8
30 a más	2 402 339	65 957	2,7	2 336 382	97,3	12 695 672	631 953	5,0	12 063 719	95,0

Según la Primera Encuesta Nacional sobre Discapacidad realizada por el INEI en el 2012, la característica más común entre las personas con discapacidad de locomoción es la dificultad para caminar largas o cortas distancias (92%), la segunda característica de la limitación más común es la incapacidad de mantener equilibrio y caminar con dificultad (53.1%). Las menos comunes son no poder usar cubiertos y dificultad para agarrar objetos con 21.5% y 19.1% respectivamente. En la Figura 1.5 se presentan las características más comunes de personas con discapacidad de locomoción y/o destreza.



Fig. 1.5. Personas con discapacidad de locomoción y/o destreza, según características de la limitación (INEI, 2012).

Además, en los centros educativos existen barreras de accesibilidad que no les permiten a los niños con discapacidad hacer uso de servicios, ya sea por la movilidad hacia lugares dentro de la institución educativa o por la incapacidad de acceder a los servicios de esta. En la Figura 1.6 se presentan las principales barreras de accesibilidad que encuentra la población en los centros educativos.

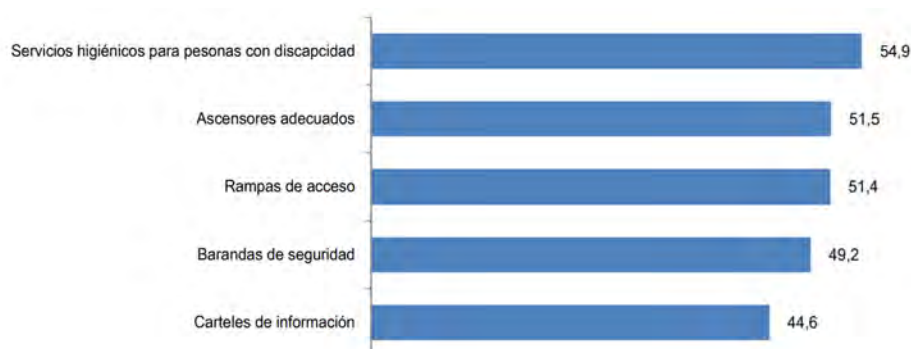


Fig. 1.6. Barreras para la población con discapacidad para acceder a un centro educativo (INEI, 2012).



Según el CONADIS se ha registrado a la fecha que los niños representan el 17% de la población con discapacidad, y que existe un 66.3% de personas con discapacidad de locomoción o destreza motriz (CONADIS, 2021). Además, según la Escala del Ministerio de Educación (MINEDU), se registró un 13.5% de niños que recibieron apoyo de inclusión nivel inicial, 18.1% a nivel primaria y 15.2% a nivel secundaria (Torres, 2019).

La obtención de sillas de ruedas en el Perú no se centra en la importación de sillas de ruedas especializadas para niños ya que, el comercio de esta área es cubierto sólo para sillas de ruedas estándar para adultos, importadas mayormente desde China con un 88.3%, Estados Unidos con un 4.24% y Bélgica con un 3.77% (OEC, 2019). Cabe resaltar que estas importaciones en el 2019, valorizadas en \$2.71 millones no llega a cubrir todo el público objetivo.

## **1.2 Tipos de discapacidad motora**

La discapacidad física o motriz es una situación que impide o dificulta que la persona pueda moverse con libertad y con plena funcionalidad. Este tipo de discapacidad afecta especialmente las extremidades provocando no poder mover de manera voluntaria su musculatura esquelética. Esta discapacidad que afecta al aparato locomotor tiene una gran variedad de limitaciones que pueden ser permanentes o temporales (Zuasti, 2020). A continuación, se presentan las enfermedades que limitan la movilización.

### **1.2.1 Monoplejía**

Es un tipo de parálisis que sólo afecta a una de las extremidades inferiores del cuerpo. Sus síntomas característicos son:

- Falta de coordinación muscular al realizar movimientos voluntarios (ataxia).
- Músculos tensos y rígidos y reflejos exagerados (espasticidad).
- Arrastrar una pierna al caminar o hacerlo apoyando solo la punta del pie.
- Dificultad para tragar o hablar.

### 1.2.2 Paraplejia

La paraplejia es un tipo de parálisis que produce daños en la vértebra dorsal o en zonas inferiores, es decir, piernas y pies (KARMA, 2020). Además, existen grados de paraplejia según la extensión del daño en la vértebra, estos son:

- Parálisis total y sin sensibilidad: El paciente no puede realizar movimientos.
- Algunos movimientos y alguna sensibilidad: En algunos casos el paciente puede mover los miembros, pero con poca fuerza.
- Capacidad limitada para caminar: En algunos casos puede caminar con ayuda de elementos ortopédicos.
- Capacidad de caminar: En algunos casos el paciente puede caminar por su cuenta, pero con movimientos limitados y con dificultades.

Esta limitación es causada mayormente por enfermedades como la espina bífida, esclerosis múltiple, tumores, mielitis transversa, etc.

### 1.2.3 Hemiplejia

Es un trastorno del cuerpo donde se paraliza la mitad del cuerpo. Puede ser generado por accidentes cerebrovasculares, enfermedades que afectan la espina dorsal o los hemisferios cerebrales (Sunrise Medical, 2020). Existen cuatro clases principales de la patología:

- Hemiplejia cerebral: Tiene origen por una lesión cerebral.
- Hemiplejia espinal: Se origina por lesiones en la columna vertebral.
- Hemiplejia facial: Paralización que afecta a la mitad de la cara.
- Hemiplejia espástica: Paralización del cuerpo y provoca movimientos espásticos en la misma área afectada.

Los síntomas más comunes son:

- ❖ Problemas para andar y mantener el equilibrio
- ❖ Dificultad con actividades motoras, como sujetar o agarrar

- ❖ Visión borrosa o débil
- ❖ Pérdida de sensaciones en una mitad del cuerpo
- ❖ Adormecimiento u hormigueo en una mitad del cuerpo
- ❖ Pérdida de control del intestino y vejiga
- ❖ Pérdida de la memoria, etc.

#### **1.2.4 Espina Bífida**

Es un defecto congénito que ocurre cuando la columna vertebral y la médula espinal no se forman adecuadamente. Provoca discapacidades moderadas o graves que afecta el posicionamiento del cuerpo, pérdida de sensibilidad en las piernas o pies, o no poder mover las piernas (Mayo Clinic, s.f.). Existen diferentes tipos de espina bífida:

- Espina bífida oculta: Es cuando la columna vertebral del bebe no se forma por completo durante el embarazo, provocando un pequeño hueco en los huesos de la columna vertebral.
- Mielomeningocele: También conocido como espina bífida abierta, es el tipo más grave de espina bífida debido a que los huesos de la columna no se han formado totalmente. Esto genera que el paciente sea propenso a infecciones mortales, parálisis, y disfunciones en órganos.

#### **1.2.5 Distrofia Muscular**

Es un grupo de enfermedades que provocan debilidad progresiva, provoca contracciones, debilidad muscular y pérdida del tejido muscular. Mayormente los síntomas de la variedad más frecuente comienzan en la infancia, principalmente en los varones. No existe una cura para la distrofia muscular, pero los medicamentos y el tratamiento pueden ayudar a controlar y disminuir los síntomas de la enfermedad (Mayo Clinic, s.f.). Existen muchos tipos de distrofia muscular:

- Distrofia Muscular de Duchenne: Es el tipo más común. Presenta síntomas como: caídas frecuentes, pantorrillas con músculos grandes, dificultad para levantarse luego de estar acostado o sentado, problemas para correr y saltar, marcha de pato, caminar en puntas de pie, dolor y rigidez muscular, etc.

- Distrofia muscular de Becker: Presenta síntomas similares a los de la distrofia muscular de Duchenne, pero tienden a ser más leves y a avanzar más lentamente.
- Miotónica: Esta enfermedad no permite relajar los músculos después de las contracciones.
- Facio escapulohumeral: Debilidad muscular en la cara, la cadera y los hombros.
- Congénita: Algunos síntomas se presentan lentamente y causando una discapacidad leve, mientras que otros avanzan rápidamente y causan un deterioro grave.
- De la cintura escapulohumeral o pélvica: Debilitamiento muscular de la cadera y el hombro. Estas personas tienen dificultad para levantar la parte delantera del pie y por lo cual son propensas a tropezar constantemente.

### **1.2.6 Amputación**

Hace referencia a la pérdida de extremidades o de partes del cuerpo debido a traumatismos graves o malformaciones, que provocan una discapacidad física al limitar el funcionamiento habitual de la persona. Existen dos niveles de amputación habituales: en el miembro superior e inferior. En el miembro inferior se encuentran las siguientes amputaciones: dedos del pie, parcial del pie, desarticulación del tobillo o de Syme, Transtibial, desarticulación de rodilla, transfemoral, desarticulación de cadera y hemipelvectomía.

## **1.3 Tipos de sillas de ruedas**

Las sillas de ruedas están diseñadas como una ayuda técnica para las personas con problemas de locomoción o discapacidad motora, ya que les permite poder desplazarse y realizar sus actividades cotidianas. Existen diversos tipos de sillas de ruedas comerciales según su aplicación (ObboCare, s.f.).

### **1.3.1 Sillas de ruedas manuales**

Son las sillas de ruedas más comunes en el mercado, sencillas de usar en interiores y exteriores. Su material de fabricación suele ser el acero, aluminio o fibra de carbono; y pueden ser plegables para mejorar la transportabilidad y ahorrar espacio, o fijas.

Además, según su forma de propulsión existen las sillas de ruedas autopropulsadas, que cuentan con aros laterales para que el usuario pueda emplear sus brazos y propulsarse con las manos. También existen las que no son autopropulsadas, las cuales solo dependen de la propulsión de otra persona. En la Figura 1.7 se muestran las sillas de ruedas manuales autopropulsadas y asistidas.



Fig. 1.7. a) Silla de ruedas autopropulsada.<sup>1</sup> b) Silla de ruedas asistida.<sup>2</sup>

### 1.3.2 Sillas de ruedas eléctricas

Estas sillas son impulsadas por motores accionados por baterías recargables y se controla a través de una especie de joystick y un panel de control para configurar ciertos parámetros que le brinden comodidad y seguridad al usuario como, por ejemplo: configuración de la velocidad, posición del asiento, posición del respaldo, posición de los posapiés, etc. Además, cuentan con un freno manual para aumentarla seguridad en el trayecto. Estas también pueden ser plegables o fijas. En la Figura 1.8 se muestra una silla de ruedas eléctrica básica.

---

<sup>1</sup> Sillas de ruedas manuales: <https://www.silladeruedaonline.com/sillas-de-ruedas-manuales/>. Fecha de consulta: agosto 2021.

<sup>2</sup> Silla de ruedas asistida: <https://www.amazon.es/SED-ruedas-asistida-plegable-reclinable/dp/B07Y5VG3L5>. Fecha de consulta: agosto 2021.



Fig. 1.8. Silla de ruedas eléctrica.<sup>3</sup>

### 1.3.3 Sillas de ruedas de bipedestación

Esta silla de ruedas le permite al usuario cambiar de postura al ponerse de pie, produciendo muchos beneficios de salud (mejor flujo sanguíneo, mejor función respiratoria, reducción de contracturas, etc.) y de su propia independencia que le permite sentirse más integrado a la sociedad. Un mecanismo permite levantar y girar el asiento de tal manera que el usuario se encuentre apoyado y soportado mientras está de pie. Estas sillas pueden ser de propulsión manual o eléctrica. En la Figura 1.9 se muestra una silla de ruedas con módulo de bipedestación.



Fig. 1.9. Silla de ruedas de bipedestación.<sup>4</sup>

---

<sup>3</sup> Silla de ruedas eléctrica: <http://www.sillasderuedas.pe/productos-sillas-de-ruedas-innova/innova-502/>. Fecha de consulta: agosto 2021.

<sup>4</sup> Silla de ruedas eléctrica de bipedestación: <https://www.ortopediasilvio.com/es/sillas-de-ruedas-electricas/4650-jive-up-silla-de-ruedas-electrica-de-bipedestacion.html>. Fecha de consulta: agosto 2021.

### 1.3.4 Sillas de ruedas para deportes

Este tipo de silla de ruedas toma en cuenta factores como la velocidad, estabilidad extra, maniobrabilidad, aplicación en interiores o exteriores y las necesidades del usuario según el deporte al cual se aplique. Algunas de sus consideraciones son: sistema antivuelco, armazón rígido para soporte a colisiones, velocidad de giro, ajustes personalizados de accesorios, inclinación de las ruedas hacia dentro, entre otros. En la Figura 1.10 se muestra una silla de ruedas especializada para deportes.



Figura 1.10. Silla de ruedas para deporte<sup>5</sup>.

### 1.3.5 Sillas de ruedas bariátricas

Este tipo de sillas están pensadas para personas con obesidad ya que son configurables de acuerdo con las necesidades del usuario. Tienen una estructura reforzada y cuenta con un autopropulsor para un mejor traslado del paciente. El costo de este tipo de sillas varía según las dimensiones y peso que pueda soportar. En la Figura 1.11 se muestra una silla de ruedas bariátrica para personas con sobrepeso.



Figura 1.11. Silla de ruedas bariátrica<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> Silla de ruedas All Court: <https://espanol.lohmedical.com/p/silla-de-ruedas-all-court/>. Fecha de consulta: agosto 2021.

<sup>6</sup> Silla de ruedas obesos bariátrica: <https://topmedic.cl/producto/silla-de-ruedas-obesos-bariatrica-para-225-kilos/>. Fecha de consulta: agosto 2021.

### 1.3.6 Sillas de ruedas que suben escaleras

Este tipo de silla de ruedas eléctrica, a diferencia del resto, permite al usuario el ascenso y descenso por escaleras, gracias a un mecanismo integrado que sujeta de forma confiable la silla de ruedas y al usuario que la usa. Este tipo de silla soporta un gran peso de carga y grandes elevaciones de la silla para un mejor ascenso en las escaleras rectas o tramos curvos. Su valor comercial depende del sistema de sujeción, sistema de deslizamiento (oruga, ruedas salva escaleras), entre otros (Gente Válida, s.f.). En la Figura 1.12 se muestra una silla de ruedas para subir escaleras.



Figura 1.12. Silla de ruedas para subir escaleras<sup>7</sup>.

## 1.4 Biomecánica en las sillas de ruedas

La biomecánica de la silla de ruedas contempla la comodidad, movilidad y funcionalidad del usuario según las circunstancias personales, de tal manera que la propulsión se genere de forma eficaz y con el mínimo gasto de energía.

### 1.4.1 Partes de la silla de ruedas convencional

Las sillas de ruedas convencionales están compuestas por varios elementos que permiten la funcionalidad adecuada de la silla y la comodidad del usuario. Este medio brinda movilidad, dependiendo de su tipo (manual, eléctrica, bípoda, etc.)

---

<sup>7</sup> La revolucionaria silla de ruedas capaz de subir escaleras y salvar obstáculos: <https://www.bbc.com/mundo/vert-fut-43175243>. Fecha de consulta: agosto 2021.



comprenderá mayor cantidad de elementos según la aplicación que desempeñe, sin embargo, las partes básicas siguen siendo las mismas. En la Figura 1.13 se presentan los elementos que componen una silla de ruedas convencional.

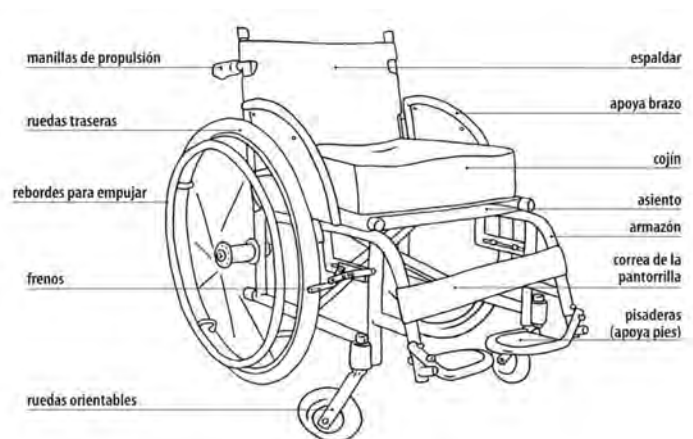


Figura 1.13. Partes de una silla de ruedas convencional. (OMS, 2008)

- Ruedas: Para la autopropulsión en exteriores son necesarias ruedas trasera entre 300 mm y 600 mm con aros de empuje. Normalmente son 2 ruedas grandes traseras y 1 o 2 ruedas delanteras. Pueden ser:
  - Neumáticas: Amortiguan los desniveles del terreno, pero requieren mantenimiento.
  - Ruedas orientables o macizas: Son más duras para la conducción, pero no requieren mantenimiento.
- Espaldar: Debe ser blando y cómodo para el usuario. Pueden ser fijos o reclinables, para variar la posición del usuario de ser necesario.
- Asiento: Debe ser blando y cómodo para el usuario. Existen variedad de diseños para los usuarios como el asiento confort.
- Apoyabrazos: Debe ser blando y cómodo para el usuario. Se recomienda que sean abatibles y graduables para facilitar la accesibilidad del usuario.

- **Cojines:** Debe ser blando y cómodo para el usuario. Pueden ser de agua, gel, silicona y aire por flotación. El material es un factor relevante para la amortiguación y distribución de cargas en la silla de ruedas.
- **Sistemas de sujeción:** Brindan seguridad al usuario. Normalmente se utilizan chalecos, cinturones o reclinación del respaldo, correas para las pantorrillas y se utilizan cuando el paciente se inclina hacia delante o el paciente se desliza sobre el asiento.
- **Reposapiés:** Permiten el descanso y apoyo de los pies. Estos pueden ser regulables, extraíbles y abatibles según las necesidades del usuario.
- **Reposacabezas:** Permite el apoyo de la cabeza del paciente sobre un cojín evitando una mala posición en la zona superior. Pueden ser de modelo liso u orejero.
- **Mesa de madera:** Es un accesorio que se puede incorporar para el beneficio del usuario o para las personas que lo atienden.

#### **1.4.2 Factores que afectan la movilidad y propulsión**

La propulsión que se requiere para que el usuario se movilice debe ser con un gasto mínimo de energía. Para ello, la composición de la silla debe estar acorde a los requerimientos del usuario y no al revés, para optimizar su propulsión y aplicación (Sunrise Medical, s.f.). Los factores que afectan la movilidad y la propulsión son los siguientes:

- **Distribución del peso:** Para que la silla de ruedas sea más estable la distribución del peso sobre las ruedas debe ser equitativa y así evitar mayor rozamiento.
- **El terreno:** Cuando el terreno es blando, se exige mayor esfuerzo para propulsar la silla debido a que existe mayor rozamiento. El rozamiento es inversamente proporcional a la dureza de la superficie.

- Tamaño y composición de las ruedas: Las ruedas neumáticas generan mejor amortiguación, pero mayor resistencia a rodar; en cambio, las macizas son más duras, pero tienen menor resistencia a rodar. Las ruedas traseras tienen un mejor agarre y rozamiento a la superficie por mayor contacto.
- Altura y posición de las ruedas: La posición de las ruedas traseras deben estar situadas de tal manera que el usuario pueda tocar el eje de la rueda con su brazo extendido. En la Figura 1.14 se muestra la posición correcta de las ruedas a la altura del hombro para generar la propulsión.

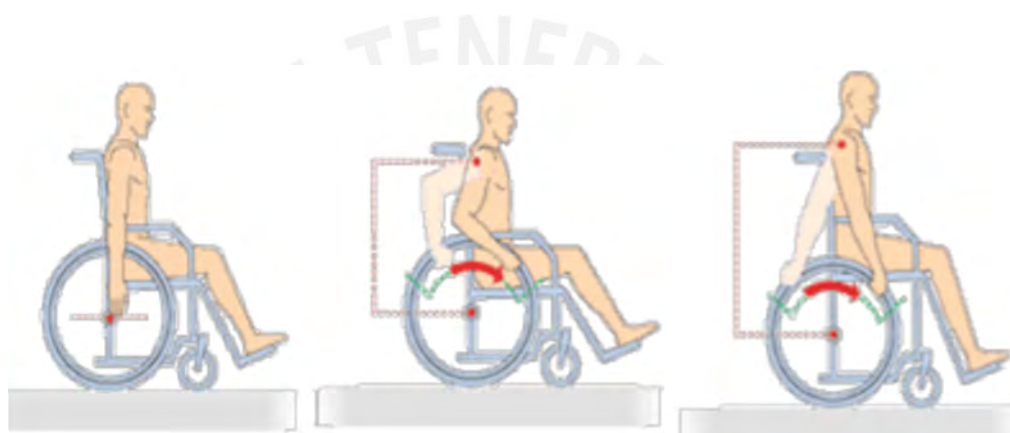


Figura 1.14. Posición correcta de las ruedas para autopropulsión.

- Tamaño de las ruedas delanteras: Se recomienda usar ruedas grandes, y está determinado según la superficie sobre la cual será utilizado y la distribución del peso en la silla.
- Centro de gravedad de la silla: Para mantener la estabilidad se desplaza el centro de gravedad hacia delante y hacia atrás. Además, se utilizan dispositivos de seguridad como ruedas antivuelco.
- Distancia entre ejes de ruedas delanteras y traseras: A mayor distancia entre ejes, mejor rumbo de conducción, pero a menor distancia entre ejes, mayor facilidad de conducción.
- Ángulo de las ruedas traseras:
  - Ángulo positivo: Mayor estabilidad, mejor rumbo, mejor postura en hombros.

- Ángulo neutro: Menos eficacia para rodar.
- Ángulo negativo: Silla inestable y mala postura de hombros.

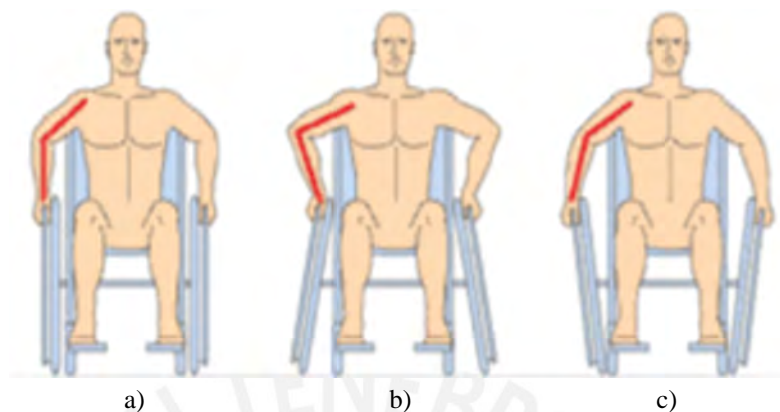


Figura 1.15. a) Ángulo neutro. b) Ángulo positivo. c) Ángulo negativo.

- Ángulo de las ruedas delanteras:
  - Ángulo superior a  $90^\circ$ : La silla gira más rápido, pero al detenerse la parte delantera del chasis se elevará inclinándose hacia atrás.
  - Ángulo inferior a  $90^\circ$ : Se dificulta el giro y al detenerse la silla tiende a seguir girando y elevando su parte delantera.
- Grados de movilidad: Gamas de movimiento que tiene el usuario en la columna, hombro, muñeca, codo y dedos. En la Figura 1.16 se muestra el caso de buena movilidad según las articulaciones mencionadas anteriormente, es decir, iniciando por detrás del tronco y terminando el movimiento a la altura de los muslos.



Figura 1.16. Grados de movilidad del usuario para propulsión de la silla.

- Postura: El usuario debe estar correctamente sentado (posición simétrica) para aprovechar toda la energía de la propulsión. De otra manera, los aros quedan demasiado altos y el movimiento de propulsión resultará incómodo de realizar.

### 1.4.3 Medidas necesarias para la correcta prescripción de la silla de ruedas

La correcta prescripción de la silla de ruedas al usuario depende de los requisitos y comodidad que este requiere de ella, es decir, la silla debe ajustarse al usuario y no el usuario a la silla (Sunrise Medical, s.f.). Para ello se deben considerar las siguientes medidas:

- Anchura pélvica: Corresponde a la anchura que tendrá el asiento de la silla. La medida se obtiene al medir la distancia entre las caras internas de la silla considerando el ancho de las caderas del paciente. Esta medida determinará el acceso a las ruedas sin dificultad en la autopropulsión, la posición pélvica y estabilidad y el crecimiento para evitar alguna deformación en el transcurso de su uso. En la Figura 1.17 se muestra el método de determinación del ancho de la silla de ruedas.



Figura 1.17. Determinación de ancho de silla de ruedas.

- Longitud del muslo: Corresponde con la profundidad del asiento. La medida se obtiene al colocar al paciente sentado sobre una mesa a 3 dedos de la flexura de su rodilla y medir desde el plano vertical del borde de la mesa hasta la espalda del paciente. Esta medida determinará la distribución de la presión a mayor superficie de apoyo, la posición pélvica y estabilidad y la longitud total de la silla y

maniobrabilidad. En la Figura 1.18 se muestra la distancia máxima entre la longitud del muslo hasta la altura de la espalda del usuario para determinar la profundidad de la silla de ruedas.



Figura 1.18. Medición de la longitud del muslo para profundidad de silla.

- Longitud de la pantorrilla: Corresponde con la longitud del reposapiés. La medida se obtiene desde la flexura de la rodilla hasta el talón con el tobillo en flexión. Se recomienda medir ambas piernas para eliminar cualquier incongruencia. Esta medida determinará la distribución de la presión del cuerpo en los pies y la posición pélvica y estabilidad. En la Figura 1.19 se muestra la medición de la longitud de la pantorrilla del usuario para determinar la altura de la silla de ruedas.



Figura 1.19. Medición de la longitud de la pantorrilla para la altura de la silla.

- Altura inferior de la escápula: Corresponde con la altura del respaldo en un paciente con control normal de tronco. La medida se obtiene desde el plano del asiento hasta el ángulo inferior de la escápula (omóplato). Se consideran los

siguientes factores: Posible punto de presión, soportes torácicos (laterales) y/o lumbares (posteriores), y estabilidad y/o movilidad del tronco. En la Figura 1.20 se muestra la distancia máxima entre la altura inferior de la escápula y el asiento del usuario para determinar la dimensión del respaldo de la silla de ruedas.



Figura 1.20. Medición de la altura inferior de la escápula para respaldo de la silla.

- **Altura del hombro:** Corresponde con la altura del respaldo en un paciente con poco control de tronco. La medida se obtiene de la distancia del plano del asiento a la altura del hombro. De esta medida dependen: estabilidad escapular y movilidad, soporte torácico y lumbar, estabilidad y control de cabeza. En la Figura 1.21 se muestra la distancia entre la longitud del hombro del usuario y el plano del asiento para determinar el respaldo de la silla de ruedas.



Figura 1.21. Medición de la altura del hombro para respaldo de la silla.

