

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ROBOT PARA CARGA Y TRANSPORTE DE PRODUCTOS PARA EL
HOGAR POR ESCALERAS DE EDIFICIOS SIN ASCENSOR**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR:

ANDRÉS LEONARDO ALAMO GUIZADO

ASESOR:

PEDRO ALONSO FLORES ÁLVAREZ

Lima, Julio, 2024

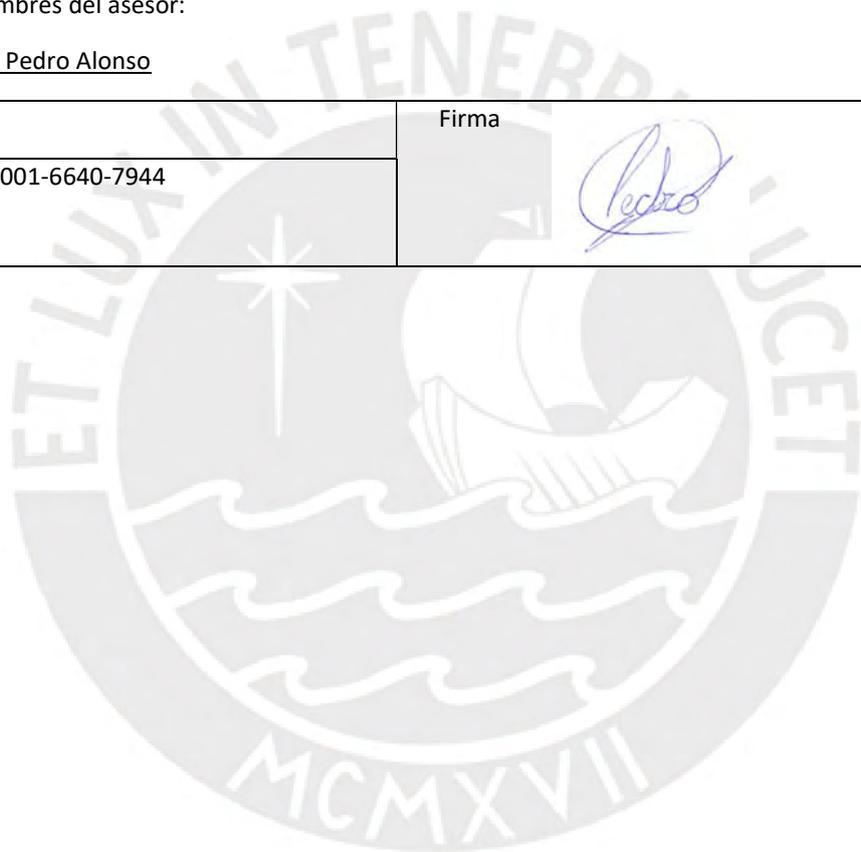
Informe de Similitud

Yo, Pedro Alonso Flores Alvarez, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis titulada "Robot para Carga y Transporte de Productos para el Hogar por Escaleras de Edificios sin Ascensor", del autor Andrés Leonardo Alamo Guizado dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 11%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 09/07/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 09 de Julio de 2024

Apellidos y nombres del asesor: <u>Flores Alvarez, Pedro Alonso</u>	
DNI:46427181	Firma 
ORCID: 0000-0001-6640-7944	



RESUMEN

Los edificios a partir de los 5 pisos requieren tener ascensor [1], sin embargo, en Lima, la capital del Perú, hay lugares en donde esto no se ha cumplido, tales como: unidad vecinal de Mirones en el Cercado de Lima, unidades vecinales de Matute y Manzanilla en la Victoria, residencial San Felipe en Jesús María, multifamiliares en Surco Viejo y Ate; también en la Ciudad Satélite Santa Rosa de Callao, entre muchos otros. Es más, en otros departamentos del Perú, se encuentra esta misma situación de edificios sin ascensores. Esto significa, que la población que resulta más afectada para cargar sus víveres, compras u otros son las personas con discapacidad, de tercera edad, embarazadas y menores de edad. De un modo u otro, esto se volverá gran problema con el pasar del tiempo para todas las personas que viven en estos edificios por el factor de edad.

La solución conceptual realizada es un robot móvil autónomo, el cual realiza 2 tareas fundamentales: trasladarse por pasillos y superar las escaleras. Las tareas son ejecutadas de manera independientes, por un lado, la traslación es realizada con ruedas omnidireccionales para poder evitar obstáculos y realizar giros; por otro lado, como se delimitó el problema a escaleras de tramos rectos, se hace uso de marcos-estrellas para subir y bajar las escaleras. La solución conceptual presentada del robot es personalizada a cada edificio, pues el robot se dirige al departamento que corresponde por medio de un mapa que utiliza de su edificio.

Para este trabajo, se siguió la metodología de diseño mecatrónico realizada por la Pontificia Universidad Católica del Perú y la Universidad Federal de Santa Catarina [UFSC-PUCP]. De acuerdo con la metodología, las secciones a encontrar en este documento fueron organizadas en antecedentes, estado del arte, diseño conceptual y diseño integrador. La primera, describe el problema y todo lo relacionado a él. La segunda, analiza y compara tanto productos como tecnologías existentes. La tercera, recolecta los requerimientos del público objetivo, disgrega el problema en partes y obtiene pequeñas soluciones para que posteriormente se puedan integrar en una idea de solución. La última sección, contiene la ingeniería de detalle del concepto de solución final, características técnicas del robot y modo de funcionamiento.

Finalmente, el robot propuesto es adecuado para las personas con discapacidad, de tercera edad, embarazadas y menores de edad; pues considera la ergonomía y así previene posibles lesiones músculo-esqueléticas.

AGRADECIMIENTOS

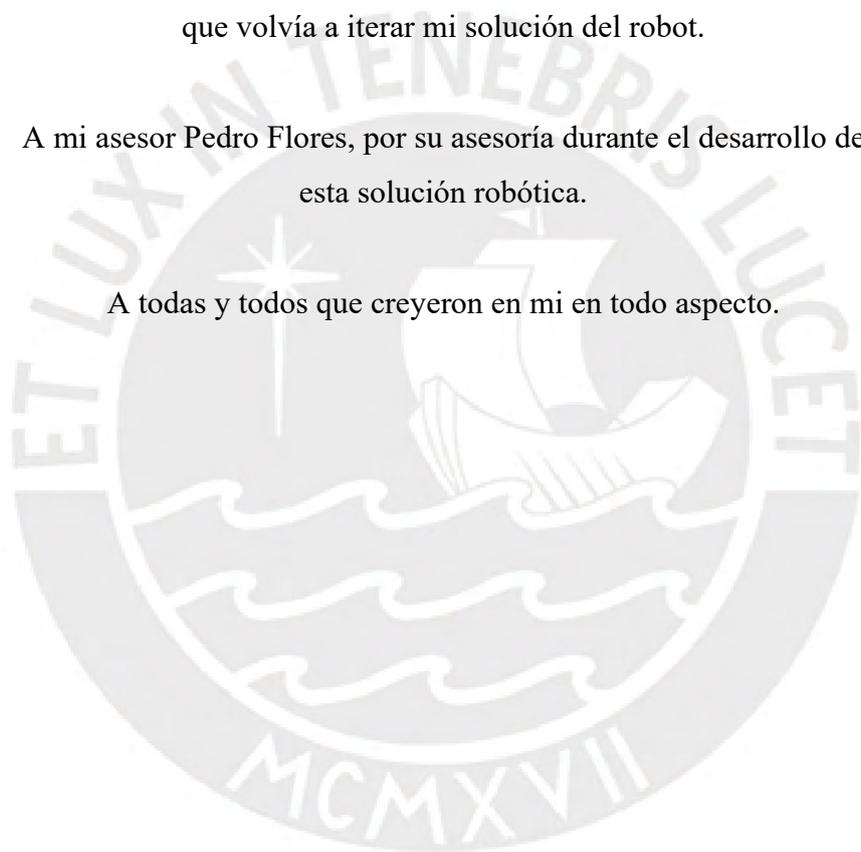
A Dios por todo lo que me ha dado, me da y me dará para que pueda ser una mejor persona.

A mis padres, Isabel Guizado y Julio Alamo, por todas sus enseñanzas y gran ejemplo que me dan hasta hoy.

A mis hermanos, por todos los ánimos que me dieron cada vez que volvía a iterar mi solución del robot.

A mi asesor Pedro Flores, por su asesoría durante el desarrollo de esta solución robótica.

A todas y todos que creyeron en mi en todo aspecto.



INDICE DE CONTENIDO

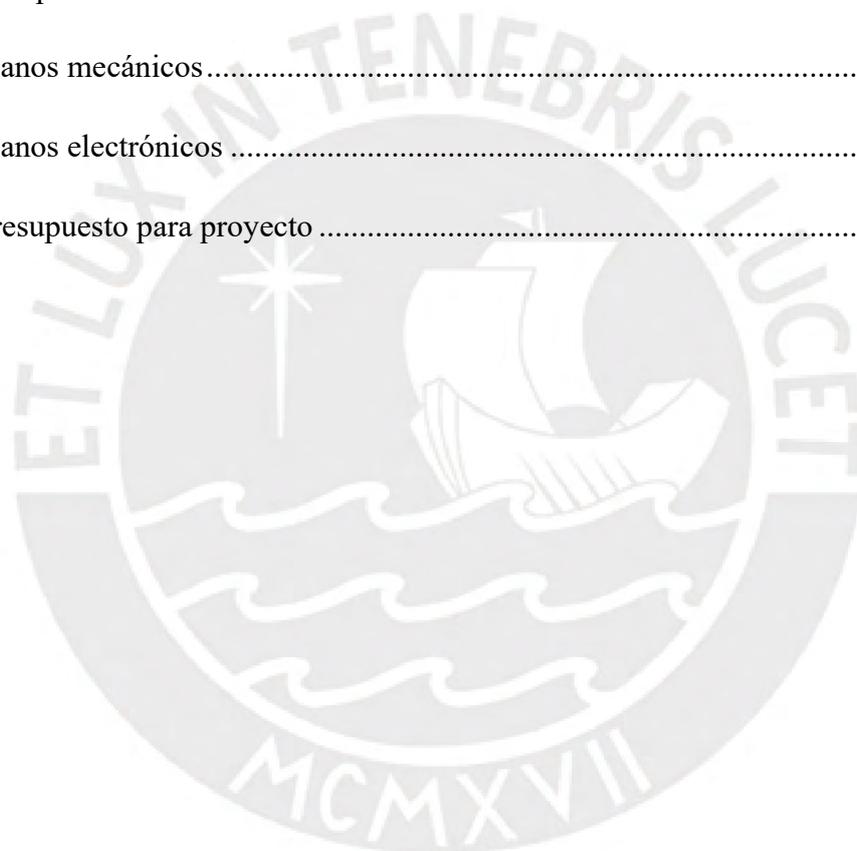
	Pág.
RESUMEN	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ANTECEDENTES	1
1.1 Problemática	1
1.2 Propuesta de solución	5
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos	5
1.4 Metodología	6
1.5 Marco teórico	7
1.5.1 Norma técnica de los pasajes de edificios	7
1.5.2 Norma técnica de las escaleras de edificios.....	8
1.5.3 Posiciones ergonómicas para actividad de carga.....	10
1.5.4 Velocidad de marcha de una persona	11
1.5.5 Tipos de locomoción	12
ESTADO DEL ARTE.....	15
2.1 Productos comerciales	15
2.1.1 Robots con locomoción por orugas	15
2.1.2 Robots con locomoción por patas.....	16
2.1.3 Robots con locomoción por ruedas	18
2.1.4 Robots con locomoción híbrida.....	19
DISEÑO CONCEPTUAL	21
3.1 Requisitos de usuario y requerimientos de diseño	21
3.1.1 Presentación de usuarios.....	21
3.1.2 Requisitos de usuario.....	21
3.1.3 Requerimientos de diseño.....	22
3.2 Árbol de funciones y medios	24
3.3 Bosquejos del concepto de solución	24
3.3.1 Operación.....	25

3.4	Arquitectura del sistema mecatrónico.....	27
3.5	Arquitectura eléctrica electrónica	28
DISEÑO INTEGRADOR.....		29
4.1	Subsistema de locomoción.....	33
4.1.1	Locomoción por pasillos	33
4.1.2	Locomoción por escaleras	42
4.2	Subsistema de interacción con el usuario	56
4.2.1	Cajón de carga	56
4.2.2	Interfaz para usuario	60
4.3	Subsistema de caja electrónica.....	64
4.3.1	Banco de baterías.....	64
4.3.2	Módulos y drivers.....	66
4.3.3	Procesamiento de datos	70
4.3.4	Distribución de componentes electrónicos.....	72
4.4	Subsistema de navegación y control.....	73
4.4.1	Modelos matemáticos del robot.....	73
4.4.2	Estrategias de control para el robot	76
4.4.3	Localización.....	80
4.4.4	Navegación global	81
4.4.5	Navegación local	84
4.5	Lista de planos del producto final.....	84
4.5.1	Lista de planos mecánicos	84
4.5.2	Lista de planos electrónicos.....	86
4.6	Costos del diseño	86
CONCLUSIONES.....		87
BIBLIOGRAFÍA		88

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Peso máximo de carga para varones y mujeres, según NIOSH.....	4
Tabla 1.2 Número y ancho de escaleras.....	8
Tabla 1.3 Comparación entre tipos de locomoción	13
Tabla 1.4 Criterios de comparación entre tipos de locomoción.....	14
Tabla 2.1 Comparación de robots por locomoción por orugas.....	16
Tabla 2.2 Comparación de robots por locomoción por 2 y 6 patas	17
Tabla 2.3 Comparación de robots por locomoción por 4 patas	17
Tabla 2.4 Comparación de robots por locomoción por ruedas	19
Tabla 2.5 Comparación de robots por locomoción híbrida.....	20
Tabla 2.6 Lista de necesidades del usuario	22
Tabla 2.7 Lista de requerimiento de ingeniería	23
Tabla 4.1 Comparación de ruedas comerciales.....	35
Tabla 4.2 Comparación de motores para chasis de ruedas	36
Tabla 4.3 Comparación de actuadores lineales.....	39
Tabla 4.4 Comparación de motores para chasis de marcos-estrellas.....	52
Tabla 4.5 Comparación de Celdas de carga.....	60
Tabla 4.6 Comparación de altavoces	61
Tabla 4.7 Comparación de paneles numéricos	62
Tabla 4.8 Consumo de energía.....	64
Tabla 4.9 Comparación de fuentes de energía	65
Tabla 4.10 Comparación de cargadores para batería de 24V	66

Tabla 4.11 Reguladores BUCK	67
Tabla 4.12 Comparación de cámaras de profundidad.....	68
Tabla 4.13 Comparación de LiDAR	69
Tabla 4.14 Características de los drivers de motor	70
Tabla 4.15 Lista de elementos hardware.....	70
Tabla 4.16 Comparación de computadores de placa reducida.....	71
Tabla 4.17 Comparación de microcontroladores	72
Tabla 4.18 Planos mecánicos.....	84
Tabla 4.19 Planos electrónicos	86
Tabla 4.20 Presupuesto para proyecto	86



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Edificios sin ascensor dentro y fuera de Lima. (a) en Ate, (b) Ciudad Satélite Santa Rosa de Callao, (c) cerca de la PUCP, (d) cerca de Plaza San Miguel, (e) cerca a la UNMSM, (f) en Cusco.	2
Figura 1.2 Estimaciones y Proyecciones de la Población Nacional, 1950-2070 3	
Figura 1.3 Distancias mínimas en pasajes de edificios.....	8
Figura 1.4 Partes de escaleras.....	9
Figura 1.5 Cantidad de gradas y espacio mínimo del descanso.....	9
Figura 1.6 Reglas de diseño para pasamanos y pasos en diagonal.....	10
Figura 1.7 Peso teórico recomendado en función de la zona de manipulación .	11
Figura 1.8 Distribución de la velocidad de marcha usual.....	12
Figura 3.1 Vista isométrica del robot con línea de referencia del codo de una persona	25
Figura 3.2 Dibujo de robot realizando su labor.....	26
Figura 3.3 Arquitectura del sistema mecatrónico.....	27
Figura 3.4 Arquitectura eléctrica - electrónica.....	28
Figura 4.1 Vista isométrica del producto final.....	29
Figura 4.2 Izquierda: vista del robot con una persona. Derecha: vista del robot subiendo escaleras.....	30
Figura 4.3 Diagrama de flujo del robot.....	32
Figura 4.4 Expresiones utilizadas para predimensionar plancha metálica.....	33
Figura 4.5 DCL para una rueda.....	34
Figura 4.6 Vista inferior del chasis con ruedas omnidireccionales.....	37