#### 1.4.4 Modelamiento dinámico de la silla de ruedas

El estudio de la cinemática en el funcionamiento de las sillas de ruedas se refleja en el posicionamiento que tiene la silla en el espacio tridimensional, el cual requiere de 3

coordenadas cartesianas y 3 coordenadas para la orientación (Cerino, 2017). Para ello, en la Figura 1.22 se presenta el sistema coordenado del vehículo:

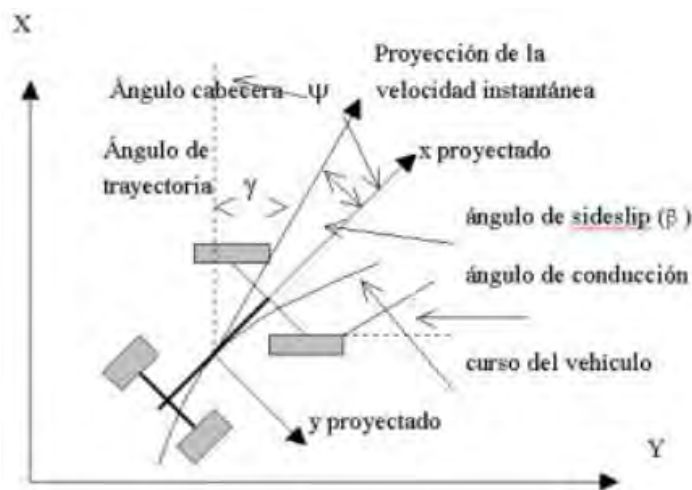


Figura 1.22. Sistema coordenado de la silla de ruedas.<sup>8</sup>

Donde:

x: recorrido hacia delante.

y: recorrido a la derecha.

z: recorrido vertical (hacia abajo).

$\Psi$  : ángulo de cabeceo (entre x y x en el plano tierra).

$\gamma$  : ángulo de trayectoria (entre el vector de velocidad y el eje x).

$\beta$  : ángulo de deslizamiento lateral (entre eje x y vector velocidad del vehículo).

#### 1.4.4.1 Segunda ley de Newton

En la distribución de cargas que puede soportar la silla de ruedas se debe conocer el peso del usuario y los componentes de la silla. Para ello se debe hacer un análisis dinámico y estático del usuario sobre la silla de ruedas. En el movimiento de la silla de ruedas se debe calcular la fuerza necesaria para realizar el movimiento, la cual será la fuerza máxima que debe entregar el motor para propulsar la silla. En primer lugar, con la Ecuación 1.1, se debe determinar el peso total que los motores deben movilizar (Mora, 2014).

<sup>8</sup> Dinámica del vehículo: <https://drive.google.com/file/d/0B4uwxwKUzRinN2pOWXhoVWk5MU0/edit?resourcekey=0-LcDRKcNUTzzMkSh0c4NFeQ>. Fecha de consulta: setiembre 2021.



$$W = PEM + PMU + PF + PSC \quad (1.1)$$

Donde:

PEM = Peso de la estructura mecánica de la silla [N].

PMU = Peso máximo del usuario [N].

PF = Peso de la fuente (batería) [N].

PSC = Peso sistema de control [N].

W = Peso total a movilizar [N].

Posteriormente, se calcula la fuerza máxima que deben entregar los motores. En este caso se aplica la segunda ley de Newton al sistema. En el caso de traslación se calculan las fuerzas externas sobre un cuerpo en una dirección dada, que es igual al producto de su masa y la aceleración en esa dirección (Ecuación 1.2).

$$\sum F_x = m a_x \quad (1.2)$$

Donde:

$F_x$ : Fuerzas en la dirección x [N].

m: Masa del cuerpo [kg].

$a_x$ : Aceleración en la dirección x [ $m/s^2$ ].

En el caso de rotación se calculan los torques activos sobre un cuerpo (silla de ruedas) con respecto a un eje dado, que es igual al producto de su momento rotacional de inercia y la aceleración rotacional en ese eje (Ecuación 1.3).

$$\sum T_x = I_{xx} \alpha_x \quad (1.3)$$

Donde:

$T_x$ : Torques con respecto al eje x [Nm].

$I_{xx}$ : Momento de inercia con respecto al eje x [ $m^4$ ].

$\alpha_x$ : Aceleración con respecto al x [m/s<sup>2</sup>].

En la Figura 1.23 se presenta, de manera general para vehículos de cuatro ruedas como la silla de ruedas, el DCL de un vehículo de cuatro ruedas en una superficie inclinada.

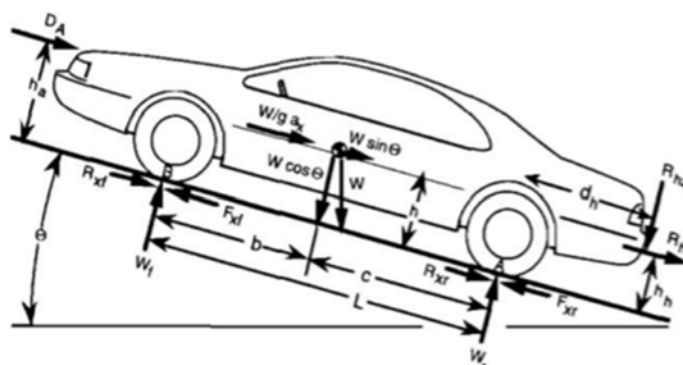


Figura 1.23. Diagrama de cuerpo libre general de vehículo (Morales, 2017).

Donde:

$W$ : Peso del vehículo [N].

$W_r$  y  $W_f$ : Fuerza normal sobre las ruedas [N].

$F_{xr}$  y  $F_{xf}$ : Fuerzas de adherencia [N].

$R_{xr}$  y  $R_{xf}$ : Resistencia rodante con respecto al plano de contacto [N].

$D_A$ : Fuerza aerodinámica sobre el cuerpo del vehículo [N].

$\frac{W}{g}a_x$ : Fuerza activa en el centro de gravitación opuesta a la aceleración del vehículo [N].

$\theta$ : Ángulo de inclinación de la pendiente [grados].

Debido a que el vehículo (silla de ruedas) se enfrenta constantemente a pendientes en elevación y en descenso, se debe considerar un análisis dinámico sobre superficies inclinadas. Las pendientes longitudinales se determinan según los rangos máximos establecidos por tramos de rampa entre descansos, como se ve en la Figura 1.24.

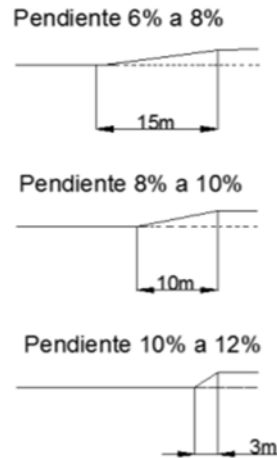


Fig. 1.24. Porcentaje de pendientes (Salcedo, 2011).

De la Figura 2.23 se obtiene lo siguiente:

- Para una pendiente de hasta 15 metros, se considera un porcentaje de inclinación de 6% a 8%, equivalente a un ángulo de  $3.43^\circ$ .
- Para una pendiente de hasta 10 metros, se considera un porcentaje de inclinación de 8% a 10%, equivalente a un ángulo de  $5.71^\circ$ .
- Para una pendiente de hasta 3 metros, se considera un porcentaje de inclinación de 10% a 12%, equivalente a un ángulo de  $6.84^\circ$ .

Del análisis anterior se debe obtener la fuerza máxima que permite el movimiento respectivo de la silla, y junto con la velocidad asignada se puede determinar la potencia del motor (Ecuación 1.4).

$$\text{Potencia máx.} = \text{Velocidad máx.} \times \text{Fuerza máx.} \quad (1.4)$$

#### 1.4.4.2 Leyes de rozamiento de Coulomb

Las leyes del rozamiento de Coulomb son afirmaciones aplicadas a la condición de deslizamiento inminente de un cuerpo (Concari, 1999), estas son:

- La fuerza de rozamiento total es independiente de la magnitud del área en contacto

- La fuerza es independiente de la velocidad para velocidades relativas pequeñas entre los objetos deslizantes.
- La fuerza de rozamiento total es proporcional a la fuerza normal que reacciona en la superficie de contacto.

El comportamiento del rozamiento en estado de reposo y movimiento se muestra en la Figura 1.25.

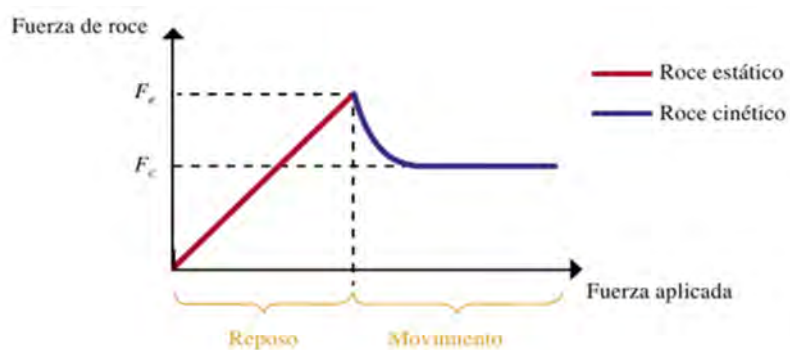


Fig. 1.25. Comportamiento estático y cinético del rozamiento<sup>9</sup>.

En la Figura 1.26 se puede apreciar el diagrama general de una rueda motriz para mover la silla de ruedas por una rampa inclinada (Fondevila, s.f.).

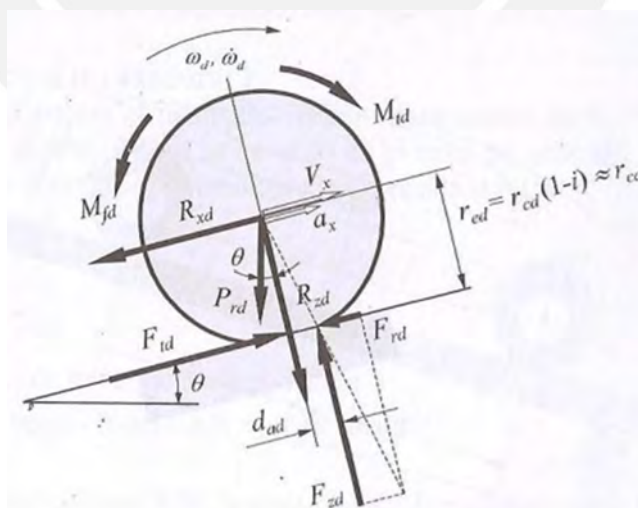


Fig. 1.26. Diagrama de la rueda motriz de un vehículo (Fondevila, s.f.).

<sup>9</sup> Dinámica, Fuerza de roce: <https://www.fisic.ch/contenidos/din%C3%A1mica/tipos-de-fuerzas/>. Fecha de consulta: setiembre 2021.

Las ecuaciones 1.5 a 1.7 se obtienen aplicando las condiciones de equilibrio dinámico al DCL que se muestra en la Figura 2.25 son las siguientes:

$$\sum F_x : m_{td} a_x = F_d - R_{xd} - F_{rd} - R_{rd} \quad (1.5)$$

$$\sum F_z : 0 = F_{zd} - R_{zd} - P_{rd} \cos\theta \quad (1.6)$$

$$\sum I_d \omega_d = M_{td} - M_{fd} - r_{cd} F_{td} \quad (1.7)$$

Donde:

$R_{xd}$   $R_{zd}$ : Acciones del vehículo sobre el eje trasero [N].

$P_{rd}$ : Peso de las ruedas [N].

$r_{cd}$ : Radio bajo carga de la rueda [N].

$M_{td}$   $M_{fd}$ : Momento de tracción y frenado [Nm].

$F_{zd}$   $F_{rd}$ : Reacción del suelo en el eje trasero [N].

$m_{td}$ : Masa del eje trasero [kg].

$a_x$ : Aceleración del eje trasero, equivalente a la del vehículo [m/s<sup>2</sup>].

$\omega_d$ : Aceleración angular de las ruedas [rad/s].

$F_{td}$ : Fuerza de tracción trasera [N].

$I_t$ : Momento de inercia de las masas en rotación del eje trasero [m<sup>4</sup>].

#### 1.4.4.3 Interpretación de la acción de frenado

La ecuación general que determina la acción de frenar se obtiene a través de la segunda ley de Newton (Ecuación 1.8).

$$m a_x = -W/g D_x = -F_{xf} - F_{xr} - D_A - W \sin\theta \quad (1.8)$$

Donde:

W: Peso del vehículo [N].

g: Aceleración gravitacional [m/s<sup>2</sup>].

$D_x = -a_x$ : Desaceleración lineal [m/s<sup>2</sup>].

$F_{xf}$ : Fuerza de frenado eje delantero [N].

$F_{xr}$ : Fuerza de frenado eje trasero [N].

$D_A$ : Fuerzas aerodinámicas [N].

$\theta$ : grado de cuesta arriba [grados].

El proceso de frenado se desarrolla cuando la fuerza de frenado se pone en contacto entre la rueda y el suelo como un momento de reacción que se opone al movimiento de giro de la rueda, limitada principalmente por adherencia. “Si se supera el límite de adherencia del contacto rueda-calzada, se produce el bloqueo de la rueda” (Fondevila, s.f.). De la Figura 1.27 se obtiene la relación entre el par de frenado debido a la fuerza de frenado y al sistema de freno, la cual se muestra en la Ecuación 1.9.

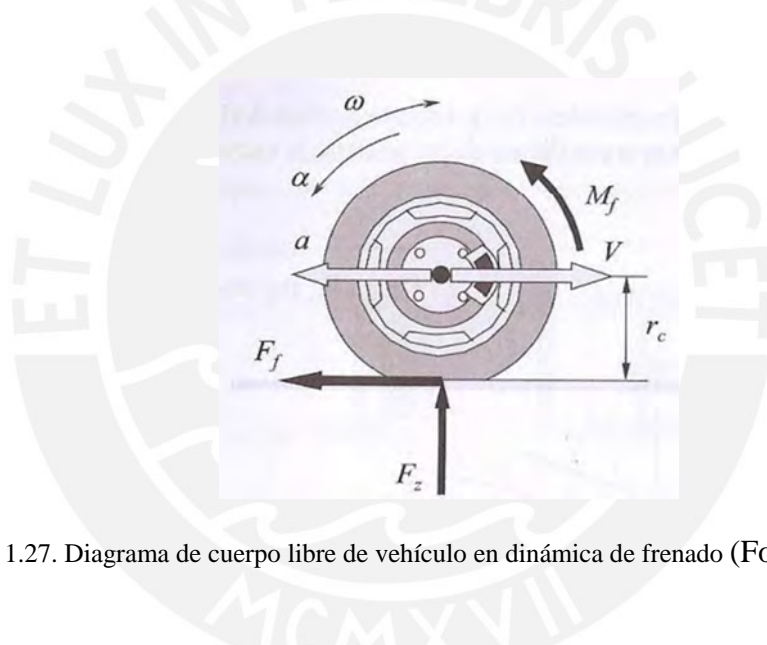


Fig. 1.27. Diagrama de cuerpo libre de vehículo en dinámica de frenado (Fondevila, s.f.).

$$M_f = -F_f r_c = I \alpha \quad (1.9)$$

Donde:

$I$ : Momento de inercia de todas las masas de la rueda [ $m^4$ ].

$r_c$ : Es el radio bajo carga del neumático, que puede considerarse igual al radio efectivo [m].

$\alpha$ : aceleración angular de la rueda [ $m/s^2$ ].

$F_f$ : Fuerza de frenado que se genera en el suelo [N].

Entonces, el momento de reacción del suelo sobre la rueda es (Ecuación 1.10):

$$M_R = F_f r_c \quad (1.10)$$

Dada la Ecuación 1.9, la fuerza de fricción se encuentra limitada por la adherencia entre la rueda y el suelo, por lo que tomará valores diferentes, cuando exista bloqueo en las ruedas y cuando la rueda esté sin bloqueo.



## **CAPÍTULO 2**

### **ESTADO DEL ARTE**

En el presente capítulo se exponen las tecnologías existentes sobre sillas de ruedas eléctricas a través de documentos técnicos, documentos científicos y patentes. Seguidamente, se analizan los productos existentes en el mercado según sus características más relevantes. Finalmente, se describen las normas y regulaciones existentes para el diseño de sillas de ruedas y su aplicación.

#### **2.1 Estado de la tecnología en sillas de ruedas eléctricas**

En esta sección se presentará información relevante de patentes, tesis y publicaciones científicas en desarrollo de sillas de ruedas eléctricas para identificar los principios de funcionamiento, características y recomendaciones para el diseño de una silla de ruedas eléctrica, así como algunas características generales de las sillas de ruedas manuales que son comerciales.

##### **2.1.1 Patentes en sillas de ruedas**

Entre las patentes de sillas de ruedas eléctricas, o de accesorios para sillas de ruedas, se mencionan las siguientes:

- Patente WO2017105169A1 (“Andador automatizado asistido por un mecanismo de voz y electromiografía”): Esta patente corresponde a un andador automatizado que cuenta con una serie de sensores asistidos para la dirección, aceleración y



obstaculización del andador. Cuenta con un sensor de sonido y reconocimiento de patrones para que el usuario pueda configurar ciertos parámetros como la velocidad, dirección, etc, a través de un dispositivo móvil (Fontes, 2017).

- Patente CN107510557A (“*Portable multifunctional electric wheelchair with USB jacks*”): En este caso, la patente corresponde a una silla de ruedas eléctrica portátil multifuncional con tomas USB que le permite al usuario obtener funciones cómodas como cargar su celular u otra herramienta electrónica. La toma USB tiene dos tomas de corriente diferentes. Además, cuenta con una batería integrada debajo del asiento de la silla de ruedas (Shukuang, 1984).
- Patente JP2002045402A (“*Wheelchair*”): Esta patente describe a una silla de ruedas que cuenta con un dispositivo inalámbrico que permite la comunicación con inodoros para usuarios en silla de ruedas disponibles en baños de trenes y en la estación. Esta invención permite que usuarios en silla de ruedas tengan una mejor atención para hacer uso de los servicios higiénicos en la estación de trenes al reservar estas sillas de ruedas. Cuando el usuario desea usar el baño del tren, presiona un botón del dispositivo inalámbrico, este le informará de la disponibilidad de inodoros para personas en silla de ruedas en el tren y puede reservarlo. Además, proporciona una función de almacenamiento de información personal del usuario, reconocimiento de posición, tiempo de espera para hacer uso de los inodoros y un sensor de pulsos para el usuario (Yoshiaki, 2002). En la Figura 2.1 se muestra el diseño de esta silla de ruedas con su dispositivo inalámbrico.

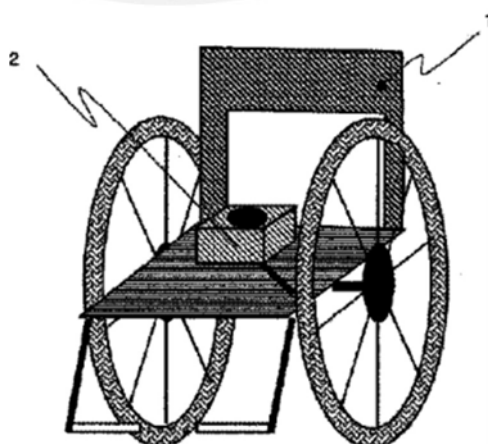


Fig. 2.1. Patente JP2002045402A.

- Patente ES2275060-T3 (“Apoyo para miembro inferior con ángulo ajustable con compensación longitudinal automática para sillas de ruedas”): El diseño de la patente de esta silla de ruedas eléctrica dispone de un apoyo para el miembro inferior de manera giratoria, de forma que pueda ajustarse el ángulo entre una posición de sentado y una posición horizontal por medio de un mecanismo de palanca, para que pueda soportar la pierna del usuario y brindarle comodidad (Veit, 2007).
- Patente ES8403717-A1 (“Perfeccionamientos en sillas de ruedas para inválidos”): Esta patente corresponde a un dispositivo para franquear escaleras en silla de ruedas por medio de un sistema de suspensión ajustable al chasis de la silla. Para ello, comprende dos armazones en los cuales se encuentran unidades de pistón y cilindro que se desplazan en sentido vertical de manera que se puede mantener una posición horizontal y hacer ajustes de posición a los cojinetes a través de una unidad de control central (Heinz, 2017).

### 2.1.2 Tesis sobre sillas de ruedas

Entre las tesis sobre sillas de ruedas eléctricas se tiene la propuesta de una silla de rueda eléctrica controlada por un joystick con capacidad para subir y bajar veredas (López, 2014). En esta propuesta se consideran cuatro ruedas grandes traseras y dos ruedas pequeñas delanteras para amortiguar la inclinación de la silla, como se muestra en la Figura 2.2.



Fig. 2.2 Prototipo de silla de ruedas eléctrica para subir y bajar veredas (López, 2014)

Otro caso es el trabajo de Bravo (2017), quien propuso una silla de ruedas multifuncional para niños entre 6 y 12 años. En esta tesis la silla de ruedas contempla un joystick, un teclado matricial y una pantalla de cristal líquido (LCD) para la conducción. Mediante el teclado matricial se ingresa un código que determina la modalidad y funcionalidad de la silla de ruedas, estableciendo parámetros como velocidad, valores asignados a los motores, etc. Asimismo, en esta propuesta se contempla la posibilidad de posicionamiento bípedo del usuario a través de un accionamiento neumático, como se muestra en la Figura 2.3 (Bravo, 2017).



Fig. 2.3. Silla de ruedas eléctrica multifuncional para niños entre 6 y 12 años (Bravo, 2017)

Además, otra propuesta de tesis para mejorar la aplicación de las sillas de ruedas eléctricas es de Lévano (2020), quien plantea el diseño de una silla de ruedas mecatrónica multifuncional para mejorar la accesibilidad de un adulto con paraplejía. Se diseñó un sistema de dirección diferencial para dar una mejor tracción, maniobrabilidad e independencia al movimiento, y para que la silla de ruedas pueda subir por veredas y escaleras gracias a su sistema de suspensión. Además, la silla tiene la opción de bipedestación para minimizar lesiones en el paciente en un periodo largo de tiempo. En la Figura 2.4 se presenta una vista isométrica de la silla de ruedas multifuncional.



Fig. 2.4. Silla de ruedas multifuncional para un adulto con paraplejia (Lévano, 2020).

### 2.1.3 Sillas de ruedas eléctricas en desarrollo

Entre los artículos y proyectos de investigación en desarrollo sobre sillas de ruedas eléctricas se tiene la propuesta de control de una silla de ruedas por medio de un dispositivo móvil con sistema operativo Android (Morales, 2012). En esta propuesta se adaptó un dispositivo electrónico para motorizar y controlar la silla de ruedas, y se desarrollaron sensores de movimiento del dispositivo con tecnología bluetooth. En este caso se utiliza un microcontrolador para programar las órdenes de la silla, activar el circuito de potencia y controlar los motores (ver Figura 2.5).



Fig. 2.5. Silla de ruedas eléctrica controlada por dispositivo móvil. (Morales, 2012)






Una propuesta de proyecto de investigación para mejorar la aplicación de las sillas de ruedas eléctricas es de Nazate (2016), quien propone una silla de ruedas automatizada

para mejorar la orientación de personas con limitaciones físicas mediante comandos de audio y botones de control del dispositivo.

#### 2.1.4 Sillas de ruedas manuales

Las sillas de ruedas manuales se distinguen en el mercado por las características que facilitan y atienden las necesidades de los usuarios de sillas de ruedas. Dentro de las características más importantes existen: dimensiones, capacidad de carga, basculación, inclinación, apariencia, sistema de frenado, confiabilidad, entre otras. En la Tabla 2.1 se presentan algunas sillas de ruedas manuales para niños existentes en el mercado.

Tabla 2.1. Comparación de sillas de ruedas manuales en el mercado actual.

Características	Liliput <sup>10</sup>	Rea Azalea Minor <sup>10</sup>	Youngster 3 <sup>10</sup>	Baby Evolution FT <sup>10</sup>	33 de Comfort <sup>11</sup>
					
Estructura	Acero	Acero	Aluminio	Aluminio de alta resistencia	Aluminio ligero
Dimensiones	Long = 49cm Ancho = 58cm Alto = 90cm	Long = 97cm Ancho = 76cm Alto = 125cm	Long = 60cm Ancho = 60cm Alto = 90cm	Long = 34cm Ancho = 62cm Alto = 95cm	Long = 73cm Ancho = 51cm Alto = 89cm
Peso	12.8 kg	28 kg	8.5 kg	18.5 kg	13 kg
Capacidad de Carga	125 kg	75 kg	85 kg	75 kg	65 kg
Basculación	*	25°	*	0° - 47°	*
Otras	Plegable, Sistema de suspensión estructural para confort. Ruedas neumáticas macizas. Reposabrazos y reposapiés desmontables, ajustables y abatibles.	Plegable, Sistema de compensación ergonómica DSS (Dual Stability System). Reclinación del respaldo: 30°.	Plegable, ruedas antivuelcos, adaptables al crecimiento del niño en ancho y profundidad. Reposacabezas, reposapiés ajustable y abatible.	Ruedas traseras con extracción rápida, fajas ajustables, asiento regulable en ancho y profundidad.	Apoya brazos batientes, apoya pies regulables en altura, cinturón de seguridad. Pintura electrostática.
Procedencia	España	España	España	España	Perú
Precio <sup>12</sup>	S/.1,320.00	S/.7,800.00	S/.9,050.00	S/.7,300.00	S/.1,928.00

<sup>10</sup> Sillas de ruedas manuales infantiles: <https://www.ortopediamimas.com/ortopedia-infantil/sillas-de-ruedas-manuales-infantiles.html>. Fecha de consulta: agosto 2021.

<sup>11</sup> Silla de ruedas niños 33 de Comfort: <https://www.ventasortopediawong.pe/producto/silla-de-ruedas-ninos-33-de-comfort>. Fecha de consulta: agosto 2021.

<sup>12</sup> Valor según lugar de procedencia según tipo de cambio oficial al 14-09-2021

Según la Tabla 2.1, se observa que las sillas de ruedas de acero tienen menor costo debido a que son menos ligeras que las sillas con marco de aluminio. También se puede observar también que el peso de una silla de ruedas convencional se encuentra entre los 8 y 15 kg y que puede soportar una capacidad de carga entre los 65 y 125 kg. Además, las dimensiones estándar de estas sillas se encuentran como máximo en 100 mm de longitud, 76 mm de ancho y 125 mm de alto, y los precios de estas sillas de ruedas manuales dependen de su lugar de procedencia y de las características adicionales que ofrece cada producto. Las principales características que presentan estas sillas es la que son plegables, y poseen ajuste de los apoyabrazos, ajuste de reposapiés y inclinación del asiento. La silla de ruedas Youngster 3 presenta un sistema de ruedas antivuelco y un asiento adaptable al crecimiento del niño, lo cual la hace una opción confiable para cubrir aspectos de funcionalidad y seguridad en el traslado del usuario; sin embargo, el precio comercial se encuentra alejado del rango promedio, alrededor de los S/. 1,500.00. El diseño, la funcionalidad y la ergonomía que ofrecen estas sillas son los factores primordiales para su selección.

De las patentes, tesis y los proyectos en desarrollo de las sillas de ruedas eléctricas se identifican las principales funciones y aplicaciones que tienen estas sillas, así como los medios y componentes utilizados para la elaboración de la silla de ruedas eléctricas. Además, la tabla comparativa de sillas de ruedas manuales a nivel comercial brinda un primer acercamiento a valores estandarizados de las dimensiones, capacidades de carga y precio del producto.