Figura 4.7	Posición del actuador en el mecanismo	37
Figura 4.8	Gráfico de fuerza requerida por el actuador en función al ángulo en radianes	38
Figura 4.9	DCL de marco de mecanismo de tijeras	39
Figura 4.10	Marco del mecanismo de tijeras	41
Figura 4.11	Izquierda: Vista isométrica del elevador de tijeras extendido. Derecha: Vista isométrica del elevador de tijeras retraído	42
Figura 4.12	Vista isométrica del chasis de marcos-estrellas	43
Figura 4.13	Geometría considerada en el diseño	43
Figura 4.14	Diagrama del mecanismo para escaleras	44
Figura 4.15	Resultados de la cinemática para el ascenso y descenso por escaleras	46
Figura 4.16	Diagrama de cuerpo libre del mecanismo de 4 barras	47
Figura 4.17	Resultados de la cinética del mecanismo para escaleras. Izquierda: subida. Derecha: bajada	49
Figura 4.18	DCL de una punta de estrella	50
Figura 4.19	Marco tetra-estrella	51
Figura 4.20	Selección del sprocket	53
Figura 4.21	Ejes de transmisión en el chasis de marcos-estrellas	54
Figura 4.22	DCL de eje de sincronización	55
Figura 4.23	Cajón de carga	57
Figura 4.24	Altura del centro de gravedad	58
Figura 4.25	DCL para análisis de volcadura	58
Figura 4.26	Ubicación de las balanzas dentro del cajón de carga	60

Figura 4.27	Vistas superiores inclinadas 45° a los lados. Izquierda: lateral derecho del robot. Derecha: lateral izquierdo del robot.	61
Figura 4.28	Elementos adicionales para la interacción del usuario	62
Figura 4.29	Diagramas de flujo para la interfaz de usuario. Izquierda: pre-operación. Derecha: post-operación	63
Figura 4.30	Módulo HX711	67
Figura 4.31	Serial Port Expander	68
Figura 4.32	Distribución de los componentes electrónicos dentro de caja de MDF	73
Figura 4.33	Sistema de referencia X_Q Y_Q fijo al robot.....	74
Figura 4.34	Velocidades del robot globales.....	74
Figura 4.35	Diagrama de bloques de la locomoción por escaleras.....	76
Figura 4.36	Control de posición para la locomoción por ruedas omnidireccionales.....	77
Figura 4.37	Seguimiento de trayectoria diagonal manteniendo la misma orientación. Visualización en RVIZ.....	79
Figura 4.38	Señales de torque para el control del mecanismo de escaleras.....	79
Figura 4.39	Filtro de partículas.....	80
Figura 4.40	Izquierda: Mapa de un piso. Derecha: Ruta trazada para ir al punto objetivo	82
Figura 4.41	Entorno de simulación para validar la navegación por pasillos	83
Figura 4.42	Trayectoria seguida por el robot para llegar al departamento indicado	83

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

En el presente capítulo, se describirá la problemática que concierne principalmente a personas con discapacidad, de tercera edad, embarazadas y menores de edad, para el transporte de productos para el hogar que son cargados por las escaleras de edificios. También, se expondrá algunas consecuencias de realizar mal la labor de carga de objetos. Al final, se presentará información de manuales técnicos de edificios, para el desarrollo de un plan de automatización.

1.1 Problemática

En Perú, de acuerdo con el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNC), los edificios deben tener un ascensor a partir de 5 pisos en adelante [1]. Sin embargo, en el departamento de Lima, hay lugares en donde esto no se ha cumplido, tales como: unidad vecinal de Mirones en el Cercado de Lima, unidades vecinales de Matute y Manzanilla en la Victoria, residencial San Felipe en Jesús María, multifamiliares en Surco Viejo y demás distritos; también en la Ciudad Satélite Santa Rosa de Callao, entre muchos otros.

Es más, en otros departamentos del Perú encontramos esta misma situación de edificios sin ascensores; también, se puede resaltar que hay muchos casos que son en bloques de edificios y conjuntos habitacionales. En la Figura 1.1 puede observarse algunos ejemplos mencionados.

Esto significa, que un gran grupo de personas debe subir muchas escaleras para llegar a su departamento; y además, si estas necesitan cargar sus víveres, artículos de limpieza u otros, esto significará un gran problema y se intensificará con el pasar del tiempo.



Figura 1.1 Edificios sin ascensor dentro y fuera de Lima. (a) en Ate, (b) Ciudad Satélite Santa Rosa de Callao, (c) cerca de la PUCP, (d) cerca de Plaza San Miguel, (e) cerca a la UNMSM, (f) en Cusco.
Fuente: Propia

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) en 2017, el 24.4% de las viviendas particulares en la provincia de Lima fueron departamentos en edificios, el 70.8% casas y el resto fueron otras viviendas [2]. Respecto a los departamentos en edificios, desde 2007 ha habido una tasa de crecimiento promedio anual de 8.3% [2]. Así mismo, el número de pisos en los edificios también ha ido en aumento [3]. En cuanto al número de miembros por hogar, según el XII Censo de Población y VII de Vivienda, se determinó que el 59.7% del total de hogares van desde 3 hasta 6 personas [2].

La población que resulta más afectada para efectuar el transporte de objetos son las personas con discapacidad, de tercera edad, embarazadas y menores de edad, en adelante, la *población afectada*. En la Figura 1.2, se puede notar por la forma de la pirámide poblacional, como ha aumentado el número de personas de la tercera edad (mayores de 60 años) y continuará en aumento. Refiriéndonos al grupo mencionado anteriormente, según INEI en 2020, en 44 de cada 100 hogares del país vive algún adulto mayor [4].

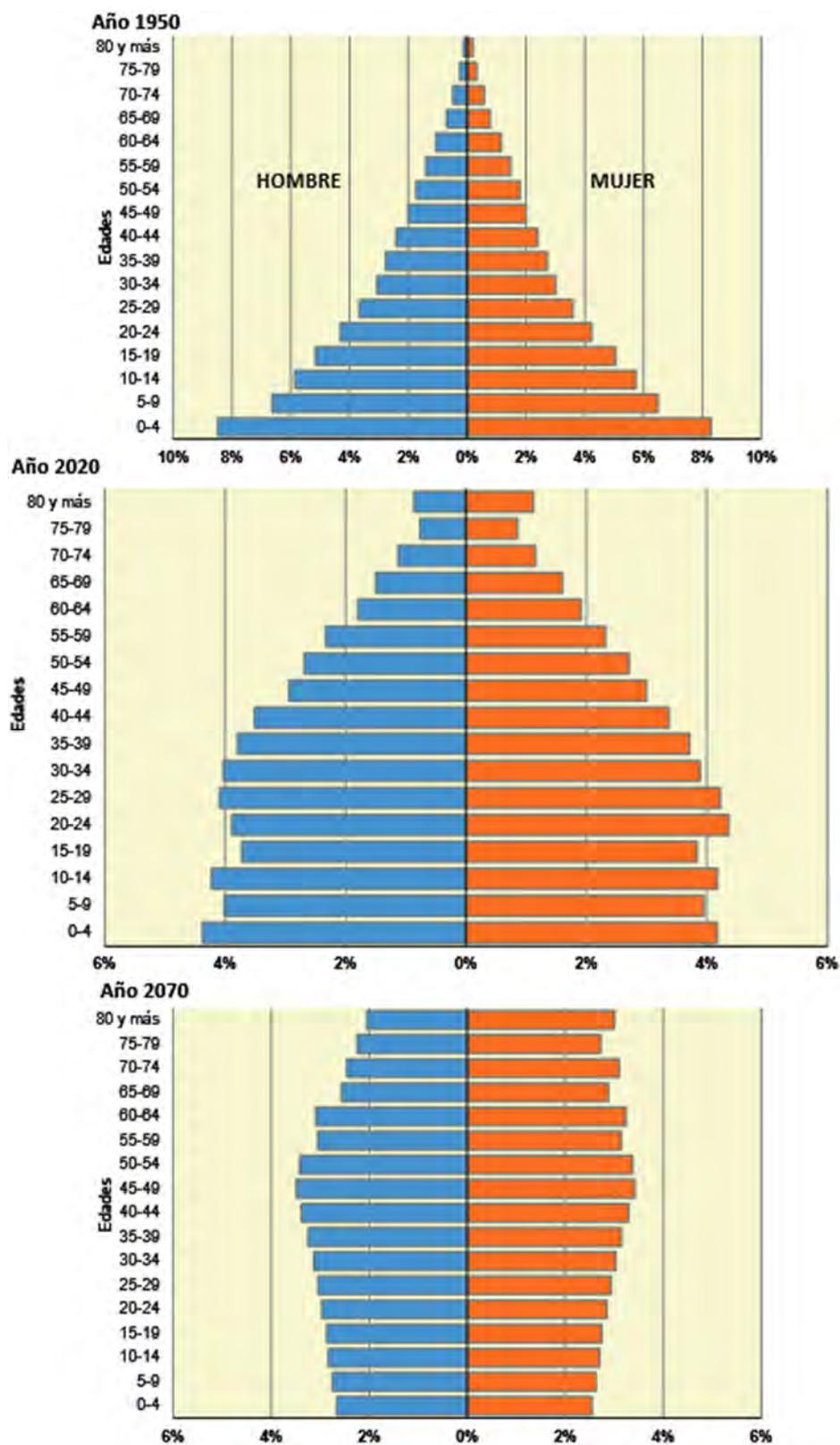


Figura 1.2 Estimaciones y Proyecciones de la Población Nacional, 1950-2070

Fuente: [5]

De acuerdo con el National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), una agencia federal estadounidense, encargada de dar recomendaciones para prevenir lesiones en el ámbito laboral, indican que el peso máximo que podrían cargar tanto varón como mujer es de 15 kg para que estén protegidos a un 95% [6]. Muchos países lo han tomado como referencia, tales como España, Chile, Perú (con modificatoria) y otros. En el caso de Perú, se dictaminó otras cotas para los estibadores, resultando en mayor peso para el varón y menor para la mujer [7] respecto a lo sugerido por NIOSH. Se debe notar que hay todo un marco legal para las personas que realizan la labor de estiba, sin embargo, con referencia a la población afectada descrita en el párrafo anterior, no se tiene una cota de peso máximo; es más, hay muchos riesgos involucrados en realizar esta labor incluso aunque no sea algo laboral.

*Tabla 1.1 Peso máximo de carga para varones y mujeres, según NIOSH.
Adaptado de [6]*

Situación	Peso máximo [kg]	Población protegida [%]
En general	25	85
Mayor protección	15	95
Trabajadores entrenados	40	No disponible

El Perú también tiene la Resolución Ministerial 375-2008-TR, Norma Básica de Ergonomía y de Procedimiento de Evaluación de Riesgo Disergonómico, esta describe las formas correctas e incorrectas al cargar objetos y también destaca las mejores técnicas para ejecutar la labor [8]. Por otro lado, algunos riesgos por desarrollar mal la labor de cargar a corto o largo plazo, son los siguientes: lesiones por sobreesfuerzos, fatiga física, acumulación de pequeños traumatismos, lesiones músculo-esqueléticas y lesiones dorsolumbares [6]. Por tanto, la ergonomía tiene un rol crucial en la población afectada, pero estas técnicas y recomendaciones no son seguidas por desconocimiento de la gran mayoría.

A su vez, durante la pandemia, el servicio de delivery ha crecido un 250% [9]. Esto significa que, si bien ya no hay que salir en la mayoría de los casos a comprar, restará la labor de cargar las compras por delivery al domicilio en caso de vivir en edificios y no haber optado por salir de compra. Respecto a la cantidad de tipos de productos, la empresa inglesa de análisis de datos, Kantar, cuantifica y clasifica a las compras del siguiente modo: 7% de consumo inmediato, con menos de 4 tipos de producto; 28% de proximidad, de 4 a 6 productos; 39% de reposición, de 7 a 9 productos; y 25% de abastecimiento, con más de 10 tipos de productos

[10]. De lo último, podemos notar que un 64% de compras son para adquirir una cantidad mayor a 7 tipos de productos.

1.2 Propuesta de solución

Expuesto todo lo anterior, se puede enmarcar la necesidad de la población afectada, es decir, personas con discapacidad, de tercera edad, embarazadas y menores de edad, por una solución que les facilite el transporte de objetos por las escaleras de edificios sin ascensor. El alcance de esta solución seguirá la recomendación de peso dada por NIOSH, estableciéndose un objetivo de transportar entre 15 kg a 20 kg por ser de uso doméstico. Esta solución cumplirá el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 3 [11], estos objetivos son parte de la agenda 2030 establecidos por la ONU, con la finalidad de mejorar la vida de todas las personas alrededor de diferentes ODS o ejes. La tercera ODS, salud y bienestar, tiene como uno de sus objetivos promover el bienestar en todas las edades y para esto se realiza el presente trabajo, pues la solución tiene como objetivo reducir los riesgos de salud por cargar pesos.

1.3 Objetivos

Se describe a continuación los objetivos del presente trabajo.

1.3.1 Objetivo general

- Diseñar un robot móvil autónomo, que pueda transportar entre 15 kg a 20 kg de **productos para el hogar** (víveres, artículos de limpieza, ropa, etc.), por las escaleras de tramo recto de edificios sin ascensor.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar el diseño conceptual de un robot que pueda desplazarse por escaleras transportando productos para el hogar y que permita una carga y descarga de ergonómica para el usuario.
- Realizar el subsistema de locomoción del robot
 - Diseñar el chasis de ruedas omnidireccionales con un elevador de tijeras.
 - Diseñar el chasis que sostiene los marcos tetra-estrella.

- Realizar planos eléctricos y mecánicos.
- Realizar el subsistema de interacción con el usuario
 - Diseñar el cajón de carga que aloja y protege la carga útil del robot.
 - Realizar una interfaz adecuada para el usuario.
 - Realizar planos eléctricos, mecánicos y diagramas de operación.
- Realizar el subsistema de caja electrónica (electrónica de potencia y control)
 - Diseñar el sistema de energía y recarga eléctrica del robot.
 - Definir las ubicaciones de los componentes electrónicos del robot y realizar planos eléctricos.
- Realizar el subsistema de navegación
 - Esquematizar las estrategias de navegación que otorgan autonomía al robot.
 - Para el control de movimiento del robot, realizar simulaciones que avalen lo propuesto planteado.
- Realizar la integración de todos los subsistemas
 - Mostrar el resultado final del producto y listar todos los planos.
 - Estimar el costo total que tienen los componentes del robot, costos estimados de fabricación y el costo de diseño.

1.4 Metodología

Este trabajo seguirá la metodología desarrollada para proyectos mecatrónicos, hecha por la Pontificia Universidad Católica del Perú y la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC). Aplicado a este trabajo, se tiene lo siguiente:

- Antecedentes
 - Desarrollo de problemática para transportar objetos por escaleras de edificios sin ascensor.
 - Marco teórico, para normas técnicas de escaleras, papers y normas de seguridad en diseño de robots móviles.
- Estado del arte
 - Revisión de tecnologías existentes, productos comerciales que solucionen parcialmente el problema, patentes y tesis relacionadas.
 - Enfoque en ejes de locomoción, carga/descarga y navegación para robots.

- Diseño conceptual
 - Requerimientos de la población afectada para listar especificaciones del proyecto.
 - Esquema de árbol de funciones y medios para disgregar las funciones y evaluar los medios que permitirán alcanzar una solución.
 - Bosquejos de conceptos de solución.
- Diseño integrador
 - Subdivisión de tareas por 4 subsistemas.
 - Diseño mecánico: memorias de cálculo, uso de Autodesk Inventor, uso de Ansys Workbench.
 - Determinación de geometrías adecuadas
 - Análisis por resistencia de materiales
 - Simulación por elementos finitos
 - Diseño electrónico: memorias de cálculo, uso de KiCad.
 - Selección de componentes
 - Desarrollo de planos de conexiones
 - Diseño control: memorias de cálculo, uso de Matlab, uso de Python.
 - Determinación de los modelos matemáticos
 - Encontrar un controlador adecuado y sus parámetros
 - Simulación de lazo de control
 - Navegación: esquema de estrategia de navegación.
 - Localización: algoritmo Adaptive Monte Carlo Localization (AMCL) con Likelihood Model
 - Planeamiento de ruta: algoritmo A*
 - Control reactivo: algoritmo Time Elastic Band (TEB)

1.5 Marco teórico

Se presenta la recopilación de información de normas técnicas y conocimiento científico que rodea a la problemática.

1.5.1 Norma técnica de los pasajes de edificios

El RNC indica que el ancho libre mínimo, se determina en función del número de ocupantes a los que sirve [1]. Para este proyecto, se tomará como referencia el segundo caso de la Figura 1.3 , pero se observa que esto depende en realidad de la cantidad de ocupantes que hay en un edificio.