## **2.2 Estudio comparativo de sillas de ruedas eléctricas**






En esta sección se realiza un estudio comparativo de los productos comerciales de sillas de ruedas de propulsión eléctrica y sobre las características que ofrecen las sillas de ruedas eléctricas especiales.

### **2.2.1 Comparación de sillas de ruedas eléctricas**

Las sillas de ruedas eléctricas se distinguen en el mercado por las distintas funciones y aplicaciones que facilitan y atienden las necesidades de los usuarios, de tal manera que su intervención sea con el menor esfuerzo posible. Dentro de los parámetros y

características más importantes existen: dimensiones, capacidad de carga, velocidad máxima, potencia del motor, duración de la batería, sistema de frenado, confiabilidad, autonomía, entre otras. En la Tabla 2.2 se presentan algunas sillas de ruedas eléctricas para niños existentes en el mercado.

Tabla 2.2. Comparación de sillas de ruedas eléctricas en el mercado actual.

Características	Evolution <sup>13</sup>	Sparky <sup>13</sup>	Space <sup>13</sup>	Viking Mini <sup>13</sup>	Esprit Action 4NG <sup>13</sup>
					
Dimensiones	Long = 80cm Ancho = 54cm Alto = 90cm	Long = 95,9cm Ancho = 61cm Alto = 97cm	Long = 65cm Ancho = 44cm Alto = 84cm	Long = 60cm Ancho = 40cm Alto = 105cm	Long = 121cm Ancho = 68cm Alto = 100,2cm
Peso (con batería)	75 kg	*	112 kg	77.5 kg	45 kg
Capacidad de Carga	120 kg	56.7 kg	100 kg	150 kg	125 kg
Control	Mando manual (joystick)	Control VR2, intuitivo y preciso	Mando manual (joystick)	Mando manual (joystick)	Mando manual (joystick)
Velocidad máxima	7 km/h 3 km/h (atrás)	9.66 km/h	10.5 km/h (5 velocidades)	6 km/h	6 km/h
Batería	2x35 Ah	40 Ah	2x65 Ah	12V 50Ah	17 Ah
Potencia	160 W	350 W	*	200 W / 24V	150 W
Autonomía	35 a 40 km	19.93 km	45 km	25 km	30 km
Radio de giro	107 cm	*	120 cm	80 cm	186 cm
Otras Características	Plegable, Ruedas antivuelco, reposapiés ajustable, reposabrazos abatibles.	Asiento y respaldo reclinable: 0° a 16°. Suspensión, reposacabezas ergonómico. Ruedas neumáticas	Uso exterior, rango de edad: 8 a 15 años. Ruedas neumáticas, ruedas antivuelco, kit de luces frontal. Salva ropa incorporada.	2 motores de bajo consumo, freno electromagnético. Ruedas antivuelco. Reposabrazos extraíble, asiento ajustable en ancho y profundidad.	Plegable y desmontable. Basculación: 30°, inclinación máxima: 5°. 8 anchos de asiento. Motores de inducción, batería desmontable.
Procedencia	España	España	España	España	España
Precio	\$/ 8,510.00	\$/15,360.00	\$/18,460.00	\$/7,840.00	\$/15,100.00

Según la comparación realizada en la Tabla 2.2, se debe tomar en cuenta la potencia del motor y la batería, autonomía de la silla de ruedas, así como las características que le permitan al niño realizar sus actividades con mayor normalidad. Debido a las características que ofrecen, las sillas de ruedas eléctricas tienen un peso entre los 45

<sup>13</sup> Sillas de ruedas eléctricas infantiles: <https://www.ortopediamimas.com/ortopedia-infantil/sillas-de-ruedas-electricas-infantiles.html>. Fecha de consulta: agosto 2021.



kg y los 112 kg, y una capacidad de carga máxima de 150 kg. El mando de control utilizado mayormente es el de interfaz manual alámbrica joystick que le permite recorrer una distancia autónoma alrededor de los 30 km a una velocidad máxima de 10km/h. El precio comercial varía según las aplicaciones y características que ofrecen, por ejemplo, el Viking Mini sería una opción confiable por sus aplicaciones de disposición ergonómica (reposabrazos y asientos ajustables y abatibles) y de seguridad (ruedas antivuelco). Otra opción confiable es Espirit Action 4NG debido a que tiene un peso ligero y una buena capacidad de carga, además, permite una basculación de la silla para la comodidad del usuario y permite desmotar las baterías para su recarga.

### 2.2.2 Sillas de ruedas eléctricas especiales

Entre las sillas de ruedas con características especiales se tiene la K450 MX. Esta silla de ruedas eléctrica brinda un manejo más cómodo para los ambientes educativos, como sistemas de descenso al suelo, elevador de asiento y basculación como se ve en la Figura 2.6. Cuenta con un sistema de suspensión en todas a las ruedas para mejorar el equilibrio y la conducción. Además, cuenta con grandes neumáticos para mejorar la tracción, la resistencia y reducir el mantenimiento.

- Longitud total: 124 cm.
- Ancho total: 64 cm.
- Altura máxima: 65.5 cm.
- Peso total (incluye baterías): 112 kg.
- Capacidad de carga máxima: 60 kg.
- Baterías: 60 Ah.
- Velocidad máxima: 8.5 km/h.
- Autonomía: 25 – 30 km
- Electrónica: R-net.<sup>14</sup>
- Funciones eléctricas: asiento al piso, ajuste de inclinación (hasta 45°), elevación de asiento.



Fig. 2.6. Silla de ruedas eléctrica K450 MX.<sup>15</sup>

<sup>14</sup> Mando para silla de ruedas R-net series: <https://www.directindustry.es/prod/curtiss-wright/product-4591-1692613.html>. Fecha de consulta: setiembre 2021.

<sup>15</sup> K450 MX: Nuevo en la ciudad: <http://www.mobiltec.es/k450-mx/>. Fecha de consulta: setiembre 2021.



Otra silla de ruedas eléctrica especial es la K300 PS Jr. de Permobil, que permite un ajuste personalizado de la silla para acompañar el crecimiento del niño. Esta silla cuenta con un sistema de enlace de escalada y tracción en las ruedas para superar obstáculos, apoyabrazos abatible, funciones motorizadas de basculación, elevador motorizado para el asiento y un sistema Uni-Track para mayor comodidad. En la Figura 2.7 se presenta la K300 PS Jr., el rango de movimiento de sus principales funciones y sus características técnicas.

- Longitud total: 108 cm.
- Ancho total: 62 cm.
- Altura máxima: 63 cm.
- Peso total (incluye baterías): 109 kg.
- Capacidad de carga máxima: 76 kg.
- Reclinación ajustable: 85° - 120°
- Basculación: 0° - 45°
- Baterías: 60 Ah (Grupo 34).
- Velocidad máxima: 7.5 / 10 km/h.
- Radio mínimo de giro: 64 cm
- Autonomía: 25 - 30 km
- Superación de obstáculos: 7 cm.
- Electrónica: 90A R-net.<sup>14</sup>
- Otras características: Plegable, manijas de empuje opcional.



Fig. 2.7. Silla de ruedas eléctrica K300 PS Jr.<sup>16</sup>

En la Figura 2.8 se muestra otra alternativa comercial de una silla de ruedas eléctrica de control remoto por medio de un dispositivo móvil que permite realizar un plegado automático de la silla de ruedas, controlar su dirección y frenado. También se puede cambiar la configuración de la velocidad a través de botones instalados en el mando de control manual tipo joystick.

<sup>16</sup> K300 PS Jr. Preparados, listos, Ya!: Nuevo en la ciudad: <http://www.mobilitec.es/k300-ps-jr/>. Fecha de consulta: setiembre 2021.

- Longitud total: 108 cm.
- Ancho total: 61 cm.
- Altura máxima: 98 cm.
- Peso: 28 kg.
- Capacidad de carga máxima: 120 kg.
- Pendiente máxima: 12°.
- Baterías: Batería de litio 22 Ah.
- Tiempo de carga de batería: 4 – 6 h.
- Potencia: 200W.
- Velocidad máxima: 2 - 8 km/h.
- Radio máximo de giro: 1.2 m.
- Autonomía: 25 ± 3 km.
- Controlador: Bluetooth inteligente.
- Precio de venta: \$1,445.00



Fig. 2.8. Silla de ruedas eléctrica controlada por un dispositivo móvil.<sup>17</sup>

### 2.3 Normatividad para el diseño de sillas de ruedas

Según la Organización Internacional de Normalización (ISO) las sillas de ruedas, bastones y plataformas elevadoras deben cumplir con las normas internacionales de serie ISO 7176. Dicha serie determina las dimensiones, estabilidad dinámica y estática, resistencia, durabilidad y seguridad de las sillas de ruedas (ISO, 2018). Dentro de esta serie se obtienen las siguientes normas más relevantes:

- ISO 7176 – 1: 2014: Estabilidad Estática. Se determinan ángulos para evitar el vuelco de la silla en diferentes orientaciones, realizando ajustes de máxima y mínima estabilidad. Es aplicable a sillas de ruedas manuales y eléctricas, incluidos los scooters.
- ISO 7176 – 2: 2017: Estabilidad dinámica. Especifica métodos de prueba para determinar la estabilidad dinámica en sillas de ruedas eléctricas.
- ISO 7176 – 3: 2012: Especifica métodos de prueba para la medición de eficacia de los frenos de las sillas de ruedas eléctricas y manuales, incluidos scooters.
- ISO 7176 – 6: 2018: Determinación de la velocidad nominal máxima de las sillas de ruedas eléctricas y scooters. Esta no debe superar los 15 km/h (4.167 m/s) en una superficie nivelada.

Además, para medir el desempeño funcional de la silla se desarrollan pruebas según la norma ISO 7176-5 e ISO 7176-7, la cual determina sus dimensiones generales, masa

<sup>17</sup> Silla de ruedas eléctrica portátil controlado por móvil: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/mobile-controlled-function-foldable-automatic-smart-electric-wheelchair-portable-powerchair-62263533917.html>. Fecha de consulta: setiembre 2021.

y pruebas de espacio para realizar giros. Las pruebas de resistencia, durabilidad y seguridad están cubiertas bajo las normas ISO 7176-3, ISO 7176-8 e ISO 7176-16.

A nivel nacional, según el Reglamento de la Ley General de la Persona con Discapacidad (Ley N° 27050 y su modificación Ley N° 28164) se establecen ciertas normas de infraestructura de uso comunitario, público y privado que facilite la movilidad, desplazamiento y servicios para las personas con discapacidad. En el Artículo 62 se plantean las siguientes normas:

- Pasamanos y rampas:
  - Las aceras y rampas de las vías accesibles permitirán pendientes entre 2% y 14% según la longitud máxima del tramo:
    - Tramos cortos de hasta 1 m de longitud (14%).
    - Tramos de 1.01 a 2 m de longitud (12%).
    - Tramos de 2.01 a 7.5 m de longitud (10%).
    - Tramos de 7.51 a 15 m de longitud (8%)
    - Tramos de 15.1 a 30 m de longitud (4%).
    - Tramos de longitud mayor a 50 m o vías continuas (2%).
  - El ancho libre mínimo de una rampa de hasta 15 m de longitud será de 90 cm. Si la longitud es mayor, el ancho será de 1.5m.
- Pisos antideslizantes
- Puertas suficientemente anchas (91.44 cm)
- Pasadizos suficientemente anchos (96.52 cm)
- Rampas y servicios higiénicos accesibles para sillas de ruedas en todo edificio privado o público de uso público.

Otra reglamentación para personas con discapacidad es la Norma A.120, que contempla la accesibilidad para personas con discapacidad y de personas adultos mayores, entre los artículos de esta norma se destacan los siguientes:

- Artículo 5, ítem f: Los pasadizos de longitud mayor a 25 m y un ancho menor a 1 m, deben contar con espacios de giro para una silla de ruedas de dimensiones 1.5 m x 1.5 m, en cada 25 m.
- Artículo 6.- Características de diseño en rampas y escaleras: Para las condiciones de diseño de rampas se establece que estas deben tener un ancho mínimo de 1 m, una pendiente máxima de 12% o 6.8°. En la Figura 2.9 se muestran las dimensiones y características del diseño de rampas en edificaciones.

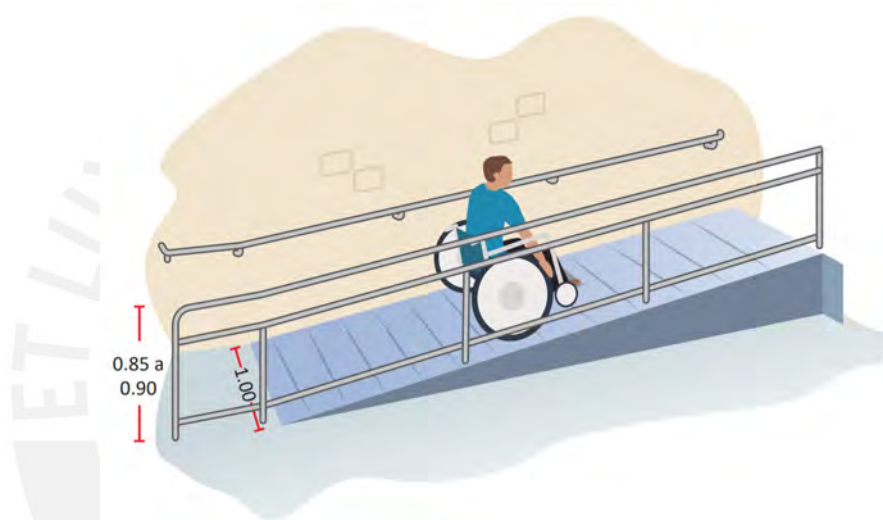


Fig. 2.9. Características de diseño en rampas.

Además, para reducir la longitud de la rampa, se pueden realizar rampas consecutivas con una longitud mínima plana de 1.5 m entre rampas como tramos de descanso según se amerite. En la Figura 2.10 se muestran la dimensión máxima entre rampas consecutivas.

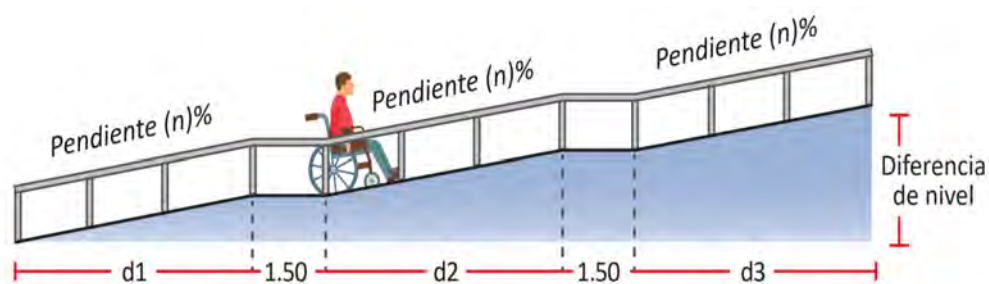


Fig. 2.10. Características de diseño en rampas consecutivas.

- Artículo 15.- Inodoros: Los inodoros en edificaciones se deben instalar entre 45 a 50 cm sobre el nivel de piso. Además, el cubículo debe contar con barras de apoyo tubulares a una altura de 0.25m por encima del inodoro. En la Figura 2.11 se muestran las dimensiones y características del diseño de inodoros en edificaciones.

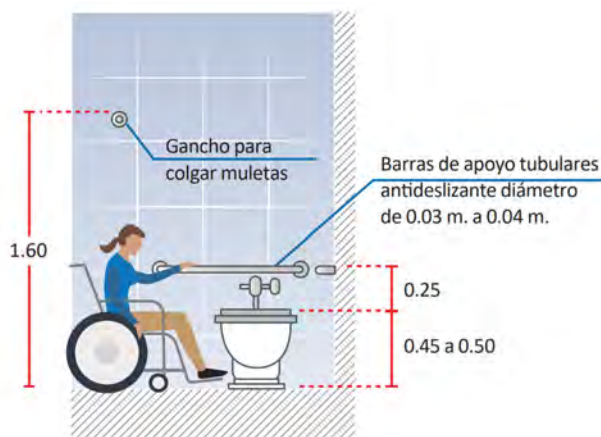


Fig. 2.11. Características de diseño de inodoros.

De igual manera se debe respetar en la distribución de los cubículos de los baños un espacio de giro de 1.5 m de diámetro. En la Figura 2.12 se muestran las dimensiones de un cubículo de baño y el espacio de giro máximo para el desplazamiento de una persona en silla de ruedas.

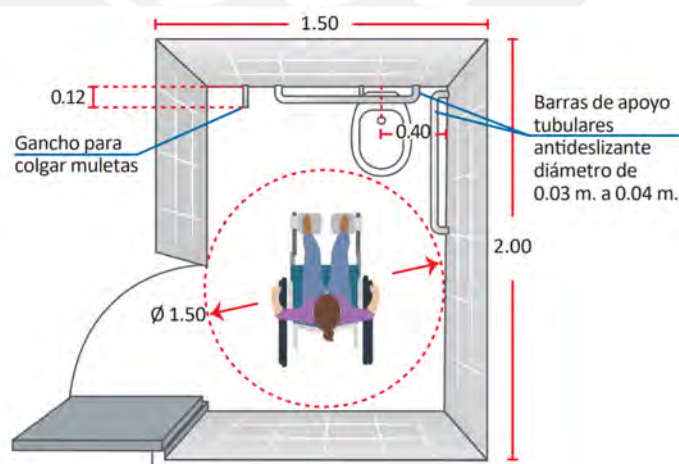


Fig. 2.12. Radio de giro de silla de ruedas en cubículo de baño.

- Artículo 16.- Urinarios: Los urinarios deben tener un diseño tipo pesebre o colgados en la pared instalados a una altura no mayor a 40 cm sobre el nivel del

piso. Deberá existir también, un espacio libre de 75 cm x 1.2 m, frente al urinario para permitir la accesibilidad de unas personas en silla de ruedas. En la Figura 2.13 se muestran las dimensiones y características del diseño de urinarios en edificaciones.

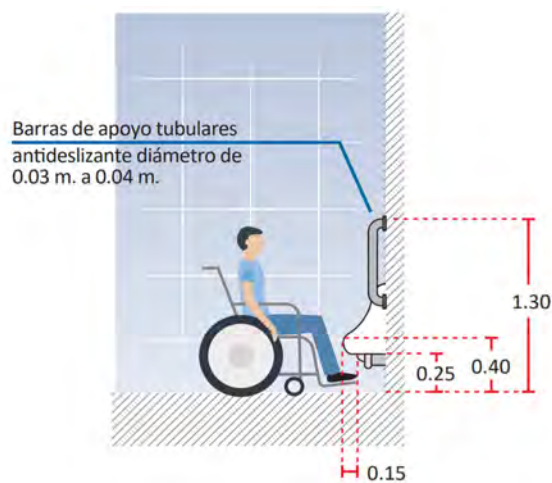


Fig. 2.13. Características de diseño de urinarios.

## **CAPÍTULO 3**

### **DISEÑO CONCEPTUAL**

En el presente capítulo se determinan, en primer lugar, los requisitos de diseño, los que son obtenidos a partir de la identificación de los requisitos de usuario en la investigación realizada anteriormente. Luego, siguiendo la metodología de diseño mecatrónico “Design Methodology for Mechatronic Systems” basada en la metodología propuesta por la asociación de ingenieros Verein Deutscher Ingenieure (VDI), se realiza el diseño conceptual del sistema que se divide en dos etapas. En la primera etapa se realiza la descomposición funcional y síntesis de medios, donde se obtienen las funciones y medios necesarios para realizar la función global y se obtiene una propuesta de solución óptima. En la segunda etapa se realiza la síntesis del comportamiento de la estructura general, donde se realiza la arquitectura del sistema según la solución óptima seleccionada, la arquitectura eléctrica-electrónica del sistema, el bosquejo técnico del sistema físico general y el diagrama general de operaciones.

#### **3.1 Requisitos de Usuario**

Según la investigación y el análisis realizado en el marco teórico y estado del arte, se determinan los principales requerimientos del usuario, y en relación con estos se definen los requisitos de usuario. La silla de ruedas eléctrica tiene como función principal mejorar el traslado y accesibilidad del usuario paciente (niños entre 6 y 12 años). Para ello, la silla de ruedas debe ser de fácil manejo para el usuario operario

(niño o asistente). Además, la silla debe adaptarse a las dimensiones del usuario paciente de tal manera que le permita un fácil manejo. Para que el niño pueda realizar con mayor facilidad sus necesidades higiénicas<sup>18</sup> desde la silla, esta debe tener un mecanismo sencillo que permita retirar parte del asiento. Como el usuario paciente es un niño, se deben incorporar medidas de seguridad como, por ejemplo, que la silla pueda recorrer con una velocidad menor que la establecida en la norma, colocar ruedas antivuelco para evitar que la silla se vuelque y también, colocar un sistema que permita detener la silla en caso de alguna emergencia. Por último, la silla de ruedas debe ser compacta, de fácil mantenimiento y de precio accesible. En el Anexo A se detallan los requerimientos y requisitos de usuario que se consideran relevantes para el desplazamiento y accesibilidad el niño en silla de ruedas.

### 3.2 Requisitos de Diseño

Según los requisitos del usuario determinados en el apartado anterior, se seleccionan los requisitos de diseño. Para ello, se clasifican los requisitos de diseño según categorías de diseño de la silla de ruedas y los medios que los representan:

#### 3.2.1 Cinemática

Se consideran los requerimientos de velocidad, variación de velocidad y el giro de la silla:

- **Sistema de propulsión:** Este sistema debe permitir movilizar la silla de ruedas a una velocidad máxima moderada de 10 km/h para un mejor control, la cual está dentro de los 15 km/h según la norma ISO 7176, y subir una pendiente máxima de 15° que supera el límite permitido de diseño de rampas según la Norma A.120 (6.8°) para un mayor alcance de propulsión y seguridad para desplazarse por rampas que superen esta norma, debido a que la reglamentación límite de pendientes en el Perú no siempre es respetada.
- **Sistema de desplazamiento direccional:** Este sistema permitirá controlar la dirección de la silla de ruedas y poder realizar giros cerrados a 360° dentro una distancia de 1.5 m, como en pasillos o paredes angostas según la norma A.120.

---

<sup>18</sup> Necesidades higiénicas: Realizar necesidades fecales o urinarias.



- **Sistema de control de velocidad:** Este sistema le debe permitir al usuario operario regular la velocidad en 5 velocidades hasta los 10km/h según la norma ISO 7176:2018 con una baja aceleración de  $0.3 \text{ m/s}^2$  (Torres, 2020).

### 3.2.1 Cinética

Se consideran los requerimientos de frenado, peso y capacidad de carga:

- **Sistema de frenado:** Este sistema le permitirá al usuario operario desacelerar o detener las ruedas traseras de la silla de ruedas de manera manual o remota.
- **Sistema de amortiguación:** El sistema de amortiguamiento debería mantener la estabilidad de la silla de ruedas ante irregularidades del terreno y debería ser capaz de soportar una carga máxima de 80 kg, ya que soporta el peso del usuario (alrededor de 60 kg en un caso crítico)<sup>19</sup> y los accesorios que el usuario pueda llevar consigo.
- **Peso ligero:** La silla de ruedas debería tener un peso máximo de 40 kg contando con la batería, considerando que las sillas de ruedas eléctricas normalmente tienen un peso superior a los 60 kg por los componentes y grandes equipamientos<sup>20</sup>.

### 3.2.1 Ergonomía

Se considera la comodidad del usuario para el control de la silla de ruedas:

- **Mando de control manual:** Interfaz manual instalada en la silla de ruedas que sea de fácil manejo para los niños y que les permita tener un control de 360° de la silla de ruedas para poder desplazarse con comodidad en la escuela y el hogar. Además, debe contar con un accionamiento de los estados de la silla de ruedas (On/Off, emergencia, velocidad) para que el usuario operario pueda accionarla sin ninguna dificultad<sup>21</sup>.
- **Mecanismo de servicio higiénico:** Mecanismo diseñado para que le facilite al usuario realizar sus necesidades higiénicas desde la silla de ruedas.

<sup>19</sup> Development of a WHO growth reference for school-aged children and adolescents: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2636412/>. Fecha de consulta: setiembre 2021.

<sup>20</sup> Silla de ruedas eléctrica: <https://mayoresyseguros.com/silla-de-ruedas-electrica/>. Fecha de consulta: octubre 2021.

<sup>21</sup> Consejos para escoger la silla de ruedas eléctrica: <https://www.ortopediamimas.com/blog-de-ortopedia/consejos-para-escoger-la-silla-de-ruedas-electrica/>. Fecha de consulta: setiembre 2021.

- **Mecanismo para ajustar silla:** Mecanismo que le permita al usuario ajustar y personalizar las dimensiones del asiento, respaldar y reposabrazos según su ergonomía<sup>21</sup>. En base a los percentiles de 3, 15, 50, 85 y 97 propuestos por la OMS, los patrones de crecimiento de los niños entre 6 y 12 años muestran una estatura de 105 cm a 165 cm en el caso de las niñas y de 106 cm a 163 para el caso de los niños<sup>22</sup>. Para ello, se proponen 3 medidas para la silla de ruedas en base a los 3 percentiles intermedios propuestos.
- **Posición accesible de la interfaz manual:** La interfaz manual de control se debe ubicar en el reposabrazos de la silla de ruedas para que sea manipulada por el usuario paciente. Además, se puede regular la posición de la interfaz manual para que la silla también sea controlada por un asistente o acompañante del niño.

### 3.2.1 Estabilidad y Seguridad

Se considera la estabilidad de la silla en el terreno y la seguridad en su conducción:

- **Estabilidad mecánica:** Debe contar como mínimo con una rueda trasera de apoyo para evitar vuelcos de la silla de ruedas. Esta rueda también permite estabilizar la silla cuando se quiera subir a veredas o elevaciones de resalto.
- **Sistema antideslizante para ruedas:** Evita que las ruedas deslicen en pendientes de hasta 15° para mayor seguridad, superando el diseño de rampas según la norma A.120.
- **Sistema de percepción de entorno:** Este sistema le permitirá al usuario controlar la silla de ruedas de manera remota y con mayor seguridad, ya que contará con una distancia máxima de reconocimiento de 5 metros para visualizar el recorrido y el entorno<sup>23</sup>.

### 3.2.1 Consumo de Energía

Se considera el consumo de energía de los componentes eléctricos de la silla:

---

<sup>22</sup> Curva OMS: [https://www.aepap.org/sites/default/files/curvas\\_oms.pdf](https://www.aepap.org/sites/default/files/curvas_oms.pdf). Fecha de consulta: setiembre 2021.

<sup>23</sup> Estudio de los sensores para la detección de obstáculos aplicables a robot móviles:

<http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/80846/6/jacobarTFM0618memoria.pdf>. Fecha de consulta: setiembre 2021.

- **Componentes con eficiencia energética:** Se debería minimizar el consumo energético de los componentes electrónicos, por eso el amperaje máximo debería ser de 2 A, ya que el sistema de control de la silla de ruedas es el componente con mayor consumo de corriente, y en promedio representa ese valor de amperaje<sup>24</sup>.
- **Sistema regulador de energía:** Este sistema debería consumir 30 Ah de batería para su propulsión (consumo de batería promedio para sillas de ruedas eléctricas<sup>25</sup>).

### 3.2.1 Autonomía y Alcance

Se considera la autonomía y el alcance del control remoto de la silla:

- **Sistema de energización recargable:** Este sistema debería permitir que la silla de ruedas tenga una autonomía máxima de 30 km<sup>25</sup>. Se considera este valor, ya que el usuario no requiere recorrer largas distancias debido a su edad, y aún depende del acompañamiento de los padres o de un tutor.
- **Interfaz de control remota:** Este sistema permitirá la comunicación inalámbrica para la operación de la silla de ruedas en un rango máximo de 20 metros<sup>26</sup>.

### 3.2.1 Estética

Se considera la apariencia de la silla de ruedas:

- **Diseño compacto:** Las dimensiones de la silla según los productos existentes vistos en el estado del arte deberían ser como máximo de 90 cm de largo, 70 cm de ancho y 100 cm de alto<sup>27</sup>, ya que no debe superar los 120 cm de largo, 70 cm de ancho y 105 cm de alto<sup>28</sup>. Además, los componentes electrónicos deberían ocupar el menor espacio posible.

<sup>24</sup> Raspberry Pi 4 Model B: <https://datasheets.raspberrypi.org/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf/>. Fecha de consulta: setiembre 2021.

<sup>25</sup> ¿Cómo cargar las baterías de sillas eléctricas y scooter minusválidos?: <https://mundodependencia.com/como-cargar-las-baterias-de-sillas-electricas-y-scooter-minusvalidos/>. Fecha de consulta: octubre 2021.

<sup>26</sup> Redes Inalámbricas: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100918/LM01\\_R\\_ES.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100918/LM01_R_ES.pdf). Fecha de consulta: setiembre 2021.

<sup>27</sup> Uso y recomendaciones sobre silla de ruedas: <https://www.torrevieja-salud.com/wp-content/uploads/2018/10/EDUCA-Silla-de-ruedas.pdf>. Fecha de consulta: setiembre 2021.

<sup>28</sup> Dimensiones de una silla de ruedas: <https://www.jubilacionypension.com/generacion-senior/vivienda/dimensiones-silla-de-ruedas/>. Fecha de consulta: octubre 2021.

- **Bordes redondeados:** Permitirá realizar un fácil mantenimiento y limpieza en la estructura de silla. Debe tener un redondeado mínimo de 1 cm para evitar zonas puntiagudas que generen riesgo al usuario.
- **Colores cromáticos:** La apariencia de la silla de ruedas debería tener colores vivos y cromáticos que atraiga la atención de los niños e influya en su estado emocional y comportamiento, como lo son el amarillo, azul, naranja, rojo, rosa, verde, violeta, etc.<sup>29</sup>

### 3.2.1 Materiales

Se considera el material de los componentes y su estandarización en el mercado:

- **Materiales resistentes a la corrosión:** La estructura y los complementos de la silla deberían ser de materiales inoxidables y resistentes para que la estructura no se corroa, oxide y tenga una mejor vida útil frente a las condiciones ambientales que se le presenten.
- **Componentes estandarizados:** Las piezas y componentes de fabricación deberían ser comerciales para disminuir el costo de fabricación.

### 3.2.1 Costo

Se considera el costo de fabricación de la silla de ruedas:

- **Presupuesto de fabricación limitado:** El costo máximo de fabricación debe ser de S/. 8,000.00, para que el precio de venta del producto sea menor y más accesible para su compra, a diferencia de los precios evaluados en el estado del arte.

En la Tabla 3.1 se presenta una síntesis de los requerimientos de diseño, mientras que en el Anexo B se muestra en detalle el establecimiento de estos requerimientos siguiendo la metodología de diseño propuesta para este trabajo.

---

<sup>29</sup> Significado del color niños: <https://psicodiagnos.es/areageneral/otros-temas/significado-del-color-en-los-dibujos-de-los-ninos/index.php> Fecha de consulta: setiembre 2021.

Tabla 3.1. Resumen de los requerimientos para el diseño.

Requerimientos	Característica
Sistema de propulsión	Permite alcanzar una velocidad máxima de 10 km/h y una pendiente máxima de 15°
Sistema de desplazamiento direccional	Permite giros suaves y cerrados
Sistema de frenado	Desaceleración progresiva de ruedas traseras
Mecanismo de servicio higiénico	Cojín pivoteado en asiento para abertura
Interfaz de control remota	Comunicación inalámbrica (rango máximo de 20 m)
Mando de control manual	Mando de control de 360°
Mecanismo para ajustar la silla	Asiento, reposabrazos y reposapiés regulables
Bordes redondeados	Redondeo mínimo de 1 cm
Colores cromáticos	Colores claros en cojines y chasis
Componentes estandarizados	Piezas comerciales
Sistema antideslizante para ruedas	Evita deslizamiento en pendientes de 15°
Diseño compacto	Dimensiones máximas: 90cm x 70cm x 100cm
Estabilidad mecánica	Rueda trasera para evitar vuelcos
Sistema de amortiguación	Capacidad de carga máxima: 80 kg
Componentes con eficiencia energética	Componentes electrónicos con amperaje máximo de 2 A
Sistema de percepción de entorno	Distancia mínima de percepción: 5 m
Posición accesible de la interfaz manual	Posición de la interfaz manual en el reposabrazos (abatible)
Sistema regulador de energía	Consumo de batería: 30 Ah
Peso ligero	Peso máximo de 40 kg (sin batería)
Materiales resistentes a la corrosión	Materiales inoxidable
Sistema de control de velocidad	Variar la velocidad entre los 0 y 10 km/h (5 velocidades)
Sistema de energización recargable	Autonomía máxima de 30 km
Presupuesto de fabricación limitado	Precio máximo: S/. 8,000.00

Además de los requisitos propuestos de diseño, se considera también el requisito de un manual de funcionamiento que brinde información al usuario para el fácil manejo del sistema; sin embargo, este requisito no forma parte del desarrollo del presente trabajo.

### 3.3 Descomposición funcional y síntesis de medios

Con la identificación y clasificación de los requisitos de diseño se da inicio al diseño conceptual de este trabajo. En primer lugar, se elabora un árbol de funciones y medios definido por niveles, mediante el cual se plantean las funciones, subfunciones y medios operacionales que permiten realizar la función global de la silla de ruedas.

En el nivel 1 se define la función global del sistema, se plantean los medios operacionales generales y se realiza una comparación de estos medios como alternativas para la función según un análisis técnico y económico para obtener la opción óptima. De este medio seleccionado parten las subfunciones de la función global contempladas en el nivel 2.

A partir del nivel 2 se definen las subfunciones necesarias que permitan realizar la función global, y sus medios son comparados a través de una matriz morfológica donde se plantean posibles soluciones, en las que se realiza el análisis técnico-económico de estas propuestas en base a los requisitos de diseño que sean relevantes para su comparación. El puntaje obtenido en el análisis técnico-económico determina la solución óptima seleccionada del nivel. En el Anexo C se presenta el desarrollo completo de la selección de la solución óptima para el diseño conceptual basada en la Metodología del Sistema Mecatrónico.

Este proceso se repite en los siguientes niveles hasta que el medio óptimo resultante forme parte del Sistema Mecatrónico y ya no requiera alguna otra subfunción para definirse. Los medios obtenidos en el último nivel se clasifican según su estructura en los siguientes subsistemas del Sistema Mecatrónico:

- **Sistema de Energía / Materia:** En el sistema de materia se ubican los medios necesarios que componen la estructura del sistema mecatrónico. El sistema de energía alimenta eléctricamente a los demás subsistemas para que funcione el sistema mecatrónico.
- **Sistema de Actuación:** Sistema que transforma una señal emitida por el sistema de información en movimiento para el funcionamiento del sistema mecatrónico.
- **Sistema de Medición:** Este sistema permite sensar señales externas al sistema mecatrónico por medio de equipos de visualización o control, y transmitir esta información para que sea procesada y genere una respuesta en el sistema mecatrónico.
- **Sistema de Información:** Este sistema recibe información externa, ya sea por parte de las interfaces de entrada o por el sistema de medición. Luego, procesa y transmite

esa información procesada hacia las interfaces de salida y al sistema de actuación para generar una respuesta del sistema mecatrónico.

- **Interfaz de Entrada:** Este sistema se encarga de establecer comunicación entre el controlador y el proceso a desarrollar, de tal manera que dan órdenes que procesa el sistema de información y distribuye al sistema de actuación e interfaces de salida del sistema mecatrónico.
- **Interfaz de Salida:** Este sistema se encarga de transmitir la información del proceso realizado del sistema mecatrónico de manera gráfica, visual y/o audible.

En la Figura 3.1 se presenta la estructura fundamental del Sistema Mecatrónico modificada, ya que la propuesta de solución desarrollada está diseñada también para soportar al usuario, no solo que sea controlado por él. Por eso, se añadió un sistema del ser humano al Sistema de Energía y Materia de la arquitectura general. A este sistema se le adiciona como entrada al ser humano con un estado emocional inicial y como salida al mismo ser humano, pero con un estado emocional diferente, debido a la transformación que realiza el sistema mecatrónico al usuario.

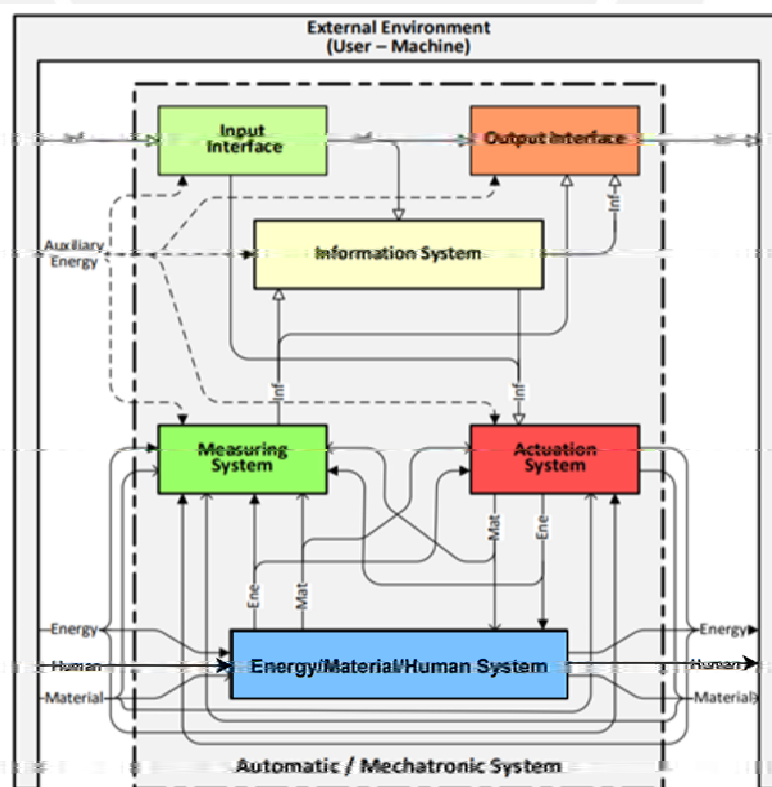


Fig. 3.1. Arquitectura General del Sistema Mecatrónico modificada.

### 3.3.1 Nivel 1

La función principal del sistema es el desplazamiento del niño con discapacidad física motriz a través de la silla de ruedas y que esta le brinde mayor accesibilidad en su entorno. Para realizar esta función global se debe determinar qué tipo de operación tendrá la silla de ruedas. Se propone como primera alternativa la operación automática, en la cual el sistema utiliza un arrancador electromagnético controlado por uno o más dispositivos pilotos automáticos como, un panel de pulsadores e interruptores, que accionados por el usuario operario permite el desplazamiento de la silla. La segunda alternativa es la operación semiautomática, en la cual el sistema también utiliza un arrancador electromagnético para accionar el sistema a través de dispositivos pilotos manuales como pulsadores de maniobra o palancas de control <sup>30</sup>.

La principal diferencia entre la operación automática y la operación semiautomática, en base a los requisitos de diseño, es la interfaz de control manual y remoto, ya que un control semiautomático le permite al usuario operario un mejor manejo del desplazamiento y la dirección de la silla de ruedas en todo momento, ya que el dispositivo de pilotaje es maniobrable podrían realizar movimientos de 360°. Sin embargo, el sistema de control direccional de la operación automática podría realizar giros más suaves a una velocidad constante, y con mayor precisión que la segunda alternativa. Por otro lado, implementar un control automático a la silla de ruedas resulta ser más económico para un diseño compacto, pero más costoso para los requisitos de mecanismo de servicio higiénico y presupuesto de fabricación, ya que se tendría que implementar un software de control más robusto y añadir más componentes para que se accionen estos sistemas de manera neumática o eléctrica.

Debido a los principales requisitos mencionados anteriormente, y considerando las características técnicas y económicas de cada modo de operación, se selecciona como solución óptima a la operación semiautomática, pues le permite al usuario operario un mejor control manual y remoto de la silla de ruedas. En el Anexo C se presenta el

---

<sup>30</sup> Comparación entre los sistemas: semi automático, automático, neumático e hidráulico:  
<https://www.grupomorbeck.com/site/es/blog/noticias-del-grupo-morbeck/comparacion-entre-los-sistemas-semi-automatico-automatico-neumatico-y-hidraulico>. Fecha de consulta: octubre 2021.



análisis técnico-económico de ambas propuestas de solución en base al peso relativo de los requisitos de diseño.

### **3.3.2 Nivel 2**

Con el modo de operación semiautomática definido como medio de la función global, se procede a determinar las subfunciones principales del sistema, así como los medios posibles de cada una. Para seleccionar la mejor opción se realizan posibles soluciones entre los medios de cada subfunción y se selecciona la solución óptima entre estas según los requisitos propuestos de diseño.

#### **3.3.2.1 Desplazar silla de ruedas**

Esta función se plantea para que la silla de ruedas pueda transportar al usuario paciente. Para ello, se tiene que conocer qué tipo de tracción permitirá desplazar la silla y realizar los giros de mejor manera, considerando el peso de la silla, así como el peso y comportamiento del usuario. Se proponen tres tipos de tracción de desplazamiento para la silla de ruedas: delantera, central, trasera <sup>31</sup>.

La tracción delantera tiene como principal ventaja superar obstáculos con facilidad, ya que el motor acciona las ruedas delanteras, y además ofrecen un buen rendimiento al aire libre. Para la tracción central las ruedas de conducción se ubican en el medio de la silla de ruedas y necesita como mínimo 4 ruedas más pequeñas para dirigir la silla. Su principal ventaja es que este tipo de tracción permite una mayor maniobrabilidad como, por ejemplo, un menor radio de giro, y también ofrece una conducción más suave y segura. Las sillas de ruedas con tracción trasera son las más comercializadas ya que ofrecen mayor estabilidad, y un buen rendimiento en la conducción para superar obstáculos en el exterior y para buena maniobrabilidad en interiores.

---

<sup>31</sup> ¿Cómo seleccionar una silla de ruedas eléctrica?: <https://accesibilidad.aspaym.org/como-seleccionar-una-silla-de-ruedas-electrica/>. Fecha de consulta: octubre 2021.

### **3.3.2.2 Accionar asiento de servicios higiénicos**

En esta función se plantea accionar un sistema que le permita al usuario realizar sus necesidades higiénicas desde su asiento en la silla de ruedas. Para ello, se debe tener un mecanismo de accionamiento que puede ser manual, mecánico o eléctrico.

Un mecanismo manual, consistiría en que el propio usuario paciente, o un asistente, retire parte del asiento haciendo presión en el mecanismo que levantaría parte del asiento. Para un mecanismo mecánico, el usuario paciente podría accionar una palanca que retraiga parte del asiento por medio de un accionamiento neumático, sin embargo, requeriría de un mayor número de componentes y un mayor costo económico con respecto a las otras alternativas para accionarlo correctamente. Para un mecanismo eléctrico, el usuario podría accionar el mecanismo desde el módulo de control en el reposabrazos, de tal manera que se envíe una señal de apertura, o se retire un seguro que enclava el asiento con el asiento extraíble. Para ello requeriría un actuador que abra y cierre el seguro lo cual implicaría un costo adicional.

### **3.3.2.3 Energizar sistema**

Esta función se considera para proveer energía a todo el sistema. Se consideran como principales propuestas a las baterías eléctricas, baterías de hidrógeno y las baterías eléctricas con recarga de energía solar.

Las baterías eléctricas son el medio de energización más utilizado ya que pueden almacenar en ellas energía química y transformarla en energía eléctrica; sin embargo, necesitan ser recargadas por un medio eléctrico. Las baterías eléctricas con energía solar de recarga no tendrían ese problema, ya que no perdería tiempo retirando y recargando la batería de su posición, ya que su fuente sería una energía renovable y le permitiría mayor autonomía a la silla de ruedas, pero su elaboración requiere otros factores, consideraciones técnicas y económicas para su correcta implementación como la dependencia del clima y la potencia que entrega. Por último, las baterías de hidrógeno le permiten más autonomía a la silla de ruedas con la misma capacidad de otra batería; sin embargo, es difícil de almacenar, no es una energía renovable porque

requiere de gas natural y consume mucha más electricidad que una batería convencional<sup>32</sup>.

#### **3.3.2.4 Sensar entorno**

Esta función se plantea para que desde la silla de ruedas se pueda reconocer la profundidad de espacio de recorrido cuando sea controlada de manera remota. Para realizar esta medición se consideran sensores de rango activo y/o visión artificial.

Los sensores de rango activo permiten obtener información de la profundidad del espacio que recorre la silla de ruedas para poder mapear el entorno y reconocer la presencia de obstáculos. Por otro lado, la visión artificial permite obtener información por medio de imágenes del entorno de la silla y la profundidad por donde circula. La visión artificial le permitirá al usuario tener una mejor visión de la conducción remota de la silla; sin embargo, los sensores de rango activo tienen un mayor rango de detección y precisión a distancia para la conducción de la silla de ruedas.

#### **3.3.2.5 Interactuar con usuario**

En este sistema se determina la comunicación entre la silla de ruedas y el usuario operario para controlar el desplazamiento y monitorear su desplazamiento. Se consideran dos alternativas: la interfaz táctil y la interfaz manual más la interfaz gráfica.

La interfaz táctil es una de las interfaces más utilizadas, ya que le permite al usuario una navegación sencilla e intuitiva. Es una buena opción para controlar la silla de ruedas desde un dispositivo móvil, sin embargo, no es tan efectiva para controlar la silla de ruedas desde esa posición, ya que requiere una constante observación al panel táctil distraendo al usuario de su manejo. Además, la implementación requiere un costo superior. Por otro lado, la interfaz manual ubicada en la silla de ruedas, por medio de accionamientos maniobrables le permite un mejor control al usuario y mayor

---

<sup>32</sup> Baterías frente a hidrógeno: dos tecnologías para un mismo fin. ¿Cuál es mejor opción?: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/baterias-frente-hidrogeno-tecnologias-mismo-fin-mejor-opcion/20210726203957047344.html>. Fecha de consulta: octubre 2021.

seguridad de manejo. La interfaz remota permitirá controlar la silla de ruedas de manera inalámbrica y desde cualquier dispositivo móvil<sup>33</sup>.

En base a los medios mencionados anteriormente de cada subfunción se definen las principales propuestas de solución, como se ve en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Propuestas de solución del nivel 2.

	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5
<b>Desplazar silla de ruedas</b>	Tracción Trasera	Tracción Central	Tracción Trasera	Tracción Delantera	Tracción Delantera
<b>Accionar asiento de servicios higiénicos</b>	Accionamiento mecánico	Accionamiento manual	Accionamiento manual	Accionamiento eléctrico	Accionamiento manual
<b>Energizar sistema</b>	Baterías de hidrógeno	Baterías eléctricas + Energía solar	Baterías eléctricas	Baterías de hidrógeno	Baterías eléctricas
<b>Sensar entorno</b>	Visión artificial	Sensores de rango activo + Visión artificial	Sensores de rango activo	Sensores de rango activo + Visión artificial	Sensores de rango activo
<b>Interactuar con usuario</b>	Interfaz manual + Interfaz remota	Interfaz táctil	Interfaz manual + Interfaz remota	Interfaz táctil	Interfaz manual + Interfaz remota

Según la Tabla 3.2, se identificó que, para los principales requisitos de diseño, como sistema de propulsión, sistema de desplazamiento direccional e interfaz manual, la soluciones 1, 3 y 5 son las más convenientes, ya que una interfaz táctil sería más difícil de controlar desde la propia silla, ya que el usuario no tendría buena visibilidad para maniobrar. En cambio, una interfaz manual que sea maniobrable le transmite mayor seguridad al usuario operario del control de la silla de ruedas. Además, se excluye el accionamiento eléctrico del mecanismo para accionar el asiento para realizar las necesidades higiénicas del usuario, ya que involucra recargar el módulo donde estaría ubicado el mando manual.

Posteriormente, se identificó que la batería de hidrógeno, si bien genera una buena autonomía para la silla, es costosa, difícil de almacenar y requiere de energía no renovable. También, se descarta la opción de utilizar sensores de rango activo y visión artificial, ya que utilizar ambas alternativas requieren de un diseño de control más

<sup>33</sup> Interfaces Usuario - Máquina:

[http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/9168/1/interfaces\\_usuario\\_maquina.pdf](http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/9168/1/interfaces_usuario_maquina.pdf). Fecha de consulta: octubre 2021.

complejo y costoso para garantizar un control seguro de manera remota, por lo cual se descarta la solución 1. Por último, analizando la estabilidad mecánica y fácil control de la silla de ruedas, se optó como solución óptima a la solución 3, debido a su tracción trasera, que le permite a la silla un buen rendimiento y sobrepasar obstáculos. En el Anexo C se detalla el análisis y puntuación de las propuestas de solución en base a los requisitos de diseño propuestos según un análisis técnico y económico.

### **3.3.3 Nivel 3**

En este nivel se determinan todas las subfunciones dentro de la primera clasificación de subfunciones para realizar el correcto funcionamiento del sistema. De igual manera que en el nivel 2, se determinan los medios necesarios para cada subfunción y se proponen posibles soluciones entre los medios de cada subfunción y se selecciona la solución óptima entre estas según los requisitos de diseño.

#### **3.3.3.1 Funciones y medios de la Tracción Trasera**

Dentro de esta función se presentan las funciones que permitirán el desplazamiento, dirección, control, suspensión y soporte de la silla de ruedas.

- **Propulsar rueda derecha e izquierda**

Esta función permite generar el movimiento necesario en las ruedas de la silla para que pueda transportar al usuario paciente. Para ello se consideran actuadores que generen movimiento a cada una de las ruedas, como motores eléctricos DC brushless, brushed y servomotores DC de rotación continua. En la Tabla 3.3 se presenta la comparación de estas alternativas.

Tabla 3.3. Alternativas para propulsar rueda derecha e izquierda de la silla.

	Motor DC Brushless <sup>34</sup>	Motor DC Brushed <sup>34</sup>	Servomotor DC de rotación continua <sup>35</sup>
Eficiencia	Alta	Bajo	Alta
Ruido y/o vibración	Bajo	Alto	Medio
Consumo energético	Bajo	Medio	Baja
Velocidad de giro	Alta	Bajo	Alto
Potencia	Alta	Bajo	Alta
Costo	Alto	Bajo	Alto
Control	Requiere circuito controlador electrónico	Mecánico	Controla Posición y velocidad

- **Avanzar sobre el suelo**

En el desplazamiento de la silla de ruedas se requieren ruedas motoras que generen fricción con el suelo para que la silla de ruedas pueda moverse. Los componentes considerados son las ruedas neumáticas y/o ruedas macizas. En la Tabla 3.4 se presenta la comparación de estas alternativas.

Tabla 3.4. Alternativas para desplazar la silla de ruedas.

	Ruedas neumáticas <sup>36</sup>	Ruedas macizas <sup>36</sup>	Ruedas neumáticas + macizas
Comodidad al usuario	Alta	Baja	Buena
Estabilidad	Alta	Media	Alta
Resistencia	Baja	Alta	Media
Vibración	Baja	Alta	Media

- **Controlar desplazamiento**

Esta función permite controlar el desplazamiento de la silla de ruedas mediante el control directo de los componentes de los sistemas de actuación y medición. Esta función permitirá configurar la velocidad de la silla y los estados de la silla. Para esta función se considera como alternativas un microcontrolador, un computador de placa única (SBC - Single Board Computer) y un PLC (controlador lógico programable). En la Tabla 3.5 se presenta la comparación de estas alternativas para el desplazamiento de la silla de ruedas.

<sup>34</sup> Todo sobre medidas de los neumáticos para sillas de ruedas y scooters: <http://eltra-trade.sk/es/whats-difference-between-brushed-and-brushless-dc-motors>. Fecha de consulta: octubre 2021.

<sup>35</sup> Tipos de servomotores que existen actualmente: <https://www.fabricantes-maquinaria-industrial.es/tipos-de-servomotores/>. Fecha de consulta: octubre 2021.

<sup>36</sup> ¿Cuál es la diferencia entre motores de CC con y sin escobillas?: <https://www.ortopediamimas.com/blog-de-ortopedia/medidas-neumaticos-sillas-de-ruedas-y-scooters/>. Fecha de consulta: octubre 2021.

Tabla 3.5. Alternativas para controlar el desplazamiento de la silla de ruedas.

	Microcontrolador	SBC	PLC <sup>37</sup>
Precisión de control	Bueno	Bueno	Alto
Consumo de energía	Bajo	Medio	Bajo
Rapidez de respuesta	Buena	Buena	Alta
Costo	Bajo	Medio	Alto

- **Amortiguar sistema**

Esta función mantiene al sistema, sus componentes y al usuario paciente fuera de vibraciones provocadas por el terreno irregular y la acción rotativa de los motores. Para esta función se considera como alternativas una suspensión rígida, un amortiguador neumático, un amortiguador de caucho o resortes helicoidales.

En la opción de suspensión rígida ambas ruedas se encuentran unidos por un eje rígido de tal manera que ambas ruedas se inclinan de forma sincronizada; sin embargo, presenta menor estabilidad, mayor vibración y menor comodidad. El amortiguador neumático suaviza las irregularidades del terreno, de tal manera que las ruedas están en contacto con el suelo en todo momento. Además, absorbe las vibraciones externas con efectividad creando una sensación de comodidad al usuario. En el caso de los amortiguadores de caucho, estos absorben movimientos axiales, laterales y angulares, produciendo una buena amortiguación de vibraciones. Por último, los resortes helicoidales son el sistema más simple de amortiguación, extendiéndose y comprimiéndose para mantener nivelada la silla de ruedas.