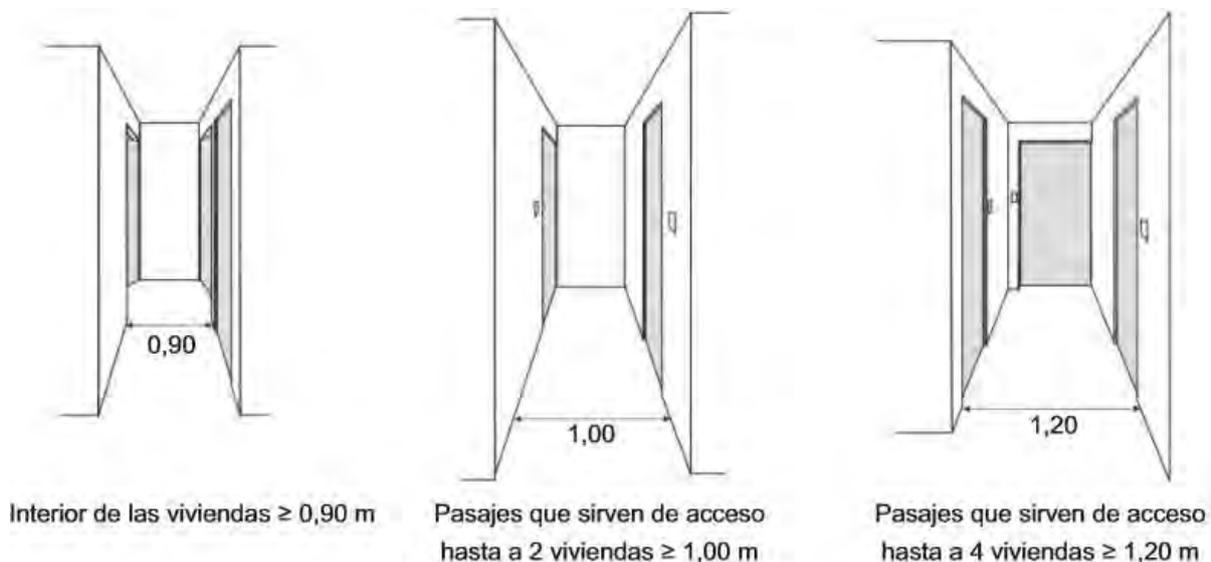


Figura 1.3 Distancias mínimas en pasajes de edificios

Fuente: [1]

1.5.2 Norma técnica de las escaleras de edificios

El RNC también diferencia las escaleras en 2 tipos, de emergencia e integradas. Las escaleras integradas son las que satisfacen el tránsito entre pisos y las que serán de interés. En la siguiente tabla, se observa el ancho que requieren un número total de escaleras en función al número de ocupantes del edificio.

Tabla 1.2 Número y ancho de escaleras.

Adaptado de [1]

Numero de ocupantes	Ancho total requerido [m]
1 a 300	1.20m en escalera
201 a 800	2.4m en 2 escaleras
801 a 1200	3.6m en 3 escaleras
Más de 1201	Un módulo de 0.6m por cada 360 ocupantes

En la Figura 1.4 se presenta el vocabulario técnico concerniente a las escaleras. Los tramos se conforman de gradas, que a su vez se forman de pasos y contrapasos. En la parte inferior izquierda de la figura, se detallan las reglas del diseño que se realizan para las gradas.

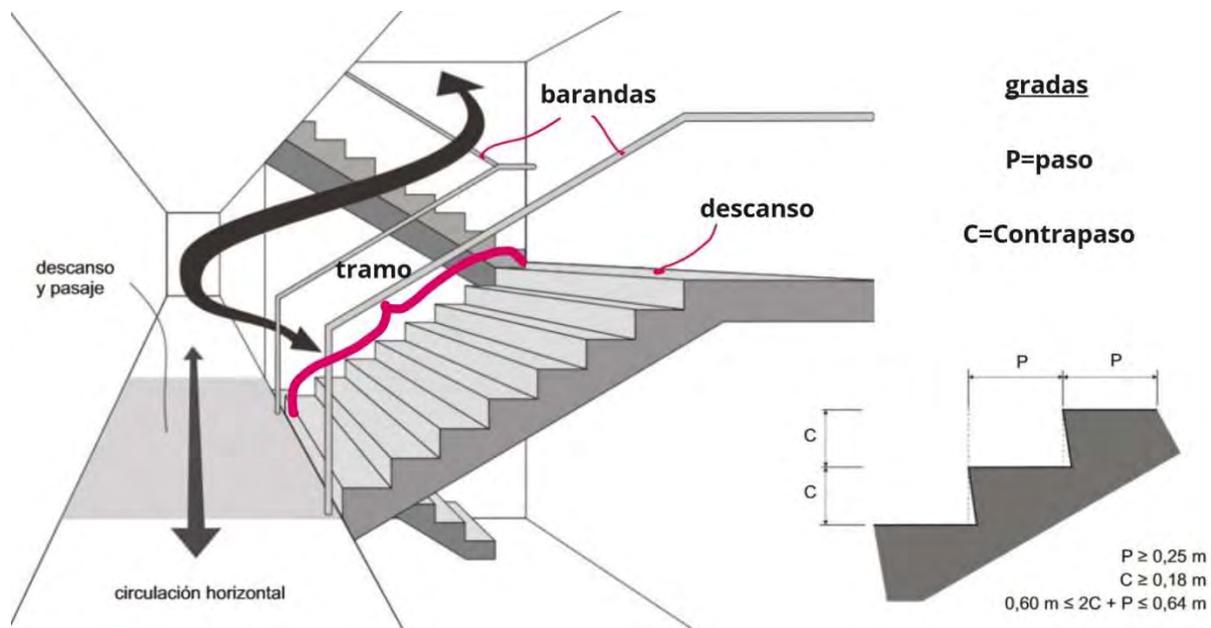


Figura 1.4 Partes de escaleras
Fuente: Modificado de [1]

Otra regla seguida en el diseño de las escaleras es que cuenten con máximo 17 pasos entre descansos y que el descanso tenga un largo mínimo de 0.9m [1]. Lo mencionado se observa en la Figura 1.5 .

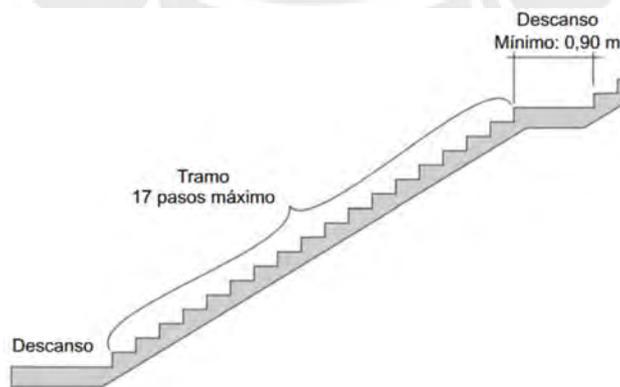


Figura 1.5 Cantidad de gradas y espacio mínimo del descanso
Fuente: [1]

Finalmente, hay dos reglas de diseño restantes, para cuando se debe colocar pasamanos y para las medidas en los pasos en diagonal. En la primera, se debe tener barandas laterales cuando las escaleras tienen un ancho mayor a 1.20m y menor igual a 2.40m; en caso de un ancho mayor a 3m se requiere un pasamanos central [1]. En la segunda, las escaleras no pueden ser de tipo caracol, por otro lado, cuando se hacen escaleras de paso diagonal deben seguir las reglas que se ven en la Figura 1.6 [1].

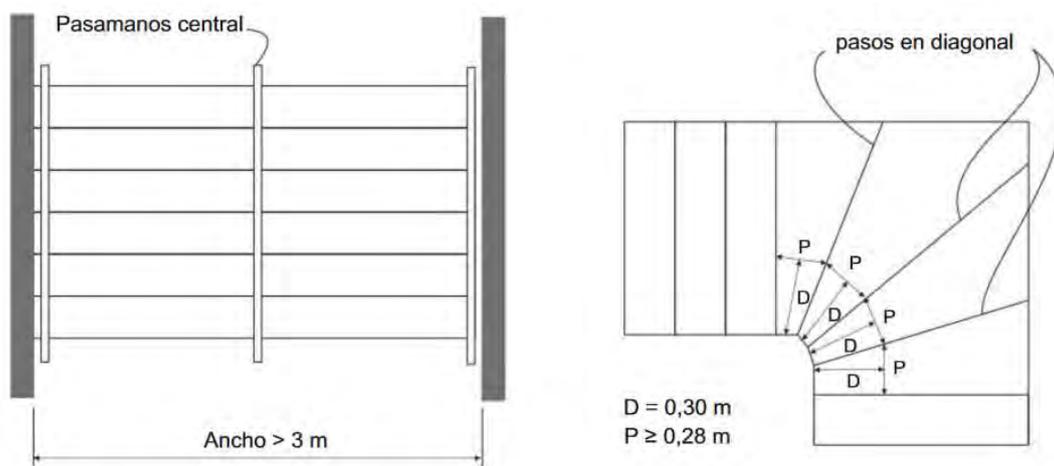


Figura 1.6 Reglas de diseño para pasamanos y pasos en diagonal
Fuente: [1]

1.5.3 Posiciones ergonómicas para actividad de carga

Una persona que realiza la actividad de carga necesita tener técnica para no sufrir posteriormente de distintas lesiones físicas que pueden originarse como las dorsolumbares. Para esto hay manuales que instruyen como ejecutar dicha tarea, de manera que la labor se adapte a las capacidades y limitaciones físicas de la persona.