- **Soportar mecánicamente el sistema**

El sistema necesita estar colocado sobre una estructura que le permita sostener todos los componentes de la silla de ruedas. Como alternativas que sostienen el sistema se proponen la estructura tubular y estructura de perfil cuadrado. La estructura tubular permite obtener una gran resistencia con poco peso y una estructura de agarre cómoda para el usuario por sus bordes redondeados. La estructura de perfil cuadrado presenta

<sup>37</sup> Ventajas y desventajas en el empleo de los PLC:

[https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/IEA/AI/AI08/es\\_IEA\\_AI08\\_Contenidos/website\\_12\\_ventajas\\_y\\_desventajas\\_en\\_el\\_empleo\\_de\\_los\\_plc.html](https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/IEA/AI/AI08/es_IEA_AI08_Contenidos/website_12_ventajas_y_desventajas_en_el_empleo_de_los_plc.html). Fecha de consulta: octubre 2021.

un peso superior por pulgada, y permite una mejor soldadura en los extremos con varios tubos de este perfil en comparación a la estructura tubular<sup>38</sup>.

### • Frenar sistema

Este sistema permite que el usuario operario detenga la silla de ruedas en cualquier momento. Para ello, se considera un sistema de freno de disco que se acciona mediante un fluido o debido a la tensión ejercida por un cable, que viaja a través de una manguera, de tal manera que el pistón actúa como prensa hidráulica o mecánica contra los discos de freno. Por otro lado, se tiene el sistema de frenado electrónico, que consiste en frenar o desacelerar la silla mediante un accionamiento eléctrico que puede estar ubicado en el módulo de control manual. En la Tabla 3.6 se presentan las principales ventajas y desventajas de ambos discos.

Tabla 3.6. Ventajas y desventajas de sistemas de freno eléctricos y de disco.

	Freno de disco <sup>39</sup>	Freno electrónico <sup>39</sup>
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Excelente rendimiento de frenado</li> <li>- Ligero</li> <li>- Fácil de ajustar</li> <li>- Buen desempeño en condiciones húmedas y secas</li> <li>- Excelente control de frenado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No requiere mantenimiento</li> <li>- No tiene peso añadido</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requiere ajustes y mantenimientos ocasionales</li> <li>- Mayor costo</li> <li>- Exceso de suciedad disminuye el rendimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bajo rendimiento de frenado</li> </ul>

### • Mantener estabilidad mecánica

Este sistema brinda comodidad y seguridad al usuario paciente al momento de la conducción en pendientes o ante movimientos bruscos de la silla de ruedas. Como alternativas se considera una rueda antivuelco trasera y dos ruedas antivuelcos laterales. Ambas alternativas evitan la posibilidad de volcar la silla hacia atrás, ya que sirven de soporte.

<sup>38</sup> El tubo cuadrado: características, fabricación, corte y uso: <https://ferrosplanes.com/tubo-cuadrado-caracteristicas-fabricacion-corte-uso/>. Fecha de consulta: octubre 2021.

<sup>39</sup> Guía Técnica: Frenos de scooter eléctrico: <https://eciclos.cl/blogs/news/guia-tecnica-frenos-scooter-electrico>. Fecha de consulta: noviembre 2021.



- **Medir velocidad derecha e izquierda**

Esta función permite medir la velocidad de los motores y configurarlos según el control que realice el usuario a través de la interfaz manual. Para esta función se consideran encoders como dispositivos que codifican el movimiento en diversos impulsos eléctricos (ondas y pulsos) para que sea leído por un dispositivo de control. Se proponen como alternativas los encoders magnéticos y ópticos. En la Tabla 3.7 se presentan las principales ventajas y desventajas de los encoders magnéticos y ópticos.

Tabla 3.7. Ventajas y desventajas de los encoders magnéticos y ópticos<sup>40</sup>.

	Encoder magnético	Encoder óptico
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lectura confiable.</li> <li>- Bajo costo.</li> <li>- Resolución en micrómetros.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta precisión (décimas de micrón).</li> <li>- No necesita estar en contacto físico con las partes</li> <li>- Bajo costo.</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Susceptible a campo magnético intenso.</li> <li>- No son recomendables en entornos con grandes fuerzas electromotrices.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Susceptible a la suciedad.</li> </ul>

### 3.3.3.2 Función y medio de Accionamiento manual

En esta función se determina la función de retirar el asiento de necesidades higiénicas para que el usuario realice sus necesidades higiénicas.

- **Retirar asiento**

Esta función le permite al usuario paciente, con ayuda de un asistente, retirar parte del asiento sin incomodar al paciente, de tal manera que queda un espacio vacío entre el usuario y el inodoro cuando se ha posicionado la silla de ruedas sobre este, para que el usuario paciente pueda realizar sus necesidades higiénicas con mayor facilidad. Para esta función se considera un asiento abatible, es decir, que esté pivotado sobre un extremo de tal manera que pase de una posición horizontal a una posición vertical, manteniéndose unido a la estructura del asiento general; sin embargo, se debe mover al paciente. Otra opción es un asiento que pueda extraerse del asiento general donde estará sentado el usuario paciente, y luego pueda volver a colocarse sin generar incomodidad al usuario.

<sup>40</sup> ¿Qué es un encoder, cuáles son sus tipos y para qué sirven?:  
<https://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/encoder-tipos>. Fecha de consulta: octubre 2021.

### 3.3.3.3 Función y medio de Sensores de rango activo

Dentro de esta función se presentan las funciones para identificar el recorrido de la silla de ruedas de manera remota a través de sensores y dispositivos de visualización de imágenes.

- **Detectar obstáculos derecha e izquierda**

Con esta función, a través de sensores ubicados en la silla de ruedas, el sistema podrá medir la profundidad de posibles obstáculos que se puedan presentar en el trayecto de la silla de ruedas que será controlada mediante la interfaz remota. Para ello se consideran sensores de ultrasonido o infrarrojos que estarán ubicados en el lado derecho e izquierdo de la silla de ruedas. En la Tabla 3.8 se presentan las principales ventajas y desventajas de ambos sensores.

Tabla 3.8. Ventajas y desventajas de los sensores de ultrasonido e infrarrojos.

	Sensor de ultrasonido <sup>41</sup>	Sensor infrarrojo <sup>42</sup>
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fácil de interactuar</li> <li>- Aplicación en robótica</li> <li>- Miden la distancia de un objeto</li> <li>- Lectura con precisión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Detecta la presencia de un objeto</li> <li>- Aplicaciones en seguimiento de líneas y evasión para robots móviles</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No diferencia tamaños de objetos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No mide la distancia de un objeto</li> </ul>

### 3.3.3.4 Funciones y medios de Interfaz Manual + Interfaz Remota

En esta función se determinan las funciones para accionar los estados del sistema, la comunicación con la interfaz remota, el control de la interfaz manual y la indicación del nivel de carga de la batería de la silla de ruedas.

<sup>41</sup> Ventajas y desventajas del sensor ultrasónico: <https://www.bjultrasonic.com/es/ultrasonic-transducers-and-ultrasonic-sensors/>. Fecha de consulta: octubre 2021.

<sup>42</sup> Sensor IR vs. Sensor ultrasónico: ¿Cuál es la diferencia?: <https://descubrearduino.com/sensor-ir-vs-sensor-ultrasonico/>. Fecha de consulta: octubre 2021.

- **Accionar estados de máquina**

Esta función le permite al usuario interactuar con la silla de ruedas, de tal manera que pueda encender, apagar y modificar la velocidad de la silla de ruedas desde la propia silla. Para realizar esta interacción se proponen botones o interruptores. A través de la pulsación de los botones se permite un flujo de corriente eléctrica que envía una señal digital al controlador para accionar una función (encender / apagar / frenar / subir o bajar velocidad). Los interruptores tienen un principio de funcionamiento similar a los botones, con la diferencia que los interruptores mantienen el flujo de corriente hasta que se accione otro interruptor que corte ese flujo.

- **Comunicar interfaz remota**

La comunicación remota con la silla de ruedas necesita de una tecnología que la conecte con un dispositivo móvil. Para ello se propone utilizar un módulo WiFi que utiliza una red inalámbrica de banda ancha con un alcance máximo de 15 a 45 metros en interiores según la frecuencia de la señal (5GHz y 2.4 GHz)<sup>43</sup>. Como desventaja tiene menor velocidad comparada con la conexión por cable, ya que constantemente está expuesta a pérdidas de señal. Otro caso es el módulo bluetooth que permite la transmisión de datos entre dispositivos mediante un enlace de radiofrecuencia en la banda ISM<sup>44</sup> de los 2.4 GHz. La ventaja es que tiene altas velocidades de conexión y es un servicio gratuito; sin embargo, el bluetooth tiene un reducido alcance de conexión<sup>45</sup>.

- **Establecer comunicación remota.**

A través de esta función se establece la comunicación remota para controlar la silla de ruedas. Se puede controlar mediante una aplicación móvil que funciona con conexión bluetooth y WiFi. Otra opción es la aplicación web, que solo funciona con conexión a módulo WiFi. Dentro de cada aplicación se podrá conocer la información de los

---

<sup>43</sup> ¿Cuál es el rango de alcance medio de una red Wi-Fi?: <https://elandroidefeliz.com/rango-de-alcance-medio-de-una-red-wi-fi/>. Fecha de consulta: octubre 2021.

<sup>44</sup> ISM: *Industrial, Scientific and Medical*. Bandas de radio reservadas internacionales para fines industriales, científicas y médicas.

<sup>45</sup> Ficha 3: Ventajas y desventajas del bluetooth: <https://lenguamaternaone.home.blog/2019/04/02/ficha-3-ventajas-y-desventajas-del-bluetooth/>. Fecha de consulta: octubre 2021.

parámetros de la silla de ruedas, ya sea la velocidad, el nivel de carga de la batería y el control remoto cuando se active.

- **Recibir instrucción de control manual**

Con esta función se escoge el medio que le permitirá al usuario operario maniobrar y controlar la silla de ruedas. El componente manual debe ser cómodo y fácil de maniobrar, por eso se selecciona como opción un joystick, que es una palanca que gira sobre su eje, y mediante su ángulo o posición direcciona al sistema. Otra alternativa son los pulsadores de dirección, los cuáles al mantenerse presionados, la silla de ruedas sigue la dirección seleccionada. Se considera entre ambas opciones que el joystick es una interfaz manual más accesible para el niño, ya que brinda seguridad de control en la conducción, así como un agarre más intuitivo para direccionar la silla<sup>46</sup>.

- **Indicar nivel de carga de batería**

Esta función le permite al usuario conocer el nivel de carga que tiene la batería del sistema. Para ello se propone utilizar un módulo indicador de nivel de carga de batería, el cual es un sensor que se conecta directamente a la batería y es de precio económico<sup>47</sup>.

### 3.3.4 Selección de propuesta de solución óptima del nivel 3

Según las funciones identificadas y las alternativas mencionadas se determinaron, siguiendo la metodología de diseño propuesta en este trabajo, cinco posibles soluciones (Ver Anexo C). La propuesta de solución óptima seleccionada para realizar las funciones y subfunciones de la silla de ruedas es la que considera 2 motores brushless para propulsar las ruedas neumáticas, controlado mediante un microcontrolador. Además, se considera un resorte helicoidal que estará ubicado sobre la estructura tubular de la silla para soportar al usuario paciente. Para el freno de la silla de ruedas se considera un sistema de frenado de disco y una rueda trasera para evitar vuelcos. Asimismo, para medir la velocidad de los motores de propulsión, se

---

<sup>46</sup> Las ventajas de la palanca de mando: <https://www.consejosytrucos.net/noticias-411270/las-ventajas-de-la-palanca-de-mando/>. Fecha de consulta: octubre 2021.

<sup>47</sup> Módulo Indicador Carga de Batería de Litio: [https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-634170171-modulo-indicador-carga-de-bateria-de-litio-3s-99v-126v-\\_JM#position=1&search\\_layout=stack&type=item&tracking\\_id=02718053-dbc5-4e1f-984c-3bc19e8848e2](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-634170171-modulo-indicador-carga-de-bateria-de-litio-3s-99v-126v-_JM#position=1&search_layout=stack&type=item&tracking_id=02718053-dbc5-4e1f-984c-3bc19e8848e2). Fecha de consulta: octubre 2021.

utilizarán encoders ópticos en cada uno. Como interfaz manual se considera un joystick para controlar la dirección y se accionarán los estados del sistema a través de botones. Para la interfaz remota se considera que la silla será controlada vía comunicación WiFi a través de una aplicación móvil. También, se utilizan sensores de ultrasonido ubicados en ambos lados de la silla, los cuales podrán detectar la proximidad de obstáculos de mayor alcance. Para que el usuario pueda realizar sus necesidades higiénicas con mayor facilidad se considera un asiento extraíble. Por último, el usuario podrá tener acceso a la información del nivel de la batería con un módulo de nivel de carga de la batería.

### 3.3.4 Nivel 4

En este nivel se determinan los componentes correspondientes para que se accione el frenado del sistema con la detención de las ruedas por fricción.

- **Accionar freno de la rueda derecha e izquierda**

Esta función permite accionar el sistema de freno por disco para detener la silla de ruedas. Para ello se presentan como alternativas un disco hidráulico y un disco mecánico. En la Tabla 3.9 se presentan las principales ventajas y desventajas de ambos discos.

Tabla 3.9. Ventajas y desventajas de discos hidráulicos y mecánicos.

	Disco hidráulico <sup>48</sup>	Disco mecánico <sup>48</sup>
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mejor rendimiento</li> <li>- Mayor control de frenado</li> <li>- Frenado fuerte y constante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Más comerciales</li> <li>- Cable de freno</li> <li>- Más económico</li> <li>- Sencillo de instalar</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requiere mayor mantenimiento</li> <li>- Más caro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fricción en los cables</li> </ul>

<sup>48</sup> Guía Técnica: Frenos de scooter eléctrico: <https://eciclos.cl/blogs/news/guia-tecnica-frenos-scooter-electrico>. Fecha de consulta: noviembre 2021.

- **Detener ruedas por fricción**

Esta función permite el contacto directo de presión en la rueda para su detención por fricción. Para ello se seleccionan pastillas de frenado que, accionadas por el motor, presionaran el disco de la rueda hasta su detención.

### 3.3.5 Subsistemas del Sistema Mecatrónico

A continuación, se presenta la lista de componentes obtenidos tras la descomposición de funciones y síntesis de medios, clasificados según la estructura del sistema mecatrónico, lo que se muestra en la Figura 3.2.

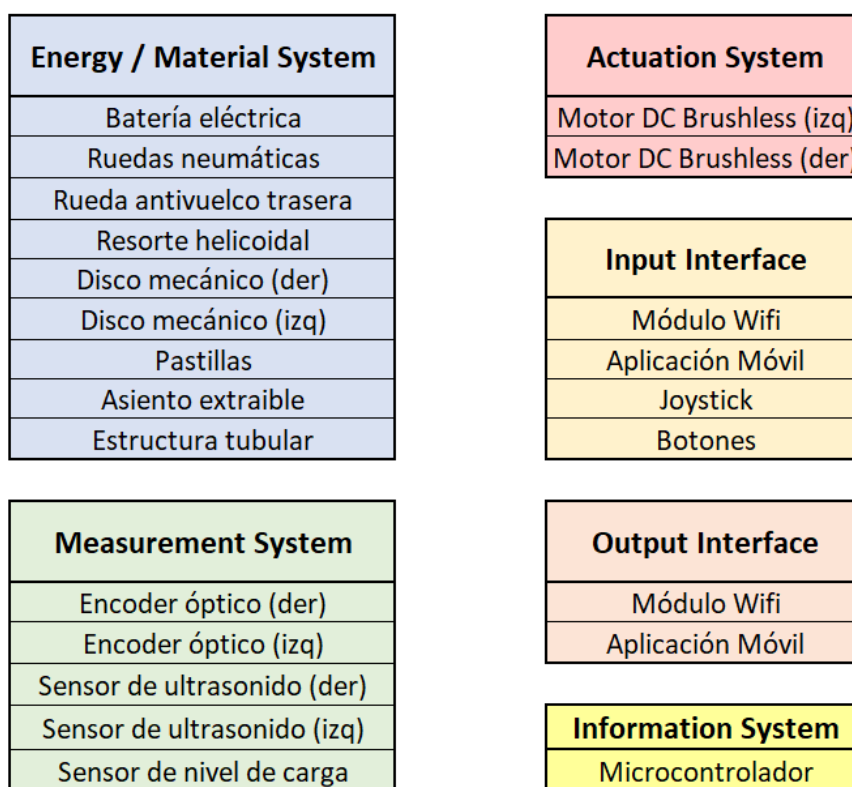


Fig. 3.2. Estructura del Sistema Mecatrónico.

### 3.4 Arquitectura del Sistema Mecatrónico

En base a los componentes seleccionados para realizar las funciones y subfunciones de la silla de ruedas, se realiza la distribución de la arquitectura de sistema mecatrónico, como se ve en la Figura 3.3.

Las interfaces de entrada reciben señales externas como energía eléctrica para su alimentación, datos provenientes de la aplicación móvil (nivel de batería, conexión WiFi y velocidad) para el control remoto a través del Módulo WiFi, y señales externas emitidas a los botones (On/Off, freno, subir/bajar velocidad, emergencia) y al joystick para el control manual de la silla de ruedas. Las interfaces de salidas como los leds (On/Off, emergencia, 5 velocidades) estarán posicionados en el módulo del joystick. Estas interfaces indicarán al usuario la información necesaria y estados del sistema a través de la aplicación móvil y las luces emitidas en el módulo de control manual.

El sistema de medición recibirá señales externas del entorno y proximidad de obstáculos para el caso de los sensores de ultrasonido, señales de giro de los motores para el caso de los encoders ubicados en cada motor. El módulo de nivel de carga de batería recibirá la señal de carga directamente del módulo de energía, es decir, la batería eléctrica. Estos datos recopilados y los de la interfaz de entrada son recibidos por el sistema de información, es decir, el microcontrolador. Según los datos recibidos, el microcontrolador proveerá instrucciones a la interfaz de salida y al sistema de actuación conformado por los motores brushless de desplazamiento.

El módulo de energía, a través de las baterías eléctricas, energizará a todos los subsistemas para el funcionamiento del sistema. Dentro del sistema de materia, la estructura tubular de la silla será el soporte mecánico de todo el sistema. Sobre este se acoplarán las ruedas antivuelco para la estabilidad, las ruedas neumáticas para el desplazamiento, y el resorte helicoidal para amortiguar las vibraciones. Las ruedas neumáticas son accionadas por los motores brushless, y las pastillas presionarán el disco de estas ruedas mediante la tensión recibida desde el joystick.

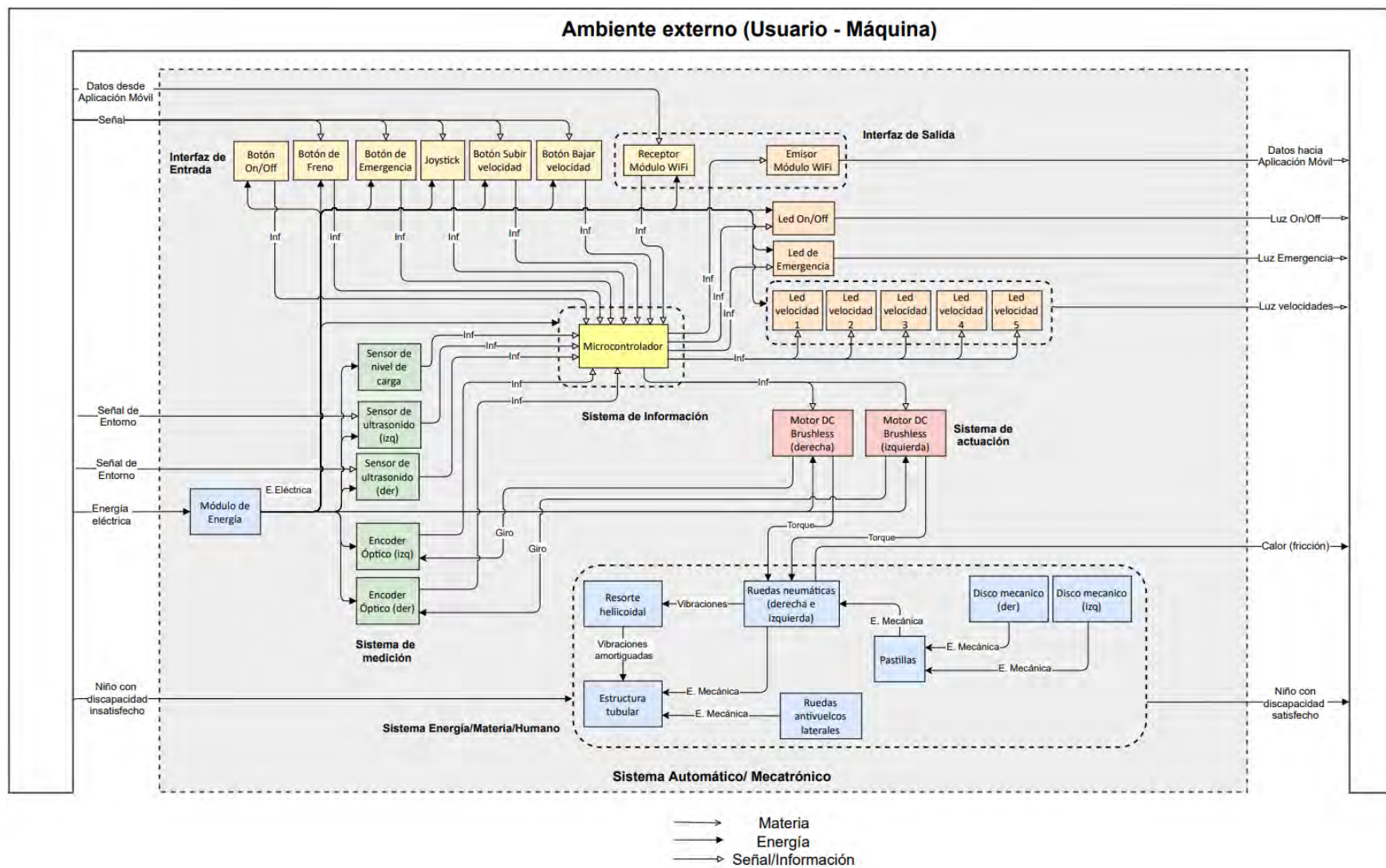


Fig. 3.3. Arquitectura del Sistema Mecatrónico.



### 3.5 Arquitectura del Dominio Eléctrico y Electrónico

En base a la arquitectura mecatrónica se realiza la arquitectura del dominio eléctrico/electrónico que se muestra en la Figura 3.4, en la cual se representan las conexiones de información y suministro de energía eléctrica de corriente alterna (AC) y corriente continua (DC) de los componentes del sistema mecatrónico. Para ello, se clasifican los componentes en los subsistemas mecatrónicos vistos anteriormente.

La energización de todo el sistema mecatrónico será proporcionada por la batería eléctrica que transmite energía eléctrica DC, la cual requerirá un convertidor de corriente continua a corriente continua (DC/DC) para la correcta alimentación de los componentes de los sistemas de medición, información e interfaces de entrada y salida. Para la energización de los motores, esta se realizará desde la batería eléctrica a través de los controladores de motor que funcionan como amplificadores de corriente para cada motor, de tal manera que permita un mejor control del sistema de actuación. Además, la carga de la batería eléctrica se realizará a través de un conversor de corriente alterna a corriente continua (AC/DC) que requiere una entrada de 220 voltios de corriente alterna.

El microcontrolador recibirá señales de información de los sensores de medición y las interfaces de entrada, para enviar las respectivas instrucciones a los actuadores y a las interfaces de salida. Dentro de las interfaces de entrada, se considera adicionalmente a los tipos de botones necesarios para accionar correctamente los estados y funciones de la silla de ruedas, los cuales son: botón On/Off (encendido o apagado), botón de freno, botón de emergencia y botón para subir o bajar la velocidad. Para la interfaz de salida se consideran adicionalmente luces indicadoras (leds) para avisar al usuario los correctos estados del sistema, estos son: led On/Off, led de emergencia y leds de velocidades.

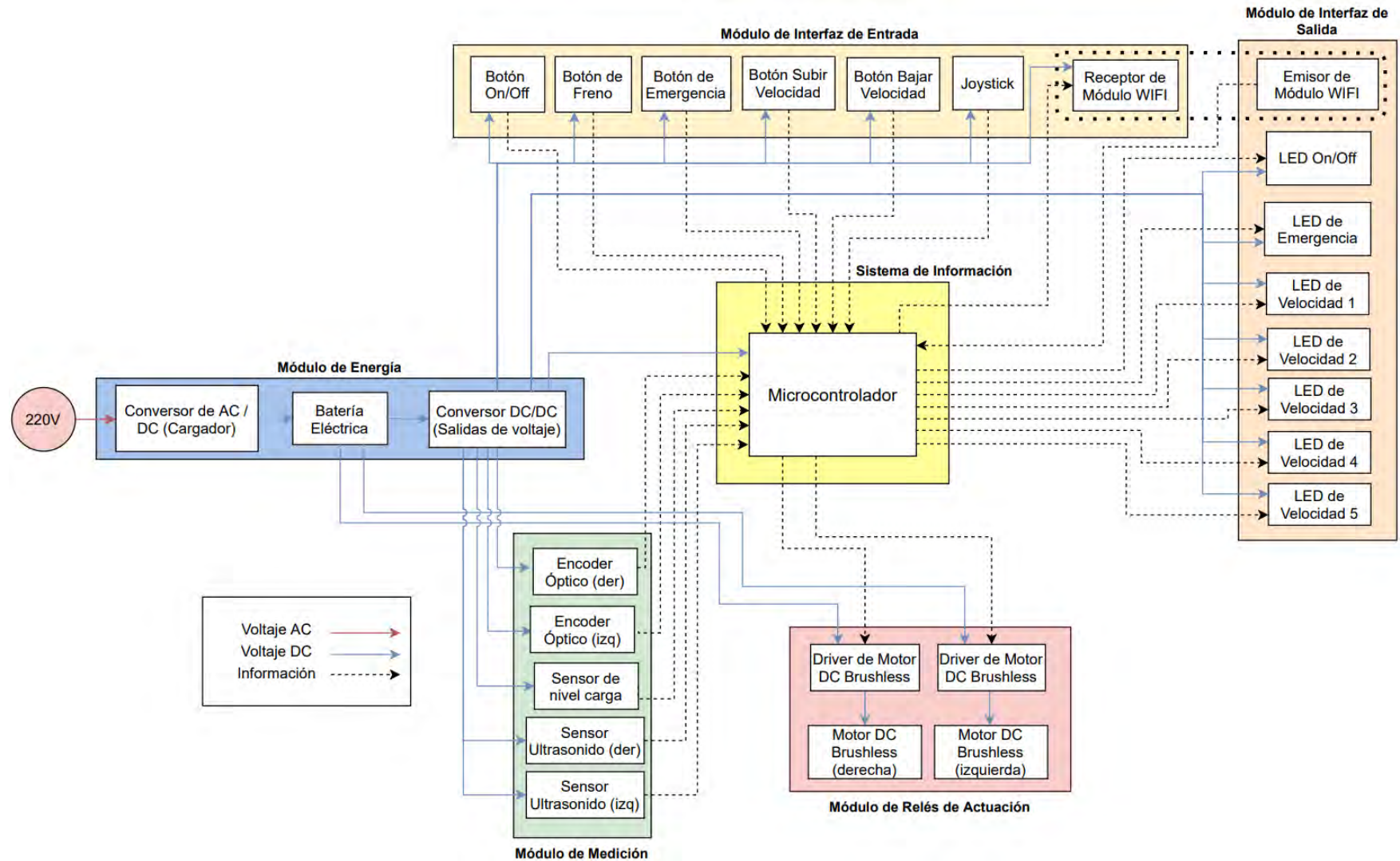


Fig. 3.4. Arquitectura del Dominio Eléctrico/Electrónico

### 3.6 Bosquejo Técnico

En la Figura 3.5 se presenta el bosquejo general de la silla de ruedas para niños con discapacidad física motriz. Además, se presenta la ubicación del módulo del joystick en la zona derecha de la silla, sin embargo, este también puede ubicarse en la zona izquierda, según sea la preferencia del usuario. El reposabrazos es abatible para que el asistente del niño también pueda controlar la silla de ser necesario, de esta manera el módulo del joystick pasaría a una posición vertical y el asistente pueda controlar la silla con mayor comodidad. También, el reposapiés y el reposabrazos pueden ser regulables según la comodidad del niño. Por último, en la parte frontal de la silla se presenta la ubicación de los sensores de ultrasonido, los que están acoplados con una abrazadera en cada extremo de la propia silla de ruedas.

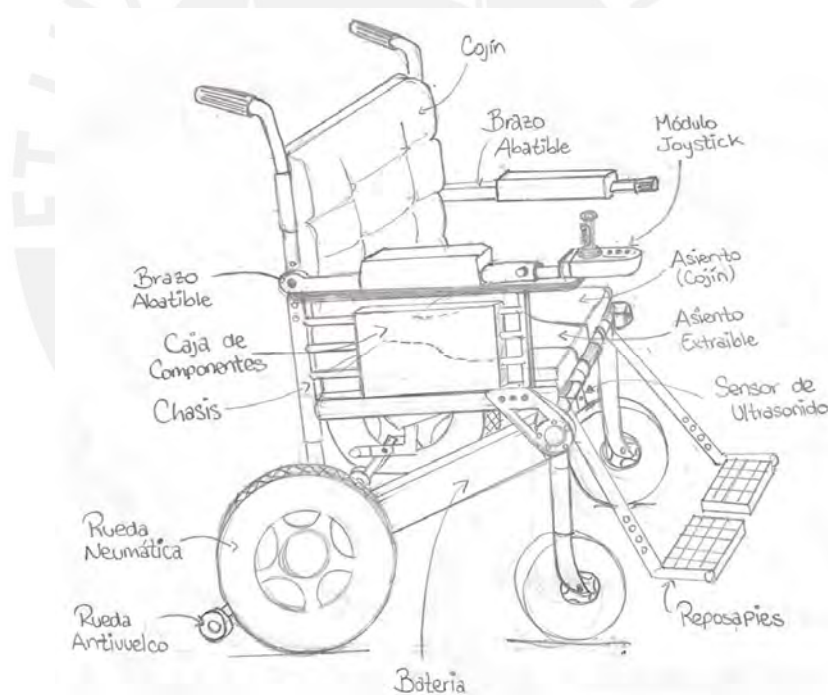


Fig. 3.5. Vista general de la silla de ruedas.

Los componentes electrónicos, como el módulo Wifi, el microcontrolador y el convertor de corriente continua a continua (DC/DC), estarán ubicados en una caja compacta para reducir espacio. Esta caja se colocará en la parte lateral derecha de la silla de ruedas, entre el reposabrazos y el asiento, para que el espacio inferior de la silla se encuentre vacío, y así la silla de ruedas pueda posicionarse sobre un inodoro. En la Figura 3.6 se muestra la caja de componentes electrónicos.

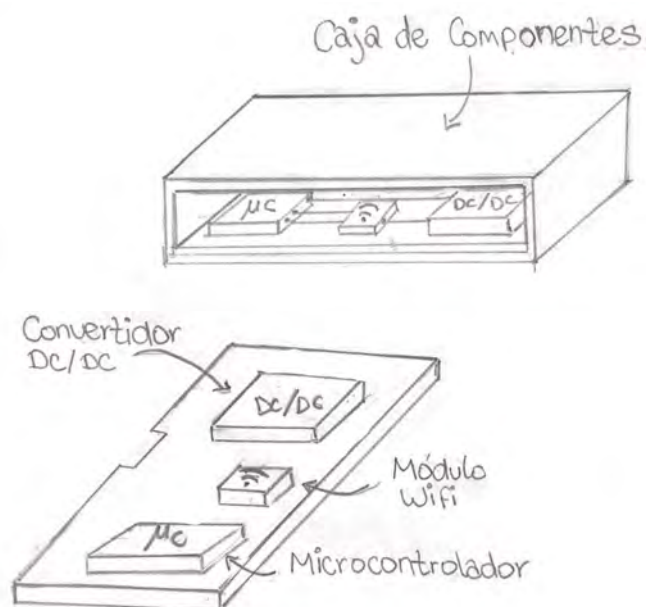


Fig. 3.6. Caja de componentes electrónicos.

En la Figura 3.7 se muestra la vista posterior de la silla de ruedas, donde se puede observar la ubicación de los motores incorporados a las ruedas neumáticas traseras de la silla. Además, se puede observar la ubicación de los brazos abatibles y las ruedas antivuelco ubicados al mismo nivel del chasis lateral de la silla.

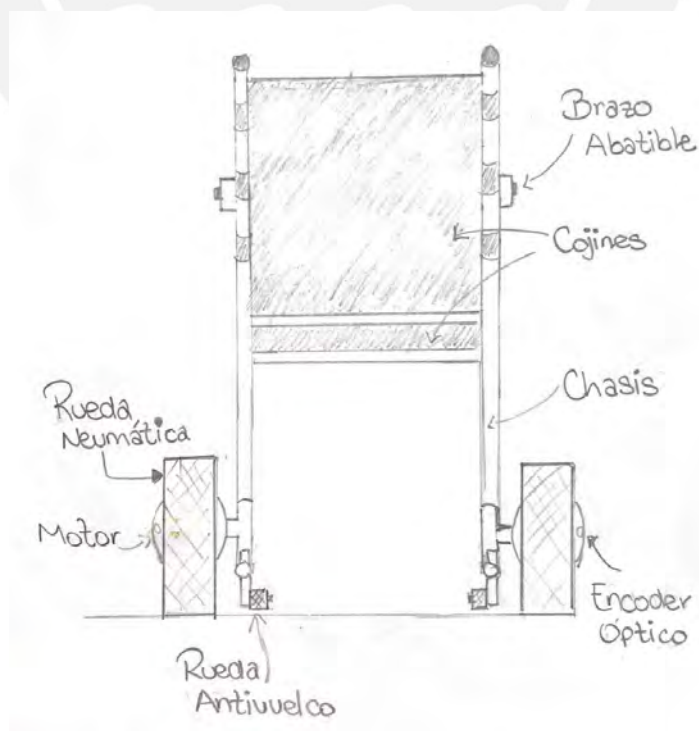


Fig. 3.7. Vista trasera de la silla de ruedas.

En la Figura 3.8 se presenta el módulo del joystick, el cual contiene los leds y los botones On/Off, subir/bajar velocidad y de emergencia. Además, se presenta un tubo ranurado que permitirá regular la distancia del módulo del joystick para un mejor agarre y control de la silla de ruedas. Este tubo ranurado se podrá introducir y ajustar en el reposabrazos del lado izquierdo o derecho de la silla, según sea la preferencia del usuario.

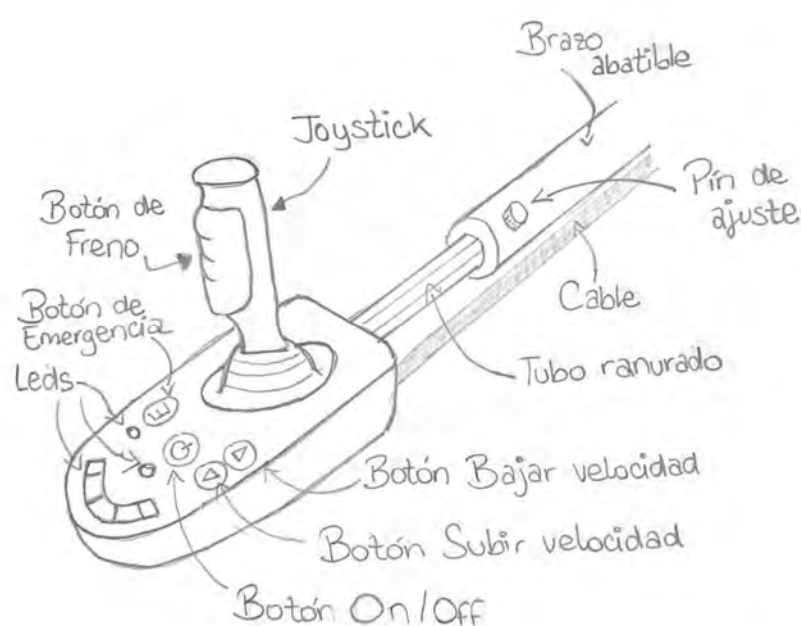
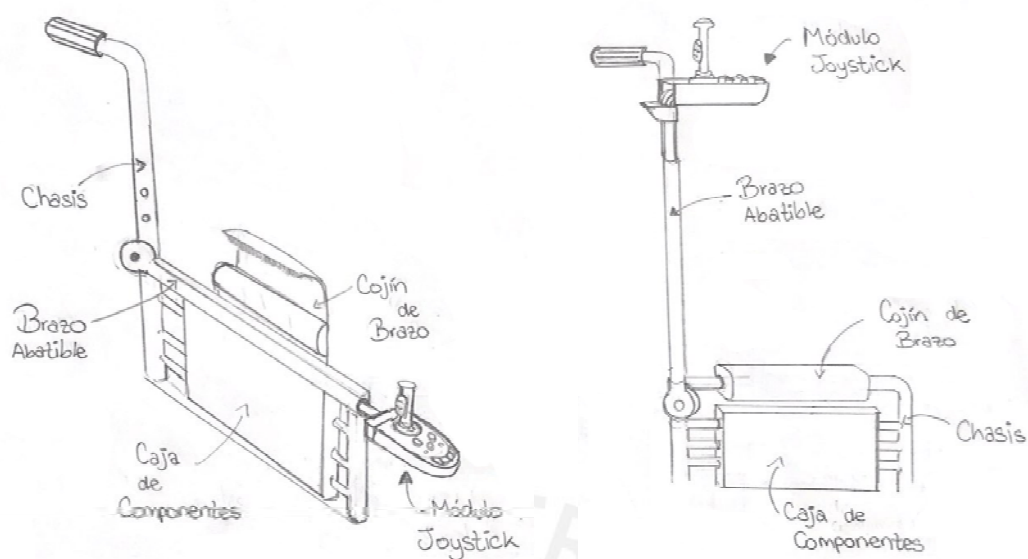


Fig. 3.8. Módulo de joystick.

En la Figura 3.9 se presenta el brazo abatible en posición horizontal para la conducción de la silla por parte del usuario paciente, y en posición vertical para la conducción de la silla por parte del asistente del usuario. En la posición horizontal el brazo abatible se encuentra al costado del tubo del chasis que contiene el cojín donde se apoyará el usuario paciente. Este cojín se enrolla de manera fija sobre el tubo del chasis y el brazo abatible.



(a) Posición horizontal.

(b) Posición vertical.

Fig. 3.9. Brazo abatible.

En la posición vertical el módulo joystick se encuentra en la parte superior de la silla de ruedas para que el asistente pueda conducirla de manera cómoda. En este caso, el tubo queda fijo en su posición inicial y el cojín solo se envuelve en este para que el usuario paciente pueda apoyarse mientras el asistente conduce la silla de ruedas.

La estabilidad de la silla ante volcaduras se debe a los módulos de ruedas antivuelcos laterales ubicados en las barras horizontales del chasis de la silla de ruedas. Se podrá regular la posición de estos módulos según el tipo de elevación que se desee alcanzar. Además, la rueda antivuelco (Figura 3.10) en su posición inicial se encuentra suspendida del suelo hasta que se realice la inclinación de la silla, justamente para permitir el soporte y estabilidad cuando sea necesario como, por ejemplo, subir veredas.

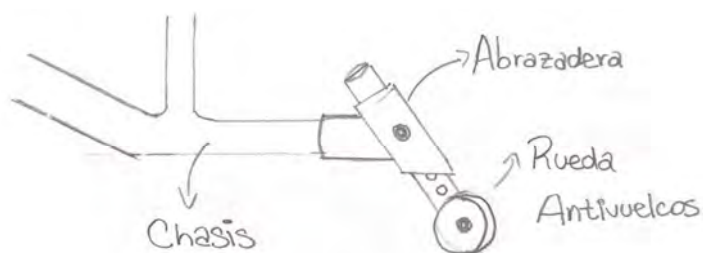


Fig. 3.10. Rueda antivuelco lateral.

### **3.7 Diagrama de operaciones**

A continuación, se presentan los diagramas de operaciones de la silla de ruedas, según la perspectiva del usuario y del propio sistema. Además, se presentan los diagramas de interrupciones para el control de la velocidad, encendido/apagado del sistema, emergencia y frenado, los cuales intervienen como tarea primordial en el funcionamiento general del sistema cada vez que se accionen por medio de los botones de la interfaz de entrada.

#### **3.7.1 Perspectiva de usuario**

Desde la perspectiva del usuario operador, primero se debe encender la batería de la silla de ruedas y decidir el tipo de conducción que realizará, es decir, manual o remota.

En primer lugar, la conducción manual requiere encender la silla de ruedas por medio del botón ubicado en el módulo del joystick. Posteriormente, el usuario puede configurar la velocidad constante con la que desea desplazarse, o continuar con la velocidad establecida anteriormente. Después, el usuario podrá hacer uso del mando de control joystick y desplazar la silla de ruedas. Finalmente, cuando el usuario desee desacelerar o detener la silla de ruedas, debe presionar el botón de freno.

La conducción remota de la silla de ruedas se realiza desde la aplicación móvil, estableciendo primero la comunicación con la silla de ruedas. Dentro de la aplicación se tiene la opción de controlar la silla de manera remota donde también se puede configurar la velocidad de la silla y accionar el freno.

Cuando se descargue la batería, el usuario deberá apagarla y realizar la recarga respectiva sin mover la batería de su posición. Además, cuando se perciba una situación de emergencia, el usuario deberá presionar el botón de emergencia para detener el sistema por completo. En la Figura 3.11 se presenta el diagrama de operaciones general según la perspectiva del usuario.



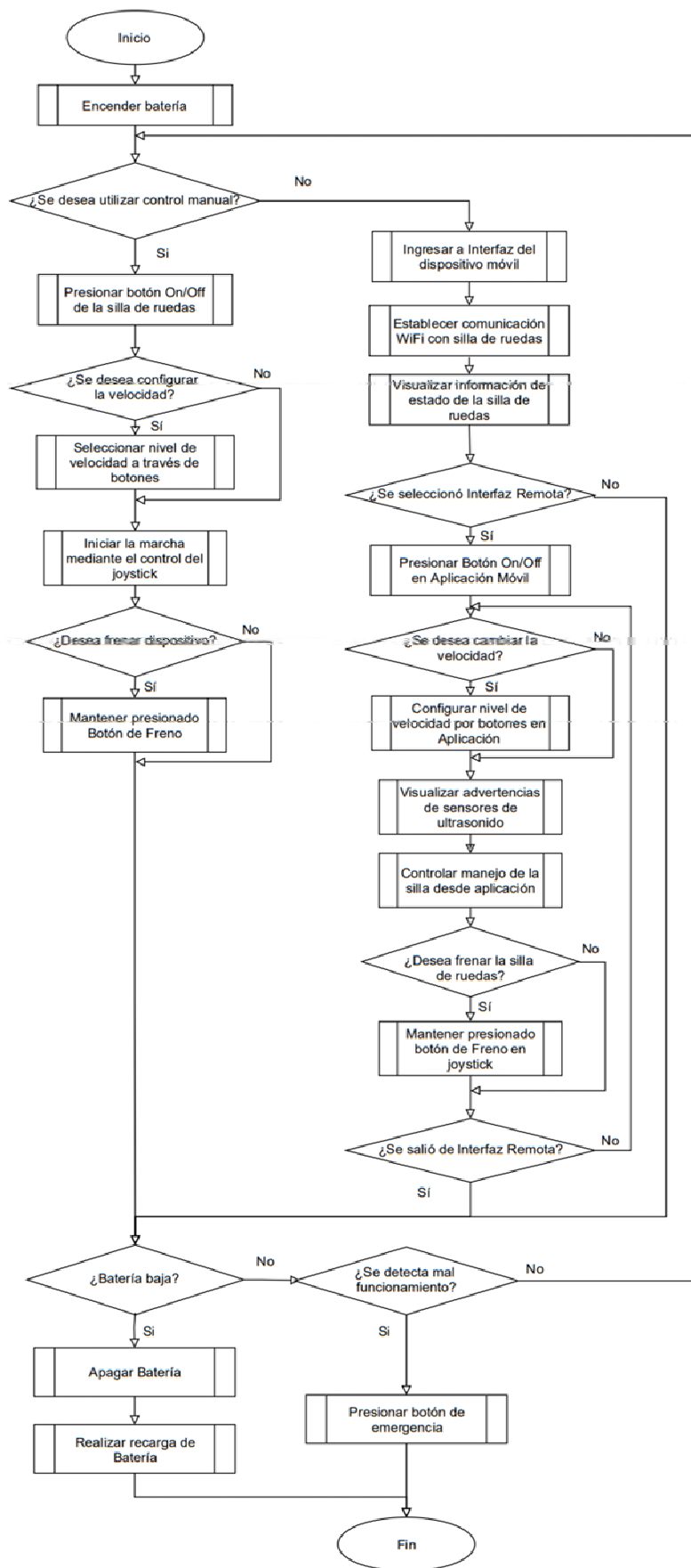


Fig. 3.11. Diagrama de operaciones según la perspectiva del usuario.



### **3.7.2 Perspectiva del sistema**

Según la perspectiva del sistema, cuando se presione el botón On/Off en la silla de ruedas, se encenderá el Led On/Off en el módulo del joystick. Seguidamente, cuando el sistema detecte la señal del joystick, el microcontrolador enviará señales de instrucción a los motores brushless para la conducción. Además, cuando se presionen los botones de subir/bajar velocidad, se encenderán los indicadores de luz para indicar al usuario la velocidad configurada.

En el control remoto de la silla de ruedas, se encenderá el Led On/Off cuando se encienda la silla de ruedas desde la aplicación móvil. Posteriormente, cuando se reciba una señal de acción por medio del módulo de Wifi, el microcontrolador enviará señales de acción a los motores brushless. Por último, cuando se salga de la aplicación, se termina la conexión con la silla de ruedas. En la Figura 3.12 se presenta el diagrama de operaciones general según la perspectiva del sistema.

### **3.7.3 Interrupción de Botón On/Off**

El botón On/Off permite encender y apagar el sistema en cualquier momento. Para ello se realiza una interrupción mediante la cual se preguntará si el indicador del estado del sistema está encendido, es decir el Led On/Off. En este caso, el sistema esperará hasta que se presione el botón On/Off para apagar el sistema. Caso contrario, el sistema esperará hasta que el Led On/Off se encienda.

En la Figura 3.13 se presenta el diagrama de interrupción del botón On/Off.

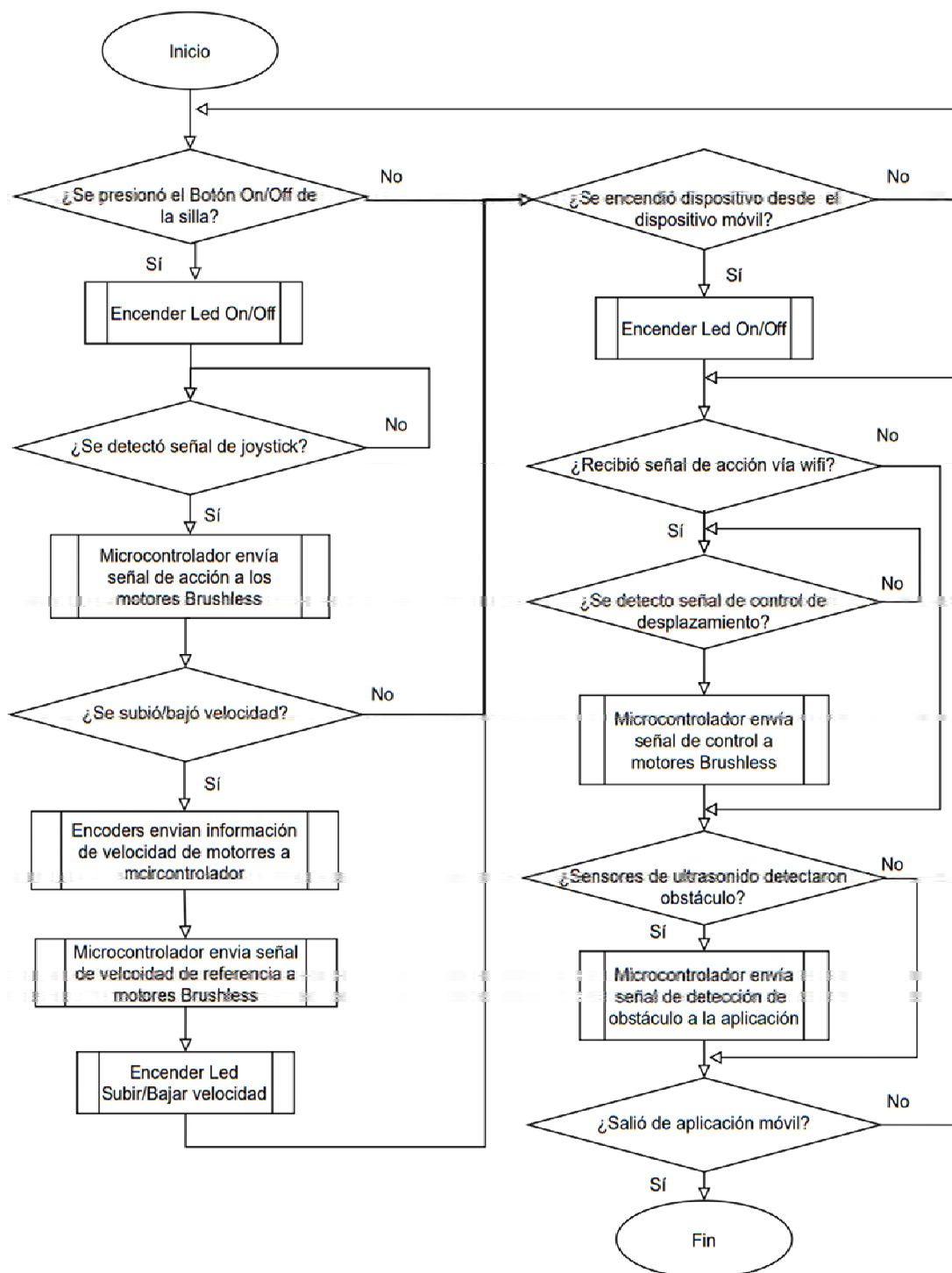


Fig. 3.12. Diagrama de operaciones según la perspectiva del sistema.

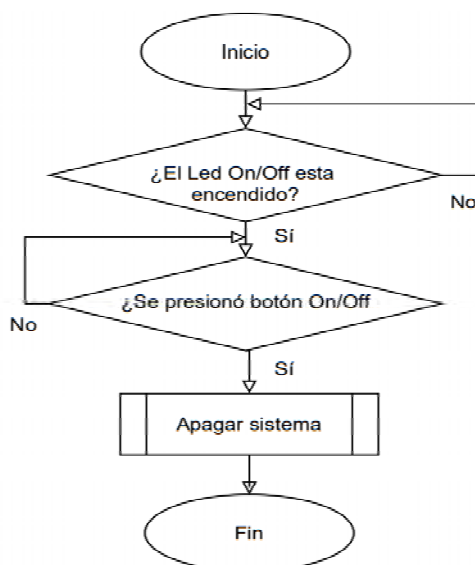


Fig. 3.13. Diagrama de interrupción del botón On/Off.

### 3.7.4 Interrupción de frenado

El sistema de frenado permite desacelerar y detener la conducción de la silla de ruedas en cualquier momento mientras se presione el botón de frenado. Para ello se desarrolla una interrupción que primero preguntará si se presionó el botón de freno. En este caso, el microcontrolador activará los motores brushed para que accionen el sistema de frenado eléctrico. El sistema esperará a que el usuario suelte el botón de freno para que el microcontrolador desactive al motor brushed, y así el usuario pueda continuar con la conducción. En la Figura 3.14 se presenta el diagrama de interrupción del frenado.

### 3.7.5 Interrupción de Botón de Emergencia

En el caso de una emergencia se utiliza un botón de frenado para detener el sistema. Para ello se realiza una interrupción que apaga el sistema en cualquier momento. Primero, el sistema preguntará si el indicador del estado de la silla de ruedas, Led On/Off, está encendido. En ese caso, el sistema esperará hasta que se presione el botón de emergencia para apagar el sistema, es decir, desenergizar los motores brushless y brushed. Esto se puede visualizar a través del Led de emergencia, mientras se esté presionado el botón de emergencia. Cuando se suelte el botón, el led también se apaga. En la Figura 3.15 se presenta el diagrama de interrupción del botón de emergencia.

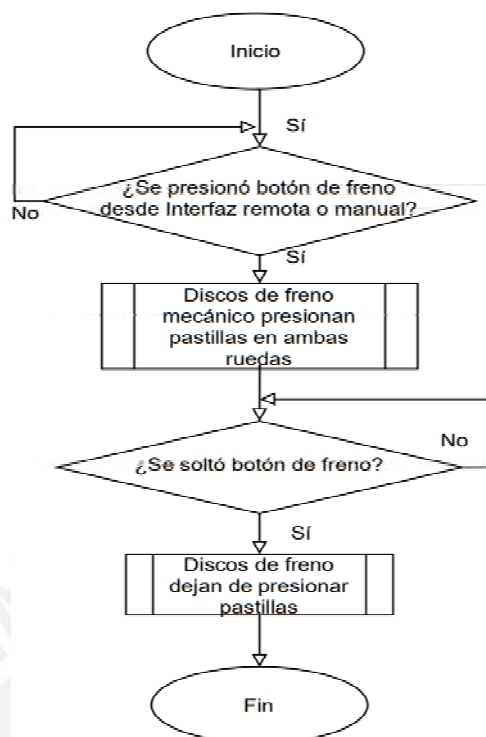


Fig. 3.14. Diagrama de interrupción de frenado.