La posición de carga respecto del cuerpo es importante, pues tanto el alejamiento vertical como horizontal ubican a una persona en una situación de carga, es decir, la persona tiene más o menos capacidad de carga recomendada. En la Figura 1.7, se puede ver las distintas situaciones de carga. Esto es relevante porque el diseño del robot deberá tener una altura ergonómica para la carga/descarga.



Figura 1.7 Peso teórico recomendado en función de la zona de manipulación
Fuente: [12]

1.5.4 Velocidad de marcha de una persona

La velocidad de marcha usual promedio es de 1.3m/s y esta se encuentra entre 0.75m/s a 2m/s [13], de acuerdo con un estudio realizado por 45 años, iniciado con personas de 3 a 38 años. Este análisis se datos se realizó en 2019 y es relevante porque el diseño del robot debe tener una velocidad de desplazamiento acorde al de una persona, de modo que pueda seguirla. La Figura 1.8 muestra el histograma de la velocidad de marcha, que realizó dicho estudio.

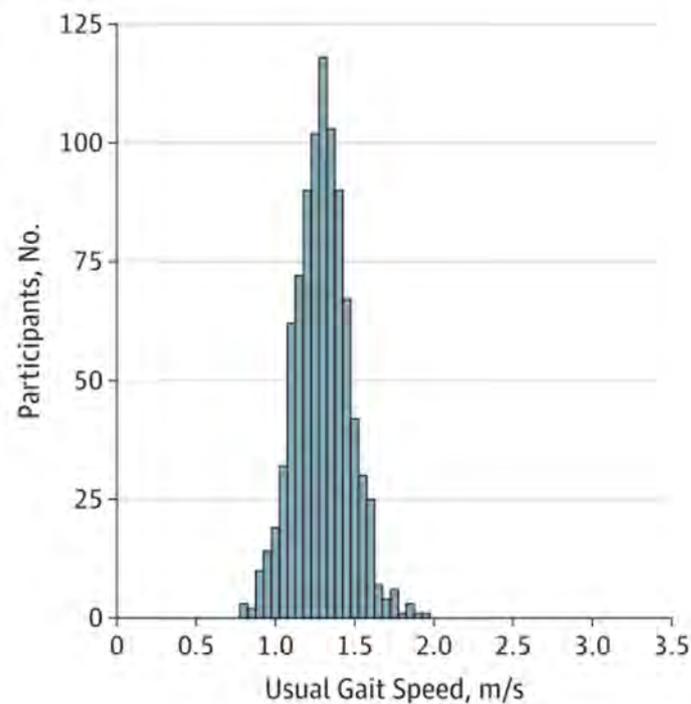


Figura 1.8 Distribución de la velocidad de marcha usual
Fuente: [13]

1.5.5 Tipos de locomoción

Se describen a continuación las características generales de los 3 tipos de locomoción terrestre más utilizados.

- Ruedas [14]

Son el tipo más usado en la locomoción terrestre, debido a su simplicidad y versatilidad. Se dividen en ruedas universales y suecas. La primera gira sobre un eje de modo que avanzan en línea recta. Las segundas también giran sobre un eje y tienen rodillos alrededor de su diámetro exterior en un ángulo diferente a 90° , lo que les permite realizar un movimiento adicional.

Las configuraciones que hay para el primer tipo son diferencial, triciclo, sincrónico, ackerman, skid steering, entre otros. Por otro lado, las configuraciones para el segundo tipo son omnidireccional de 3 ruedas y omnidireccional de 4 ruedas.

- Orugas [14]

Hace uso de una faja o correa que envuelve un tren de ruedas distribuido en una estructura mecánica. Su principal ventaja es que tienen mayor tracción que los otros tipos. Las configuraciones que tienen son de oruga u orugas articuladas.

- Patas [14]

La aplicación de estas extremidades en robots es por inspiración en la naturaleza. Su principal ventaja es que pueden movilizarse en terrenos irregulares, con la condición de ser estáticamente estables al mantener el centro de gravedad dentro del polígono definido por los puntos en contacto con el suelo. Para robots móviles las principales configuraciones que hay son: bípedos, cuadrúpedos, hexápodos, entre otros.

- Comparación entre tipos de locomoción

Se presenta a continuación, una tabla con comparaciones relativas entre tipos de locomoción, excluyendo configuraciones híbridas. Este fue un análisis del estado de arte al año 2012, de las características de los diferentes tipos de locomoción en robots móviles terrestres, enfocado en terrenos no regulares.

Tabla 1.3 Comparación entre tipos de locomoción

Adaptado de [15]

Características relativas	Orugas	Patas	Ruedas
Cuantitativas			
Máxima velocidad	Media/alta	Baja/media	Alta
Capacidad de trepar escaleras	Media	Alta	Baja
Capacidad de trepar pendiente	Alta	Media/alta	Baja/media
Eficiencia energética	Media	Baja/media	Alta
Cualitativas			
Complejidad mecánica	Baja	Alta	Baja
Complejidad de control	Baja	Alta	Baja

Los criterios de evaluación, que fueron utilizados para cada característica cualitativa en la comparación mostrada, se ven en la siguiente tabla.

Tabla 1.4 Criterios de comparación entre tipos de locomoción

Adaptado de [15]

Característica cuantitativa	Criterio de evaluación	Rangos		
		Baja	Media	Alta
Máxima velocidad	Relación entre velocidad máxima y longitud total del robot	$<0.5 \text{ s}^{-1}$	$0.5 - 3 \text{ s}^{-1}$	$>3 \text{ s}^{-1}$
Capacidad de trepar escaleras	Relación entre la máxima altura de la grada y la altura del robot	<0.15	$0.15 - 0.35$	>0.35
Capacidad de trepar pendiente	Pendiente máxima a subir en superficie compacta (coeficiente de fricción > 0.5)	$<15^\circ$	$15^\circ - 30^\circ$	$>30^\circ$
Eficiencia energética	Relación entre la energía potencial gravitatoria final, al subir una pendiente a baja velocidad y la energía suministrada a los actuadores	<0.1	$0.1 - 0.35$	>0.35



CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se recopila el estado de la tecnología en productos comerciales, patentes y tecnologías relacionadas. Así mismo, tiene tablas comparativas y datos tanto cualitativos como cuantitativos.

2.1 Productos comerciales

Los siguientes productos tienen como ejes de análisis la locomoción, la carga/descarga y su navegación. A partir de esto, se subdividió a los productos según como se desplazan.

2.1.1 Robots con locomoción por orugas

- Chaos [16]

Es un robot de alta movilidad, realizado por Autonomous Solutions en el año 2000, para operaciones industriales, militares y de respuesta a desastres. Cuenta con 4 orugas rotantes, las cuales le permiten superar terrenos complicados. Puede cargar hasta 45kg y desplazarse a 2.91m/s.

- Kobra [17]

Es un robot fuerte que incluye un brazo manipulador, hecho por FLIR Systems en el año 2011, para fines militares, de seguridad y respuesta a desastres. Puede cargar hasta 68kg, levantar cargas de hasta 150kg con su manipulador y desplazarse a 3.58m/s. Cuenta con un sistema de oruga-dual articulado como aleta.

- Amoeba GO-1 [18]

Fue diseñado por Amoeba Energy en el año 2019, para que los adultos mayores no tengan que salir de sus departamentos y bajar al primer piso a botar la basura. Puede cargar hasta 6kg y su sistema de oruga tienen agregado un material de cuerpo flexible, el cual lo hace seguro al contacto y colisiones.

- Comparación de robots por locomoción por orugas

Tabla 2.1 Comparación de robots por locomoción por orugas

Adaptado de [16], [17], [18]

Características	Chaos	Kobra	Amoeba GO-1
Altura, largo, ancho [cm]	23x131x66.5	45.7x91.4x70.6	77x60x
Peso [kg]	60	226.8	-
Velocidad [m/s]	2.91	3.58	0.28
Capacidad de carga [kg]	45	68	6
Autonomía [h]	4	4-10	-
Sensores	Video cámara (óptico 10X, zoom digital 4X)	Camara, IMU	Light Detection and Ranging (LiDAR)
Software	MicroC/OS-II real-time operating system	-	-
Imagen referencial			

2.1.2 Robots con locomoción por patas

- Digit [19]

Es un robot humanoide, con 2 extremidades para caminar y 2 para manipular objetos, hecho por Agility Robotics en el año 2019, para llevar a cabo tareas de delivery. Puede desplazarse a 2.5m/s, levantar y trasladar cajas de hasta 18kg. El robot, si bien es un bípedo, está equipado con un torso y brazos que le otorgan balanceo y manipulación.