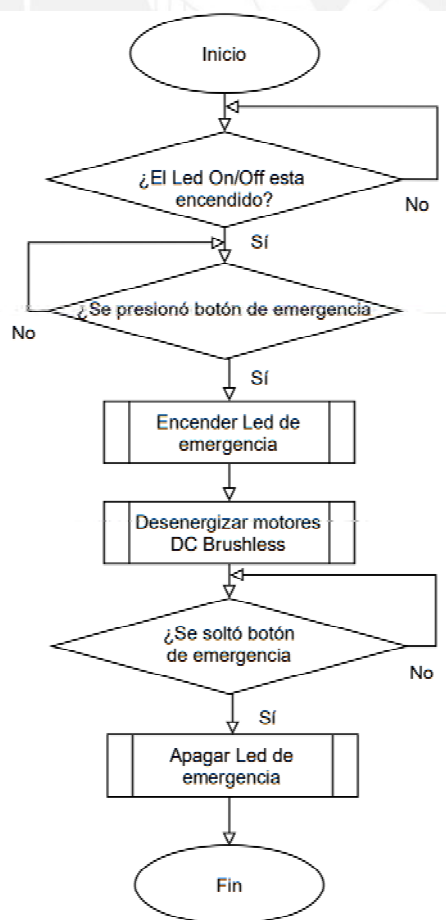


Fig. 3.15. Diagrama de interrupción en caso de parada de emergencia.

### 3.7.6 Interrupción de Botón de subir/bajar velocidad

En la configuración de la velocidad se realiza una interrupción que permite subir o bajar la velocidad del sistema en cualquier momento mientras el dispositivo esté en funcionamiento. Para ello, primero el dispositivo esperará que se presione el botón de subir o bajar velocidad. De ser ese el caso, entonces el microcontrolador enviará una señal a los motores brushless para modificar la velocidad. En la Figura 3.16 se presenta el diagrama de interrupción de la configuración de la velocidad.

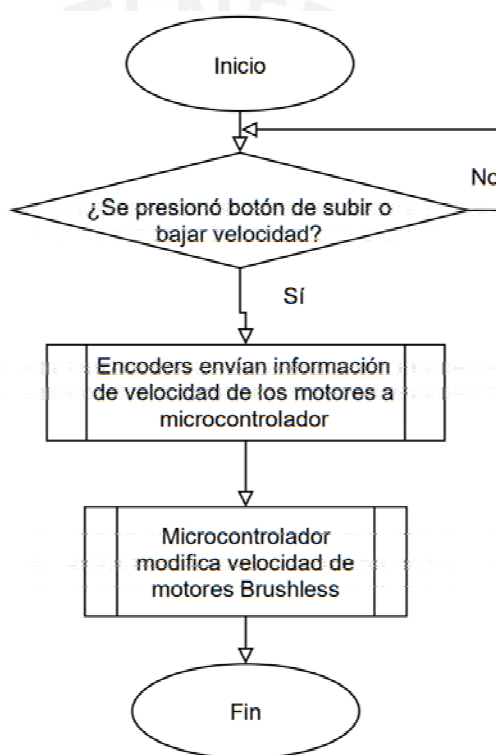


Fig. 3.16. Diagrama de interrupción de la velocidad.

## CONCLUSIONES

- A través de la problemática planteada, en el marco teórico se identificaron las principales enfermedades y principales problemas que afrontan los niños con discapacidad física motriz en la calle, la escuela y en el hogar, como acceso a servicios higiénicos y traslado por rampas.
- En el estado del arte se analizó los productos comerciales, las patentes y literaturas existentes con el fin de identificar sus ventajas y desventajas, para posteriormente proporcionar la información necesaria para identificar los requerimientos del usuario y determinar los requisitos del proyecto.
- En base a los requerimientos del usuario y a los requisitos del proyecto se identificaron dos funciones importantes en el diseño de la silla de ruedas para niños con discapacidad física motriz, las cuales son transportar al niño en la silla de ruedas y facilitar la operación de sus necesidades higiénicas.
- Con el uso de la Metodología de Diseño Mecatrónico UFSC-PUCP se identificó las subfunciones y componentes necesarios para realizar correctamente el traslado del niño en silla de ruedas y determinar su solución óptima de diseño.
- Se logró realizar el diseño conceptual de la silla de ruedas teleoperada para niños con discapacidad física motriz, de tal manera que les facilite realizar sus necesidades higiénicas por medio de un asiento extraíble. Además, la conducción de la silla de ruedas manual por medio del joystick es apta para niños diestros y zurdos. También, el diseño permite que el asistente pueda realizar la conducción de la silla gracias a la abatibilidad del reposabrazos. Se le brinda, incluso, la facilidad de controlar la silla de ruedas por medio de un dispositivo móvil.
- La integración de los componentes seleccionados de la solución óptima se presentó a través de la arquitectura mecatrónica y en el dominio eléctrico/electrónico, donde se presenta las señales de información, energía y materia entre los componentes.
- Se presentó un bosquejo técnico que permite observar de forma física un primer esbozo de la solución óptima a la problemática planteada, de tal manera que se presenta la silla de ruedas eléctrica a mayor detalle. Este bosquejo muestra la ubicación de los componentes de cada subsistema mecatrónico y su interacción para el correcto funcionamiento de la silla de ruedas.

- Se realizó un diagrama de operaciones general del funcionamiento del sistema desde la perspectiva del usuario y del propio sistema para un mejor entendimiento de la lógica y secuencia de operaciones que realiza la silla de ruedas. A través de este diagrama se presenta la interacción de los subsistemas mecatrónicos en base a la información brindada por el usuario.
- El diseño conceptual propuesto permite la interacción de los sistemas mecatrónicos como sistema, para brindar una buena interacción entre la silla de ruedas y el niño, y, por ende, mayor autonomía para que el niño realice sus actividades cotidianas.



## BIBLIOGRAFÍA

- [AMADO, 2020] Amado, D. Gonzales, J. Rivera, C. Rodríguez, C. (2020). “Fabricación y comercialización de sillas de ruedas a base de bambusae”. Tesis para optar el grado de Bachiller, Universidad San Ignacio de Loyola. [Online] [http://repositorio.usil.edu.pe/bitstream/USIL/10331/1/2020\\_Amado%20Lo%20arte.pdf](http://repositorio.usil.edu.pe/bitstream/USIL/10331/1/2020_Amado%20Lo%20arte.pdf)
- [BRAVO, 2017] Bravo Anlas, G. (2017). “Diseño Mecatrónico y simulación de una silla de ruedas multifuncional para niños entre 6 a 12 años”. Tesis para optar el grado de Magister en Ingeniería Mecatrónica, Pontificia Universidad Católica del Perú. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/196534206.pdf>
- [CONADIS, 2011] Ley General de la Persona con Discapacidad – Ley N°.27050. Consejo Nacional para Integración de la Persona con Discapacidad (CONADIS), Ministerio de la Mujer y Desarrollo Social (MIMDES). Recuperado de: <https://silo.tips/download/ley-general-de-la-persona-con-discapacidad>
- [CONADIS, 2021] CONADIS. (2021, 17 agosto). Inscripciones en el Registro Nacional de la Persona con Discapacidad (Julio 2021). OBSERVATORIO NACIONAL DE LA DISCAPACIDAD. <https://www.conadisperu.gob.pe/observatorio/estadisticas/inscripciones-en-el-registro-nacional-de-la-persona-con-discapacidad-julio-2021/>
- [CONCARI, 1999] Concari, S. Pozzo, R. Giorgi, S. (1999). Un estudio sobre el rozamiento en libros de física de nivel universitario. Departamento de Física, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/38990581.pdf>
- [DE NEGRI, 2021] Victor De Negri, Karol Muñoz y Vinicius Vígolo (2021). *Design Methodology for Mechathronic Systems*. Florianópolis.
- [FONDEVILA, s.f.] Fondevila. (s.f.). Capítulo 1: Características del vehículo. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/12852/Mem%C3%B2ria.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [FONTES, 2017] Fontes Ung, C. (2017). Automated walker assisted by a voice electromyography mechanism. European Patent Office. Recuperado de: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/059056982/publication/WO2017105169A1?q=pn%3DWO2017105169A1>
- [GENTE VÁLIDA, s.f.] Gente Válida (s.f.). Silla de ruedas que sube escaleras: Precios y dónde comprarla. Recuperado de: <https://es.validasinbarreras.com/blog/post/silla-de-ruedas-que-sube-escaleras-precios-y-donde-comprarla/>
- [HEINZ, 2017] Heinz, K. (2017), Portable multifunctional electric wheelchair with USN jacks. European Patent Office. Recuperado de [https://lp.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=12&ND=3&adjacent=true&locale=es\\_LP&FT=D&date=19840416&CC=ES&NR=8403717A1&KC=A1](https://lp.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=12&ND=3&adjacent=true&locale=es_LP&FT=D&date=19840416&CC=ES&NR=8403717A1&KC=A1)
- [HUERTA, 2015] Huerta Apastegui, A. (2015). Estudio y modelización del movimiento de la extremidad superior para pacientes en silla de ruedas. Aplicación práctica Hospital Asepeyo (Ingeniería Biomédica). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/81825/TFG.pdf>



- [INEI, 2012] INEI. (2012). Primera Encuesta Nacional Especializada sobre Discapacidad. Recuperado de: [https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1171/ENEDIS%202012%20-%20COMPLETO.pdf](https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1171/ENEDIS%202012%20-%20COMPLETO.pdf)
- [INEI, 2017] INEI. (2017). Perfil Sociodemográfico de la Población con Discapacidad, 2017. Recuperado de: [https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1675/libro.pdf](https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1675/libro.pdf)
- [INEI, 2019] INEI. (2019, marzo). Caracterización de las condiciones de vida de la población con Discapacidad, 2019. Recuperado de: [https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1769/libro.pdf](https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1769/libro.pdf)
- [ISO, 2018] ISO. (2018). ISO 7176-6:2018 Wheelchairs - Part 6: Determination of maximum speed of electrically powered wheelchairs. Recuperado de: <https://www.iso.org/standard/70589.html>
- [KARMA ESPAÑA, KARMA España. (2020, 04 junio). Paraplejia: Causas, tratamientos y cuidado. Blog de Karma. Recuperado de: <https://www.karmamobility.es/2020/06/paraplejia-causas-tratamiento-y-cuidados/>
- [LÉVANO, 2020] Lévano Gonzales, L. J. (2020). Diseño de una silla de ruedas mecatrónica multifuncional para mejorar la accesibilidad de un adulto con paraplejia. Tesis para el Título Profesional de Ingeniero Mecatrónica, Universidad Ricardo Palma, Lima. Recuperado de [https://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/URP/3528/MEC-T030\\_73017940\\_T%20%20%20L%C3%89VANO%20GONZALES%20L%20UIS%20JUNIOR.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/URP/3528/MEC-T030_73017940_T%20%20%20L%C3%89VANO%20GONZALES%20L%20UIS%20JUNIOR.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [LÓPEZ, 2014] López Celi, J. A. (2013 - 2014). Diseño de un prototipo de silla de ruedas eléctrica, con sistema de ascenso y elevación. Tesis para el Título en Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/6420>
- [MALE, 2017] Male, C. Wodon, Q. (2017, 1 diciembre). “Disability gaps in educational attainment and literacy”. The World Bank. Recuperado de: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/396291511988894028/pdf/121762-replacement-PUBLIC-WorldBank-GapsInEdAttainmentLiteracy-Brief-v6.pdf>
- [MAYO CLINIC, s.f.] Mayo Clinic. (s.f.). Espina bífida: Síntomas y causas. Recuperado de: <https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/spina-bifida/diagnosis-treatment/drc-20377865>
- [MINSa, 2017] MINSa. (2017, 30 mayo). Minsa entrega 83 sillas de ruedas a pacientes con discapacidad. Recuperado de: <https://www.gob.pe/institucion/minsa/noticias/13765-minsa-entrega-83-sillas-de-ruedas-a-pacientes-con-discapacidad>
- [MORA, 2014] Mora, J. Salazar, D. (2014). Diseño e implementación de sistema de propulsión y control para silla de ruedas. Proyecto para optar por el Título de Ingeniero Mecatrónico. Facultad de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Tecnológica de Pereira. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/71397882.pdf>

- [MORALES, 2012] Morales, J. Guerra, H. Morales, N. (2012, 7 noviembre). Control de una Silla de Ruedas por Medio de un Dispositivo Móvil con Sistema Operativo Android. Revista Tecnología Digital, 2(1). Recuperado de: [http://www.capacidades.sistemastuxtla.net/pdf/articulos/02\\_004\\_control\\_de\\_una\\_silla\\_de\\_ruedas\\_android.pdf](http://www.capacidades.sistemastuxtla.net/pdf/articulos/02_004_control_de_una_silla_de_ruedas_android.pdf)
- [MORALES, 2017] Morales, J. (2017). Estudio de la dinámica de tracción de un vehículo eléctrico. Facultad de Tecnología, Universidad Tecnológica de Pereira. Recuperado de: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/8533/53111R173.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [MVCS, 2019] Norma Técnica A.120. (2019). “Accesibilidad Universal en Edificaciones” del RNE. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS). Recuperado de: <https://dgadt.vivienda.gob.pe/Uploads/Norma-A120-Accesibilidad-Universal-en-Edificaciones.pdf>
- [NAZATE, 2016] Nazate Acosta, J. G. (2016). Silla de ruedas automatizada para mejorar la orientación de personas con limitaciones físicas en la ciudad del Tulcán. Facultad Sistemas Mercantiles, Universidad Regional Autónoma de los Andes, Tulcán, Ecuador. Recuperado de <https://dspace.uniandes.edu.ec/bitstream/123456789/4602/1/TUTSIS003-2016.pdf>
- [OMS, 2008] OMS. (2008). Pautas para el suministro de sillas de ruedas manuales en entornos de menores recursos. Recuperado de: [https://www.who.int/disabilities/publications/technology/wheelchairguidelines\\_sp\\_finalforweb.pdf](https://www.who.int/disabilities/publications/technology/wheelchairguidelines_sp_finalforweb.pdf)
- [OEC, 2019] OEC. (2019). Perú: Importaciones. The Observatory of Economic Complexity. Recuperado de: <https://oec.world/en/profile/country/per>
- [OMS, 2020] OMS. (2020, 1 diciembre). Discapacidad y salud. Recuperado de: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/disability-and-health>
- [ORTOPEDIA MIMAS, s.f.] Ortopedia Mimas. (s.f.). Sillas de Ruedas Eléctricas Infantiles. Recuperado de: <https://www.ortopediamimas.com/ortopedia-infantil/sillas-de-ruedas-electricas-infantiles.html>
- [ORTOPEDIA MIMAS, s.f.] Ortopedia Mimas. (s.f.). Sillas de Ruedas Manuales Infantiles. Recuperado de: <https://www.ortopediamimas.com/ortopedia-infantil/sillas-de-ruedas-manuales-infantiles.html>
- [PERELMAN, s.f] Perelman, Yakov (s.f.). Física Recreativa V°2. Recuperado de: <https://www.cobachsonora.edu.mx/bibliotecacobach/files/fisicarecreativa.pdf>
- [RPP, 2013] RPP (2013, 19 setiembre). El 15% de la población mundial sufre alguna discapacidad. RPP, Vital. Recuperado de: <https://rpp.pe/vital/salud/el-15-de-la-poblacion-mundial-sufre-alguna-discapacidad-noticia-632392>
- [SALCEDO, 2011] Salcedo, L. Torres, C. Urriolagoitia, G. Romero, B (2011, 4 noviembre). Rediseño para la Optimización de una Silla de Ruedas Eléctrica de Dos Posiciones. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería mecánica y Eléctrica, México. Recuperado de: <http://www.mecamex.net/anterior/cong10/trabajos/art21.pdf>

- [SÁNCHEZ, 2018] Sánchez, D. Medina, M (2018, 21 mayo). La educación inclusiva aporta más a quienes la tienen. World Economic Forum. Recuperado de: <https://es.weforum.org/agenda/2018/05/la-educacion-inclusiva-aporta-mas-a-la-persona-sin-discapacidad-que-a-quienes-la-tienen>
- [SHUKUANG, 1984] Shukuang, J. Hao, W. Housong, Z. (1984), PERFECCIONAMIENTO EN SILLA DE RUEDAS PARA INVÁLIDOS. European Patent Office. Recuperado de: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/060724291/publication/CN107510557A?q=pn%3DCN107510557A>
- [SUNRISE MEDICAL, s.f.] Sunrise Medical. (s.f.). Consideraciones Biomecánicas en la silla de ruedas manual. Recuperado de: <http://biomech.media.mit.edu/wp-content/uploads/sites/9/2013/04/Powered-Ankle-Foot-Prosthesis-for-the-Improvement-of-Amputee-Ambulation.pdf>
- [SUNRISE MEDICAL, 2020] Sunrise Medical. (2020, 16 noviembre). La hemiplejía, una parálisis completa o incompleta de la mitad del cuerpo. Recuperado de: <https://www.sunrisemedical.es/blog/hemiplejia>
- [TORRES, 2020] Torres Acuña, C. (2020). La discapacidad en el Perú. Intercambio. Edición N°48. Recuperado de: <https://intercambio.pe/la-discapacidad-en-el-peru/>
- [TORRES, 2020] Torres Pérez, Y. Morantes, H. León, C. (2020, 23 octubre). "Cálculo de potencia para motores de una silla de ruedas eléctrica para la comunidad infantil en condición de discapacidad de Tunja". Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Universidad Sato Tomas, Tunja. Recuperado de: [http://somim.org.mx/memorias/memorias2020/articulos/A1\\_138.pdf](http://somim.org.mx/memorias/memorias2020/articulos/A1_138.pdf)
- [UNICEF, 2019] UNICEF. (2019, agosto). Notas de orientación programática sobre niños, niñas y adolescentes con discapacidad. Oficina Regional de UNICEF para América Latina y el Caribe. Recuperado de: <https://www.unicef.org/lac/media/6551/file/PDF%20publicaci%C3%B3n%20Notas%20de%20orientaci%C3%B3n%20program%C3%A1tica%20sobre%20ni%C3%B1os,%20ni%C3%B1as%20y%20adolescentes%20con%20discapacidad.pdf>
- [VEIT, 2007] Veit, M. (2007). APOYO PARA MIEMBRO INFERIOR CON ÁNGULO AJUSTABLE CON COMPENSACIÓN LONGITUDINAL AUTOMÁTICA PARA SILLA DE RUEDAS. European Patent Office. Recuperado de: [https://lp.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=13&ND=3&adjacent=true&locale=es\\_LP&FT=D&date=20070601&CC=ES&NR=2275060T3&KC=T3](https://lp.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=13&ND=3&adjacent=true&locale=es_LP&FT=D&date=20070601&CC=ES&NR=2275060T3&KC=T3)
- [DE NEGRI, 2021] De Negri, V. J. Muñoz, K. Vígolo, V. (2021). "Conceptual Design of Mechatronic Systems Based on Function/Means Tree," 2021 9th International Conference on Traffic and Logistic Engineering (ICTLE), 2021, pp. 108-113, doi: 10.1109/ICTLE53360.2021.9525733.
- [YOSHIKI, 2002] Yoshiaki, M. (2002), WHEELCHAIR. European Patent Office. Recuperado 30 de Agosto de 2021, de <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/018753355/publication/JP2002045402A?q=pn%3DJP2002045402A>
- [ZUASTI, 2020] Zuasti, F. (2020, 29 abril). ¿Qué es la discapacidad y que tipos de discapacidad existen?. Todo Disca. Recuperado de: <https://www.tododisca.com/que-es-discapacidad/>

## Anexo A: Requisitos de Usuario

Los aspectos de diseño a considerar para obtener los requisitos de usuario son los siguientes:

- **Funcionalidad:** La funcionalidad de la silla de ruedas le debe permitir al usuario controlar la dirección y propulsión de la silla de ruedas según se lo permita su autonomía de recorrido. Además, debe tener un sistema de frenado que le permita detener la silla sin generar movimientos bruscos.
- **Ergonomía:** La silla de ruedas debe ser cómoda y confortable para el usuario. Los reposabrazos, reposapiés, respaldar y asiento, deben adaptarse correctamente a las dimensiones del usuario paciente de tal manera que no genere movimientos bruscos ni sobreesfuerzo para manipular la silla. El sistema para que el usuario paciente pueda realizar sus necesidades higiénicas debe ser sencillo y debe permitir el retiro de los residuos higiénicos de forma manual sin incomodar al usuario. Además, la interfaz remota debe ser accesible e interactiva para el usuario.
- **Estética:** Como los usuarios de este sistema son niños entre los 6 y 12 años, la silla de ruedas debe tener una apariencia y colores atractivos, como, por ejemplo, bordes redondeados en la estructura del chasis y, colores alegres y comerciales en los cojines.
- **Seguridad:** En esta categoría se debe considerar diseñar un sistema que no genere un peligro al usuario. Para ello se deben adecuar parámetros como velocidad y inclinación de acuerdo con las normas ISO. Además, se debe considerar un sistema que permita detener la silla en caso de alguna emergencia.
- **Fiabilidad:** La silla de ruedas debe ser confiable y debe permitir un desplazamiento fluido a través del control manual y remoto.

- **Robustez:** La estructura y diseño de la silla debe ser estable para que no se vea perjudicada por el terreno de desplazamiento. Además, el motor que acciona las ruedas no debe hacer mucho ruido para no incomodar el desplazamiento del usuario.
- **Manufactura:** Se debe considerar un bajo costo de manufactura.
- **Ensamblabilidad:** El ensamble de la silla de ruedas debe ser simple. Además, las baterías deben ser desmontables para su intercambiabilidad.
- **Mantenimiento:** La silla de ruedas debe tener un fácil mantenimiento y que requiera pocas revisiones.
- **Transportabilidad:** La silla de ruedas debe ser de fácil transporte, para ello se debe considerar que la silla sea de peso ligero.
- **Uso:** El manejo de la silla de ruedas a través de la interfaz manual y remota debe ser sencillo para el usuario. Además, no se deben generar complicaciones para el cambio del acople y desacople del receptor de necesidades del usuario paciente. El usuario debe controlar los parámetros (encendido, apagado, emergencia, velocidad) de la silla de ruedas de manera manual y desde el dispositivo móvil.
- **Geometría:** La silla de ruedas no debe tener un aspecto voluminoso y la geometría de sus componentes deben permitir un fácil mantenimiento y limpieza.
- **Cinemática:** La interfaz de control de la silla de ruedas debe permitir realizar los giros con suavidad y mantener una velocidad constante que el usuario pueda regular.
- **Fuerza:** La silla de ruedas debe ser capaz de soportar el peso y comportamiento del usuario paciente mientras realiza su traslado.

- **Energía:** El sistema de potencia de la silla de ruedas debe consumir poca energía. Esta energía debe permitirle una autonomía de recorrido acorde al análisis del estado del arte realizado. Además, se deben implementar componentes eléctricos que generen una eficiencia energética.
- **Materiales:** Los materiales de la estructura de la silla de ruedas deben ser resistentes, livianos, anticorrosivos, que no retenga suciedad en las superficies acolchadas de los cojines y en la estructura de la silla.
- **Automatización:** La velocidad de la silla de ruedas debe controlarse desde el mando manual en la silla.
- **Tiempo:** La silla de ruedas debe tener una larga vida útil.
- **Costo:** La silla de ruedas debe tener un bajo costo de fabricación y que el costo de sus repuestos sea de un precio accesible.

A continuación, se presentan los requisitos de usuario determinados en base a las principales necesidades y requerimientos de los usuarios vistos anteriormente.

Categoría de Requisitos	Requisitos de Usuario
Funcionalidad	Propulsar silla de ruedas
	Controlar dirección
	Frenar silla de ruedas
	Accesibilidad a servicio higiénico
Ergonomía	Disposición ergonómica
	Interfaz accesible
	Componentes de la silla ajustables
Estética	Apariencia atractiva
Seguridad	No genera riesgos al usuario
	Parada en caso de emergencia
Fiabilidad	Alta fiabilidad
Robustez	Robusto
	Baja vibración
Manufactura	Bajo costo de manufactura
Ensamblabilidad	Ensamblaje simple
	Baterías desmontables
Mantenimiento	Fácil mantenimiento
Transportabilidad	Fácil transporte
Uso	Fácil manejo
Geometría	Dimensiones adecuadas para niños
	Tamaño mediano
Cinemática	Movimientos suaves
Fuerza	Capacidad de soportar peso
Energía	Eficiencia energética
	Carga rápida de batería
Materiales	Resistente a la corrosión
	Materiales resistentes
Automatización	Configurar la velocidad
Tiempo	Vida útil prolongada
Costo	Precio accesible
	Bajo costo de repuestos

## **Anexo B: Matriz de Requisitos de Diseño**

En base a los requisitos de diseño descritos en el capítulo 4, se hace uso de la matriz de requisitos a través de la herramienta del laboratorio de Hidráulica y Neumática de la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC), “Mechatronic Design Development Tool”. En esta matriz se asigna un factor de importancia a cada requisito de usuario y un peso relativo a cada requisito de diseño planteado que permita satisfacer el requisito de usuario. Los requisitos de diseño se clasifican como Exigencia (E) o Deseo (D) de diseño según los pesos relativos asignados, y una clasificación técnica (T) y/o económica (E). También se determinan los parámetros que permitirán medir cada requisito propuesto, y se propone un método de verificación para cada uno.