- Spot [20]

Es un robot compacto con 4 patas, creado por Boston Dynamics en el año 2015, para labores industriales e investigación. Puede marchar, caminar, gatear y trotar a 1.6m/s; además puede cargar hasta 14kg. Por otro lado, sube escaleras mirando al frente y las baja caminando hacia atrás.

- ANYmal [21]

Es un robot autónomo, fuerte y de 4 patas; diseñado por ETH Zurich and ANYbotics en el año 2016, que puede ejecutar labores en condiciones extremas. Puede cargar hasta 10kg, desplazarse a 1m/s y de manera segura superar obstáculos y escaleras.

- RHex [22]

Es un robot Hexa-pedal, comercializado por Boston Dynamics en el año 2001, para aplicaciones de seguridad, militares e investigación. Su diseño es bio-inspirado, puede desplazarse a 2.7m/s y puede superar terrenos irregulares.

- Comparación de robots por locomoción por patas

Tabla 2.2 Comparación de robots por locomoción por 2 y 6 patas

Adaptado de [19], [22]

Características	Digit	RHex
Altura, largo, ancho [cm]	155x20x-	20x57x39
Peso [kg]	42.2	12.5
Velocidad [m/s]	2.5	2.7
Capacidad de carga [kg]	18	-
Autonomía [h]	-	6
Sensores	LiDAR, 4 Intel RealSense cámaras de profundidad, MEMS IMU, encoders incremental y absoluto	Cámaras, giroscopio, acelerómetro, sensores posición/corriente
Software	Linux-based real-time operating system	Linux OS
Imagen referencial		

Tabla 2.3 Comparación de robots por locomoción por 4 patas

Adaptado de [20], [21]

Características	Spot	ANYmal
Altura, largo, ancho [cm]	84x50x111	70x80x40
Peso [kg]	25	30
Velocidad [m/s]	1.6	1
Capacidad de carga [kg]	14	10
Autonomía [h]	1.5	2-4
Sensores	Cámaras estéreo, IMU, sensores fuerza/posición	Sensores posición/torque, IMU, cámara estéreo, LiDAR, micrófono ultrasonido, cámara térmica
Software	Spot Software Development Kit (SDK)	Robot operative system (ROS)
Imagen referencial		

2.1.3 Robots con locomoción por ruedas

- Summit-XL [23]

Es un robot con sistema de tracción en 4 ruedas, desarrollado por Robotnik en el año 2015, para logística e inspección en interiores y exteriores. Puede cargar hasta 65kg y desplazarse a 3m/s. Además, tiene 2 configuraciones cinemáticas, una con ruedas de goma y la otra con mecanum.

- Roxo [24]

Es un robot con 4 ruedas para desplazarse y 2 ruedas adicionales en unos brazos delanteros, para superar obstáculos de la vía pública. Fue hecho por Deka Research & Development Corp para FedEx en el año 2019, para realizar envíos por delivery de manera autónoma. Puede transportar hasta 45kg y desplazarse a 4.44m/s.

- ROVéo [25]

Es un robot autónomo de 4 ruedas, sobre un mecanismo que le sirve para una efectiva movilidad urbana. Fue hecho por Rovenso, para monitoreo de seguridad y protección de sitios industriales, tanto en exteriores como interiores. Puede desplazarse a 2.22m/s y superar obstáculos gracias al mecanismo que utiliza.

- Comparación de robots por locomoción por ruedas

Tabla 2.4 Comparación de robots por locomoción por ruedas

Adaptado de [23], [24], [25]

Características	Summit-XL	Roxo	ROVéo
Altura, largo, ancho [cm]	41.6x72x61.4	130x99x73.6	117.2x79x83.2
Peso [kg]	65	204.1	50
Velocidad [m/s]	3	4.44	2.22
Capacidad de carga [kg]	65	45	-
Autonomía [h]	10	-	8
Sensores	IMU, cámaras PTZ, GPS, emisora radiocontrol 6 canales, cámaras de rango 3d	LiDAR	GPS, LiDAR, IMU
Software	ROS	-	-
Imagen referencial			

2.1.4 Robots con locomoción híbrida

- Handle [26]

Parte de la idea de un robot bípedo, al cual se le agregó ruedas, un manipulador y un contrapeso. Fue creado por Boston Dynamics en el año 2019, para paletizado y carga de cajas. Puede cargar hasta 15kg y tiene una cola como contrapeso que la mueve para balancearse y realizar sus movimientos.

- RoboSimian [27]

Es un robot similar a un gorila (4 extremidades), al cual se le agregó ruedas, que pueden girar en el eje al que pertenecen las patas para direccionarse. Fue originado por el Jet Propulsion Laboratory en el año 2015, para respuesta a defensa avanzada y situaciones de desastre. Puede

cargar hasta 25kg y desplazarse a 0.15m/s. Además, tiene 2 configuraciones para sus patas delanteras, una con ruedas, en la que se desplaza sobre cuatro patas-ruedas; y la otra, que reemplaza las ruedas por pinzas para manipulación, moviéndose sentado con dos ruedas adicionales, ubicadas en su parte trasera.

- Swiss-Mile [28]

Es el robot ANYmal, pero a sus 4 extremidades se les adiciona ruedas y con esto alcanza una movilidad avanzada que lo hace multimodal. Fue trabajado por el equipo del Laboratorio de Sistemas Robóticos de ETH Zurich en el año 2021, para labores de delivery, construir gemelos digitales, logística, monitoreo de infraestructura y otros. Puede cargar hasta 50kg y desplazarse a 6.2m/s. También, es muy versátil para superar obstáculos desafiantes, 83% más eficiente que sistemas de patas, puede volverse un humanoide-cuadrúpedo para manipulación y diferentes puntos de vista en mapeos.

- Comparación de robots por locomoción híbrida

Tabla 2.5 Comparación de robots por locomoción híbrida

Adaptado de [26], [27], [28]

Características	Handle	RoboSimian	Swiss-Mile
Altura, largo, ancho [cm]	200x-x-	1200x	60x80x-
Peso [kg]	150	125	49.8
Velocidad [m/s]	-	0.15	6.2
Capacidad de carga [kg]	15	25	50
Autonomía [h]	-	-	-
Sensores	Cameras de profundidad	LiDAR, cámaras estéreo	LiDAR, GPS
Software	SO y control personalizado	-	-
Imagen referencial			

CAPÍTULO 3

DISEÑO CONCEPTUAL

Este capítulo describe las necesidades del usuario, las cuales son transcritas a requerimientos para el diseño. También, luego de una evaluación de medios para cumplir funciones, se realizan conceptos de solución, para finalmente tener una propuesta de solución a desarrollar.

3.1 Requisitos de usuario y requerimientos de diseño

En el Anexo C.1, se encuentra la matriz de requerimientos para el robot móvil de carga.

3.1.1 Presentación de usuarios

Como se mencionó en el capítulo 1, este trabajo tiene como fin dar una solución para el transporte de productos para el hogar por escaleras, para la población afectada, quienes son las siguientes personas:

- con discapacidad
- de tercera edad
- embarazadas
- menores de edad
- otras que lo requieran

Se considera a la población afectada de un edificio sin ascensor, como un interesado y potencial cliente; por ello, el robot sería adquirido por un edificio y sería de uso común, pero de un uso a la vez.

3.1.2 Requisitos de usuario

A continuación, se lista en enunciados las necesidades de la población afectada.

Tabla 2.6 Lista de necesidades del usuario

Necesidad	Descripción
Dimensiones adecuadas	El ancho de las escaleras no debe ser ocupado demasiado, pues no se debe afectar el tránsito de las personas por estas.
Lograr capacidad de carga	Se necesita que se consiga una capacidad de carga de mínimo quince kilogramos.
Lograr subir/bajar escaleras	El performance del robot al subir y bajar escaleras debe ser adecuado, con el fin de no demorar a otros en el uso de las mismas.
Movimientos no bruscos	No debe haber movimientos muy rápidos ni repentinos, para la aceptación por parte de las personas.
Carga/descarga cómoda	La altura a la que se coloque y retire los objetos debe ser adecuada para beneficio ergonómico en manipulación de la carga.
Diseño mecánico robusto	Debe ser y verse robusto, para dar sensación de seguridad.
Operación confiable	El robot no debe fallar cuando carga objetos en el ascenso o descenso de escaleras.
Robot inteligente	Debe poder identificar a las personas en el entorno y moverse sin obstaculizar en los pasillos.
Duración regular de batería	La batería debe ser recargable y no debe requerirse demasiadas cargas al día.
Bajo riesgo de accidentes	Debe contar con la protección adecuada y mantener su distancia hacia las personas al funcionar.
Rentable económicamente	No debe ser excesivamente costoso. Se cuenta con el poder adquisitivo de las personas del edificio, que requieran la solución.
Fácil mantenimiento	Debe ser realizable por personas comunes o en caso último requerir una asistencia técnica.