Lista de Requisitos				
Requisitos de diseño	Exigencia o Deseo	Técnica / Económica	Valor del parámetro	Método de Verificación
Sistema de propulsión	E	T	Permite alcanzar una velocidad máxima de 10 km/h y una pendiente máxima de 15°	Prueba de campo (Medir velocidad)
Sistema de desplazamiento direccional	E	T	Permite giros suaves y cerrados	Prueba de campo (Pasillos angostos)
Sistema de frenado	E	T	Desaceleración progresiva de ruedas traseras	Prueba de campo (Frenado para las 5 velocidades)
Mecanismo de servicio higiénico	E	T	Cojín pivotado en asiento para abertura	Prueba al consumidor
Interfaz de control remota	E	T	Comunicación inalámbrica (rango máximo de 30 m)	Prueba de campo (Inspección visual de la interfaz)
Mando de control manual	E	T	Mando de control de 360°	Prueba de campo
Mecanismo para ajustar la silla	E	T	Asiento, reposabrazos y reposapiés regulables	Prueba al consumidor
Bordes redondeados	E	T/E	Redondeo mínimo de 1 cm	Medición directa
Colores cromáticos	D	E	Colores claros en cojines y chasis	Inspección visual
Componentes estandarizados	D	T/E	Piezas comerciales	Selección de componentes
Sistema antideslizante para ruedas	E	T	Evita deslizamiento en pendientes de 15°	Prueba de campo (Medir ángulo de elevación en pendiente)
Diseño compacto	D	T/E	Dimensiones máximas: 90cm x 70cm x 100cm	Medición directa y verificación en plano
Estabilidad mecánica	E	T	Rueda trasera para evitar vuelcos	Prueba de campo y selección de componentes
Sistema de amortiguación	D	T	Capacidad de carga máxima: 80 kg	Prueba experimental (Hoja de datos de componentes)
Componentes con eficiencia energética	D	T/E	Componentes electrónicos con amperaje máximo de 2 A	Prueba experimental (Hoja de datos de componentes)
Sistema de percepción de entorno	E	T	Distancia mínima de percepción: 5 m	Prueba de campo
Posición accesible de la interfaz manual	E	T	Posición de la interfaz manual en el reposabrazos (abatible)	Prueba al consumidor
Sistema regulador de energía	D	T/E	Consumo de batería: 50 Ah	Análisis de consumo eléctrico
Peso ligero	D	T/E	Peso máximo de 40 kg (sin batería)	Medición en balanza
Materiales resistentes a la corrosión	D	T	Materiales inoxidables	Selección de materiales
Sistema de control de velocidad	E	T	Variar la velocidad entre los 0 y 10 km/h (5 velocidades)	Prueba de campo (Medir velocidad)
Sistema de energización recargable	D	T/E	Autonomía máxima de 30 km	Prueba de campo (Medir distancia recorrida)
Presupuesto de fabricación limitado	E	E	Precio máximo: S/. 6,000.00	Selección de componentes y verificación del costo de fabricación

## Anexo C: Diagrama de funciones y síntesis de medios

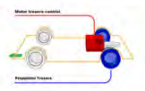
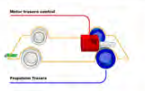
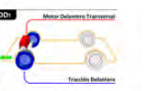
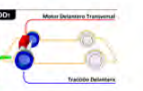
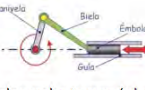








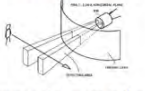







### Evaluación Técnica-Económica para el nivel 1

Evaluation Chart								
Design Criteria	j=	1		2		o		
		Operación automática		Operación semiautomática		Optimal		
		$W_{s1}$	$W_{s1} \cdot W_r$	$W_{s2}$	$W_{s2} \cdot W_r$	$W_o$	$W_o \cdot W_r$	
ii	Technical analysis							
2	Sistema de propulsión	4	3	12	3	12	4	16
3	Sistema de desplazamiento direccional	3	3	9	2	6	4	12
4	Sistema de frenado	3	3	9	2	6	4	12
5	Mecanismo de servicio higiénico	3	2	6	3	9	4	12
6	Interfaz de control remota	3	2	6	4	12	4	12
7	Mando de control manual	4	2	8	4	16	4	16
8	Mecanismo para ajustar la silla	3	2	6	3	9	4	12
9	Sistema antideslizante para ruedas	2	3	6	2	4	4	8
10	Diseño compacto	1	3	3	2	2	4	4
11	Estabilidad mecánica	2	2	4	3	6	4	8
12	Sistema de amortiguación	2	3	6	2	4	4	8
13	Sistema de percepción de entorno	2	3	6	2	4	4	8
14	Sistema de control de velocidad	3	3	9	2	6	4	12
<b>Total technical value</b>		$T_{t1}$	<b>90</b>		$T_{t2}$	<b>96</b>		$T_{to}$ <b>140</b>
<b>Relative technical value</b>		$R_{t1}$	<b>0.64</b>		$R_{t2}$	<b>0.69</b>		$R_{to}$ <b>1.00</b>
ii	Economic analysis							
15	Diseño compacto	1	3	3	2	2	4	4
16	Presupuesto de fabricación limitado	1	2	2	3	3	4	4
<b>Total economic value</b>		$T_{e1}$	<b>5</b>		$T_{e2}$	<b>5</b>		$T_{eo}$ <b>8</b>
<b>Relative economic value</b>		$R_{e1}$	<b>0.63</b>		$R_{e2}$	<b>0.63</b>		$R_{eo}$ <b>1.00</b>
<b>Hyperbolic rating</b>		$H_{r1}$	<b>0.63</b>		$H_{r2}$	<b>0.65</b>		$H_{ro}$ <b>1.00</b>

Según el análisis técnico-económico se determina la solución 2 como óptima con una puntuación de 0.65, por lo cual se selecciona el medio de operación semiautomática como medio operación de la función global.



Matriz morfológica del nivel 2

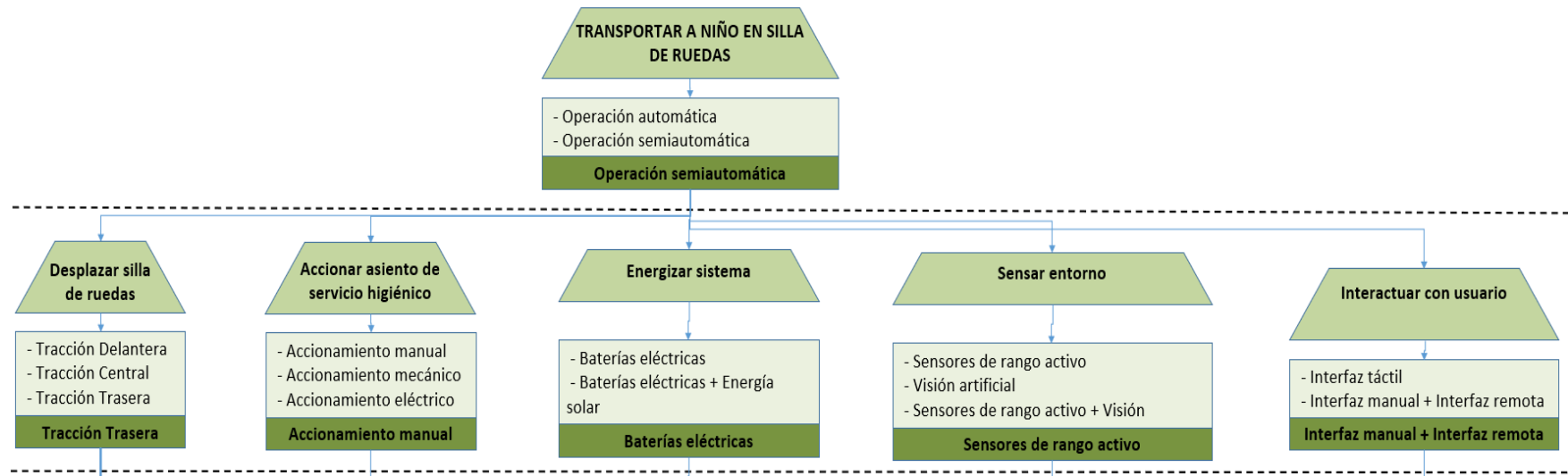
	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4	Solution 5
Possible solutions	 Tracción Trasera	 Tracción Central	 Tracción Trasera	 Tracción Delantera	 Tracción Delantera
	 Accionamiento mecánico	 Accionamiento manual	 Accionamiento manual	 Accionamiento eléctrico	 Accionamiento manual
	 Baterías de hidrógeno	 Baterías eléctricas + Energía solar	 Baterías eléctricas	 Baterías de hidrógeno	 Baterías eléctricas
	 Visión artificial	 Sensores de rango activo	 Sensores de rango activo	 Sensores de rango activo + Visión artificial	 Sensores de rango activo + Visión artificial
	 Interfaz manual + Interfaz remota	 Interfaz táctil	 Interfaz manual + Interfaz remota	 Interfaz táctil	 Interfaz manual + Interfaz remota

Evaluación Técnica-Económica para el nivel 2

Design Criteria	j=	Evaluation Chart											
		1		2		3		4		5		o	
		W <sub>s1</sub>	W <sub>s1</sub> ·W <sub>r</sub>	W <sub>s2</sub>	W <sub>s2</sub> ·W <sub>r</sub>	W <sub>s3</sub>	W <sub>s3</sub> ·W <sub>r</sub>	W <sub>s4</sub>	W <sub>s4</sub> ·W <sub>r</sub>	W <sub>s5</sub>	W <sub>s5</sub> ·W <sub>r</sub>	W <sub>o</sub>	W <sub>o</sub> ·W <sub>r</sub>
<b>Technical analysis</b>													
11													
12	4	4	16	2	8	4	16	3	12	3	12	4	16
13	3	2	6	3	9	2	6	2	6	2	6	4	12
14	3	1	3	3	9	3	9	2	6	3	9	4	12
15	3	3	9	3	9	3	9	3	9	3	9	4	12
16	4	3	12	1	4	3	12	1	4	3	12	4	16
17	2	2	4	3	6	2	4	2	4	2	4	4	8
18	1	1	1	3	3	3	3	2	2	3	3	4	4
19	2	3	6	1	2	3	6	3	6	3	6	4	8
20	1	1	1	3	3	2	2	1	1	2	2	4	4
21	2	2	4	2	4	3	6	2	4	3	6	4	8
22	2	3	6	2	4	3	6	2	4	3	6	4	8
23	2	3	6	1	2	2	4	3	6	2	4	4	8
24	2	1	2	1	2	3	6	2	4	3	6	4	8
25	3	3	9	3	9	3	9	3	9	3	9	4	12
26	2	1	2	3	6	2	4	1	2	2	4	4	8
27	2	1	2	2	2	3	3	1	1	3	3	4	4
<b>Total technical value</b>		<b>T<sub>11</sub></b>	<b>87</b>	<b>T<sub>12</sub></b>	<b>80</b>	<b>T<sub>13</sub></b>	<b>102</b>	<b>T<sub>14</sub></b>	<b>79</b>	<b>T<sub>15</sub></b>	<b>98</b>	<b>T<sub>1o</sub></b>	<b>144</b>
<b>Relative technical value</b>		<b>R<sub>11</sub></b>	<b>0.60</b>	<b>R<sub>12</sub></b>	<b>0.56</b>	<b>R<sub>13</sub></b>	<b>0.71</b>	<b>R<sub>14</sub></b>	<b>0.55</b>	<b>R<sub>15</sub></b>	<b>0.68</b>	<b>R<sub>1o</sub></b>	<b>1.00</b>
<b>Economic analysis</b>													
11													
12	1	1	1	1	1	3	3	2	2	3	3	4	4
13	1	2	2	1	1	3	3	2	2	3	3	4	4
14	2	2	4	1	2	3	6	2	4	3	6	4	8
15	2	2	4	1	2	3	6	2	4	3	6	4	8
16	2	1	2	3	6	2	4	1	2	2	4	4	8
17	1	2	2	2	2	3	3	1	1	3	3	4	4
<b>Total economic value</b>		<b>T<sub>e1</sub></b>	<b>15</b>	<b>T<sub>e2</sub></b>	<b>14</b>	<b>T<sub>e3</sub></b>	<b>25</b>	<b>T<sub>e4</sub></b>	<b>15</b>	<b>T<sub>e5</sub></b>	<b>25</b>	<b>T<sub>eo</sub></b>	<b>36</b>
<b>Relative economic value</b>		<b>R<sub>e1</sub></b>	<b>0.42</b>	<b>R<sub>e2</sub></b>	<b>0.39</b>	<b>R<sub>e3</sub></b>	<b>0.69</b>	<b>R<sub>e4</sub></b>	<b>0.42</b>	<b>R<sub>e5</sub></b>	<b>0.69</b>	<b>R<sub>eo</sub></b>	<b>1.00</b>
<b>Hyperbolic rating</b>		<b>H<sub>11</sub></b>	<b>0.50</b>	<b>H<sub>12</sub></b>	<b>0.46</b>	<b>H<sub>13</sub></b>	<b>0.70</b>	<b>H<sub>14</sub></b>	<b>0.48</b>	<b>H<sub>15</sub></b>	<b>0.69</b>	<b>H<sub>1o</sub></b>	<b>1.00</b>

Según el análisis técnico-económico se determina la solución 3 como óptima con una puntuación de 0.70, debido a que presenta un sistema con mejor propulsión, estabilidad, percepción de entorno, interfaz manual y remota para el análisis técnico del sistema. Para el análisis económico también presenta un bajo nivel de costos para su implementación en comparación con las otras posibles soluciones.

Diagrama de funciones y medios del nivel 2





## Matriz morfológica del nivel 3

Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4	Solution 5
 Servomotor de rotación continua (der)	 Motor DC Brushless (der)	 Servomotor de rotación continua (der)	 Motor DC Brushless (der)	 Motor DC Brushed (der)
 Servomotor de rotación continua (izq)	 Motor DC Brushless (izq)	 Servomotor de rotación continua (izq)	 Motor DC Brushless (izq)	 Motor DC Brushed (izq)
 Microcontrolador	 Ordenador de placa única	 Ordenador de placa única	 Microcontrolador	 PLC
 Amortiguador neumático	 Amortiguador de caucho	 Resorte helicoidal	 Resorte helicoidal	 Suspensión rígida
 Ruedas neumáticas	 Ruedas macizas	 Ruedas macizas	 Ruedas neumáticas	 Ruedas neumáticas + Ruedas macizas
 Estructura tubular	 Estructura de perfil cuadrado	 Estructura de perfil cuadrado	 Estructura tubular	 Estructura tubular
 Sistema de freno electrónico	 Sistema de freno de disco	 Sistema de freno electrónico	 Sistema de freno de disco	 Sistema de freno de disco
 Ruedas antivuelcos laterales	 Rueda antivuelco trasera	 Ruedas antivuelcos laterales	 Rueda antivuelco trasera	 Rueda antivuelco trasera

Possible solutions

Encoder óptico (der)	Encoder magnético (der)	Encoder óptico (der)	Encoder óptico (der)	Encoder magnético (der)
Encoder óptico (izq)	Encoder magnético (izq)	Encoder óptico (izq)	Encoder óptico (izq)	Encoder magnético (izq)
Asiento abatible	Asiento extraíble	Asiento abatible	Asiento extraíble	Asiento extraíble
Sensor de ultrasonido (der)	Sensor infrarrojo (der)	Sensor de ultrasonido (der)	Sensor de ultrasonido (der)	Sensor infrarrojo (der)
Sensor de ultrasonido (izq)	Sensor infrarrojo (izq)	Sensor de ultrasonido (izq)	Sensor de ultrasonido (izq)	Sensor infrarrojo (izq)
Wi-Fi Módulo Wifi	Wi-Fi Módulo Wifi	Módulo Bluetooth	Wi-Fi Módulo Wifi	Módulo Bluetooth
Aplicación móvil	Aplicación web	Aplicación móvil	Aplicación móvil	Aplicación móvil
Botones	Interruptores	Interruptores	Botones	Botones
Joystick	Pulsadores de dirección	Joystick	Joystick	Pulsadores de dirección
Modulo de nivel de carga	Modulo de nivel de carga	Modulo de nivel de carga	Modulo de nivel de carga	Modulo de nivel de carga

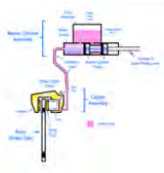







## Evaluación Técnica-Económica para el nivel 3

Evaluation Chart													
Design Criteria	j=	1		2		3		4		5		o	
		Solution 1		Solution 2		Solution 3		Solution 4		Solution 5		Optimal	
		$W_{s1}$	$W_{s1} \cdot W_r$	$W_{s2}$	$W_{s2} \cdot W_r$	$W_{s3}$	$W_{s3} \cdot W_r$	$W_{s4}$	$W_{s4} \cdot W_r$	$W_{s5}$	$W_{s5} \cdot W_r$	$W_o$	$W_o \cdot W_r$
$\bar{w}$		Technical analysis											
1	4	3	12	3	12	3	12	3	12	1	4	4	16
2	3	3	9	2	6	2	6	3	9	2	6	4	12
3	3	2	6	3	9	2	6	3	9	3	9	4	12
4	3	2	6	3	9	2	6	3	9	3	9	4	12
5	3	3	9	1	3	2	6	3	9	2	6	4	12
6	4	3	12	1	4	3	12	3	12	1	4	4	16
7	1	4	4	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4
8	2	3	6	2	4	3	6	2	4	2	4	4	8
9	1	1	1	3	3	1	1	3	3	3	3	4	4
10	2	3	6	2	4	3	6	2	4	2	4	4	8
11	2	3	6	2	4	2	4	2	4	1	2	4	8
12	2	3	6	2	4	3	6	3	6	2	4	4	8
13	2	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6	4	8
14	2	1	2	3	6	1	2	3	6	3	6	4	8
15	3	3	9	2	6	3	9	3	9	2	6	4	12
<b>Total technical value</b>		$T_{t1}$	<b>100</b>	$T_{t2}$	<b>80</b>	$T_{t3}$	<b>88</b>	$T_{t4}$	<b>106</b>	$T_{t5}$	<b>77</b>	$T_{to}$	<b>148</b>
<b>Relative technical value</b>		$R_{t1}$	<b>0.68</b>	$R_{t2}$	<b>0.54</b>	$R_{t3}$	<b>0.59</b>	$R_{t4}$	<b>0.72</b>	$R_{t5}$	<b>0.52</b>	$R_{to}$	<b>1.00</b>
$\bar{w}$		Economic analysis											
16	1	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4
17	1	2	2	3	3	2	2	3	3	3	3	4	4
18	2	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6	4	8
19	2	2	4	3	6	2	4	3	6	3	6	4	8
20	1	2	2	2	2	2	2	3	3	2	2	4	4
<b>Total economic value</b>		$T_{e1}$	<b>17</b>	$T_{e2}$	<b>19</b>	$T_{e3}$	<b>16</b>	$T_{e4}$	<b>21</b>	$T_{e5}$	<b>20</b>	$T_{eo}$	<b>28</b>
<b>Relative economic value</b>		$R_{e1}$	<b>0.61</b>	$R_{e2}$	<b>0.68</b>	$R_{e3}$	<b>0.57</b>	$R_{e4}$	<b>0.75</b>	$R_{e5}$	<b>0.71</b>	$R_{eo}$	<b>1.00</b>
<b>Hyperbolic rating</b>		$H_{r1}$	<b>0.64</b>	$H_{r2}$	<b>0.61</b>	$H_{r3}$	<b>0.58</b>	$H_{r4}$	<b>0.73</b>	$H_{r5}$	<b>0.61</b>	$H_{ro}$	<b>1.00</b>

Según el análisis técnico-económico se determina la solución 4 como óptima con una puntuación de 0.73, debido a que presenta un sistema con mejores características técnicas como en el sistema de propulsión, desplazamiento, mecanismo de servicio higiénico, control de velocidad, etc. Para el análisis económico también presenta un bajo nivel de costos para su implementación en comparación con las otras posibles soluciones.

## Matriz morfológica del nivel 4

Possible solutions	Solution 1	Solution 2
	 Disco hidraulico (der)	 Disco mecanico (der)
	 Disco hidraulico (izq)	 Disco mecanico (izq)
 Pastillas	 Pastillas	

## Evaluación Técnica-Económica para el nivel 4

Evaluation Chart								
Design Criteria	j=	W <sub>i</sub>	1		2		o	
			Solution 1		Solution 2		Optimal	
			W <sub>s1</sub>	W <sub>s1</sub> ·W <sub>r</sub>	W <sub>s2</sub>	W <sub>s2</sub> ·W <sub>r</sub>	W <sub>o</sub>	W <sub>o</sub> ·W <sub>r</sub>
<b>Technical analysis</b>								
3	Sistema de frenado	3	9	3	9	4	12	
2	Sistema antideslizante para ruedas	3	6	2	4	4	8	
<b>Total technical value</b>			<b>T<sub>t1</sub></b>	<b>15</b>	<b>T<sub>t2</sub></b>	<b>13</b>	<b>T<sub>to</sub></b>	<b>20</b>
<b>Relative technical value</b>			<b>R<sub>t1</sub></b>	<b>0.75</b>	<b>R<sub>t2</sub></b>	<b>0.65</b>	<b>R<sub>to</sub></b>	<b>1.00</b>
<b>Economic analysis</b>								
1	Presupuesto de fabricación limitado	2	2	3	3	4	4	
<b>Total economic value</b>			<b>T<sub>e1</sub></b>	<b>2</b>	<b>T<sub>e2</sub></b>	<b>3</b>	<b>T<sub>eo</sub></b>	<b>4</b>
<b>Relative economic value</b>			<b>R<sub>e1</sub></b>	<b>0.50</b>	<b>R<sub>e2</sub></b>	<b>0.75</b>	<b>R<sub>eo</sub></b>	<b>1.00</b>
<b>Hyperbolic rating</b>			<b>H<sub>r1</sub></b>	<b>0.61</b>	<b>H<sub>r2</sub></b>	<b>0.70</b>	<b>H<sub>ro</sub></b>	<b>1.00</b>

Según el análisis técnico-económico se determina la solución 2 como óptima con una puntuación de 0.70, debido a que presenta un mejor presupuesto económico y buena funcionalidad en el sistema de frenado.

Diagrama de funciones y medios de Desplazar silla de ruedas

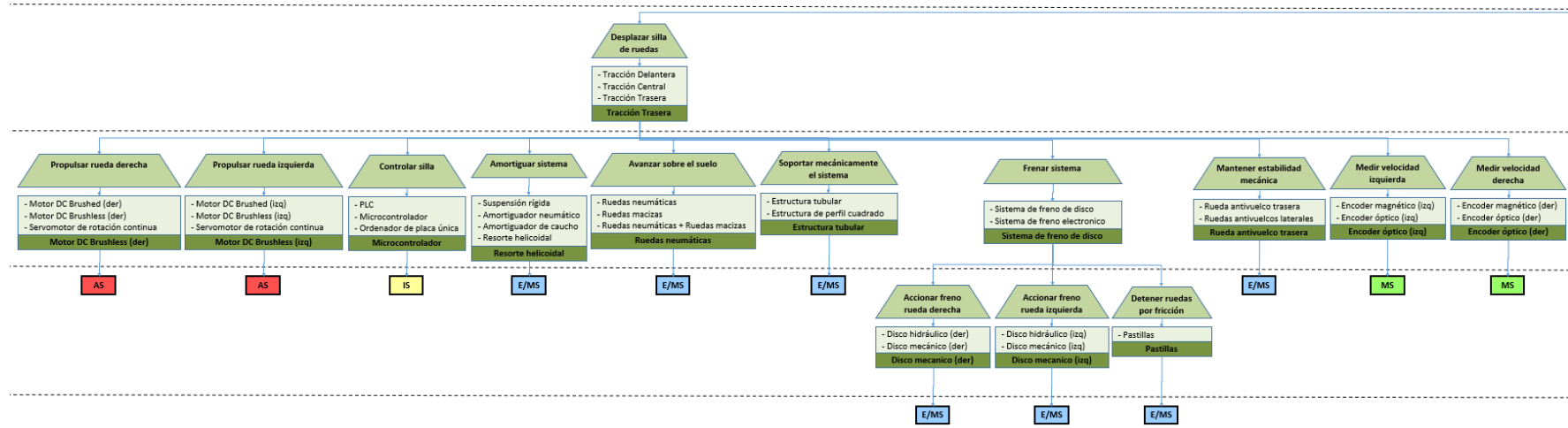


Diagrama de funciones y medios de Accionar asiento de servicios higiénicos

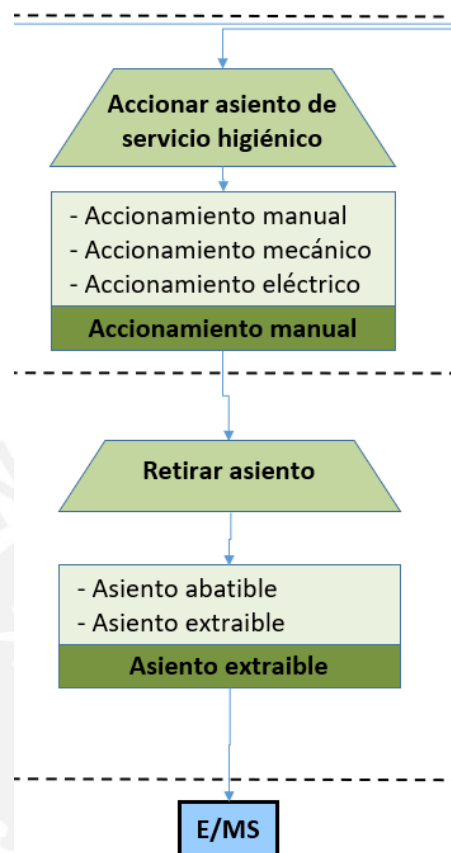
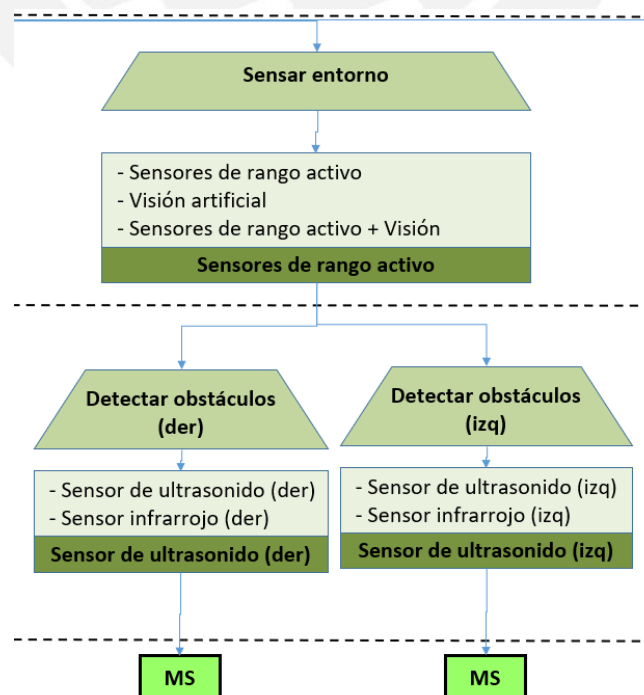
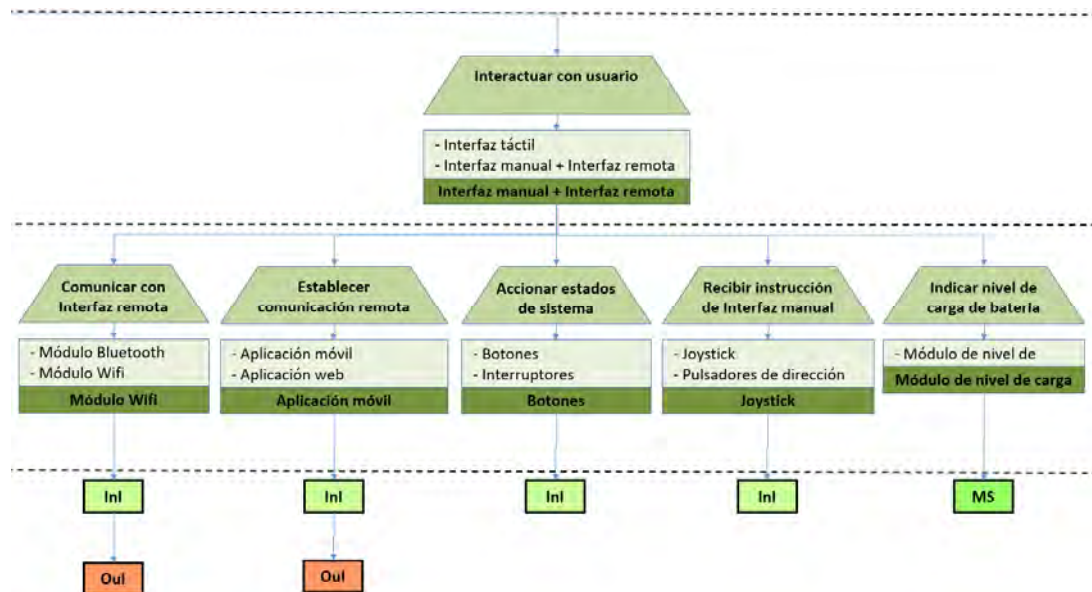


Diagrama de funciones y medios de Sensar entorno



## Diagrama de funciones y medios de Interactuar con Usuario



## Diagrama general de funciones y síntesis de medios