3.1.3 Requerimientos de diseño

Ahora, se lista los requerimientos necesarios para lograr satisfacer las necesidades de los usuarios y un método de verificación por requerimiento. Luego de cada requerimiento listado, se le clasificará por tipo y tendrán 2 características que se describen a continuación. La primera característica es si el requerimiento es una demanda o deseo, lo que equivale a que tan indispensable es el requerimiento (esto se obtiene de una evaluación numérica realizada con la metodología). La segunda característica es una identificación de si es de naturaleza técnica o económica o ambas.

Tabla 2.7 Lista de requerimiento de ingeniería

Requerimiento (Tipo de requerimiento)	Descripción	Método de verificación
Ancho adecuado, menor a estándar de escalera (Demanda - técnica)	El ancho máximo será de 0.6m, lo que equivale a menos de la mitad del ancho de una escalera estándar [1].	Se podrá medir con flexómetro para verificarlo.
Peso de carga útil (Demanda - técnica)	La carga útil ira desde los 5kg a 15 kg.	Se validará con pruebas de funcionamiento mecánico.
Control robusto (Demanda - técnica)	Uso de estrategia de control adecuada para llevar a cabo la carga/descarga de manera uniforme, con un control de velocidad menor a 1.0m/s [29] (seguridad de la persona a un 99.7%) y un sobreimpulso menor al 10%.	Se verificará con pruebas de funcionamiento y software.
Medidas de robot adecuadas para carga/descarga (Demanda – técnico)	El diseño tendrá en cuenta la posición ergonómica de carga, que es a una altura debajo del codo, lo que equivale a un intervalo entre 70cm a 90cm.	Se podrá medir con flexómetro para verificarlo.
Dimensionamiento con factor de seguridad adecuado para interacción con personas (Demanda – técnica/económica)	Se utilizará factores de seguridad mínimos de 1.5.	Se validará con simulación mecánica.
Evitar colisiones (Demanda - técnica/económica)	Se utilizará sensores de presencia, distancia e inclinación.	Se validará con pruebas de funcionamiento y software.
Navegación autónoma (Demanda - técnica)	Uso de algoritmo de navegación para evitar obstáculos, tales como personas, objetos abandonados, puertas, entre otros; de modo que no se estorbe el tránsito de las personas.	Se validará con pruebas de funcionamiento y software.
Identificación de entorno (Demanda - técnica)	Se detectará escaleras, personas, pasillos, paredes.	Se verificará con pruebas del funcionamiento y algoritmo.
Autonomía de batería regular (Demanda – técnico/económico)	La autonomía mínima será de 3h.	Se verificará con la ficha técnica y un informe de costos.
Seguridad al contacto (Demanda - técnica)	Los bordes y puntas serán redondeados, con una protección para el armazón IP23, la cual es contra ingreso de objetos de diámetros menores a 12.5mm y spray de agua.	Se comprobará el diseño para validarlo.
Detención de emergencia (Demanda - técnica)	Se contará con un botón de parada de completa o parcial y de reanudación de operación.	Se verificará con prueba de funcionamiento.
Cables y piezas no sueltas (Demanda - técnica)	Cables serán recubiertos, las piezas estarán en el interior y todo estará tapado. Contará con una protección IP65, la cual es contra ingreso completo de polvo y chorro de agua.	Se validará con inspección visual.

Alertas sonoras (Demanda - técnica)	El sonido para alertar será de 50dB, el adecuado para que lo escuchen personas cercanas.	Se verificará con prueba de funcionamiento.
Piezas intercambiables (Deseo – técnico/económico)	Los repuestos deben estar en el mercado nacional.	Se validará con las fichas técnicas e informe de costos.
Manual de usuario (Deseo - técnico)	Servirá para dar indicaciones de partes del robot, funcionamiento, mantenimiento y otros necesarios.	Se validará con la realización de un documento físico/virtual.
Mecanismo de elevación y bajada de escaleras (Demanda - técnica)	Se hará un diseño efectivo y compacto, que suba y baje escaleras.	Se comprobará el diseño para validarlo.
Mecanismo de carga/descarga (Demanda - técnica)	Se hará un diseño efectivo y compacto, que permita realizar ergonómicamente la carga/descarga.	Se comprobará el diseño para validarlo.
Carga de batería (Deseo - técnico)	La carga será con conexión a toma de corriente de 220VAC y 60Hz.	Se verificará con prueba de funcionamiento.
Velocidad adecuada (Demanda - técnica)	El robot se desplazará entre 0.10m/s a 0.8m/s.	Se verificará con prueba de funcionamiento.

3.2 Árbol de funciones y medios

En el Anexo C.1, se encuentra el árbol de funciones y medios del robot móvil de carga.

3.3 Bosquejos del concepto de solución

Se presenta el bosquejo del concepto de solución final para el robot. En la Figura 3.1, la línea punteada representa la altura del codo de la persona, la cual es importante tener en cuenta para el diseño ergonómico. La parte de la derecha, muestra al robot con las ruedas desplegadas completamente, es decir, una altura adecuada o ergonómica para tanto carga como descarga. La parte de la izquierda, muestra al robot con las ruedas replegadas, por tanto, esta configuración es usada solo para el desplazamiento del robot por escaleras. Por otro lado, cuando el robot se desplaza por pasillos, las ruedas se despliegan parcialmente para que no tome mucho tiempo los cambios entre las funciones de las ruedas y marcos-estrella. En las siguientes secciones, se detallan ciertos aspectos como la operación, los elementos que forman parte del sistema y dimensiones tentativas para el diseño.

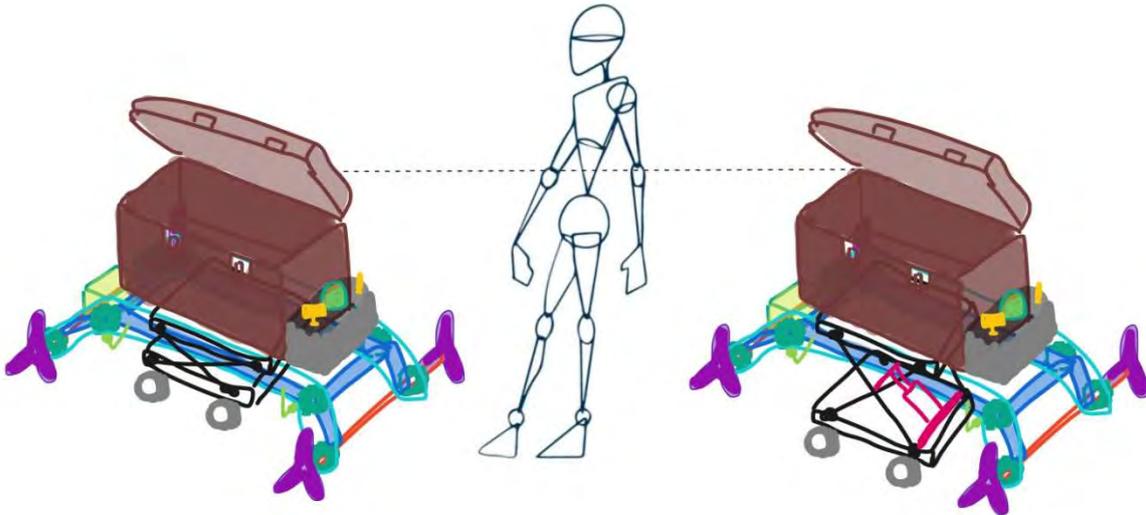


Figura 3.1 Vista isométrica del robot con línea de referencia del codo de una persona
Fuente: Elaboración propia

3.3.1 Operación

En la parte superior de la Figura 3.2, se tiene a este subiendo escaleras. Se observa que, el marco-estrella debe tener una forma adecuada (tamaño, puntas de estrella), para superar las escaleras y que el chasis con ruedas omnidireccionales debe replegarse correctamente, para que este no interfiera durante el desplazamiento en escaleras. En la parte inferior de la Figura 3.15, se puede ver que el robot se estaciona al costado de la puerta del departamento del usuario, de este modo no se obstaculiza y se permite hacer la descarga de objetos a una altura adecuada para el usuario.

Por otro lado, para la carga de objetos, el robot estará en base, un lugar seteado inicialmente, donde el robot no estorbe el tránsito y también pueda realizar el cargado de batería.

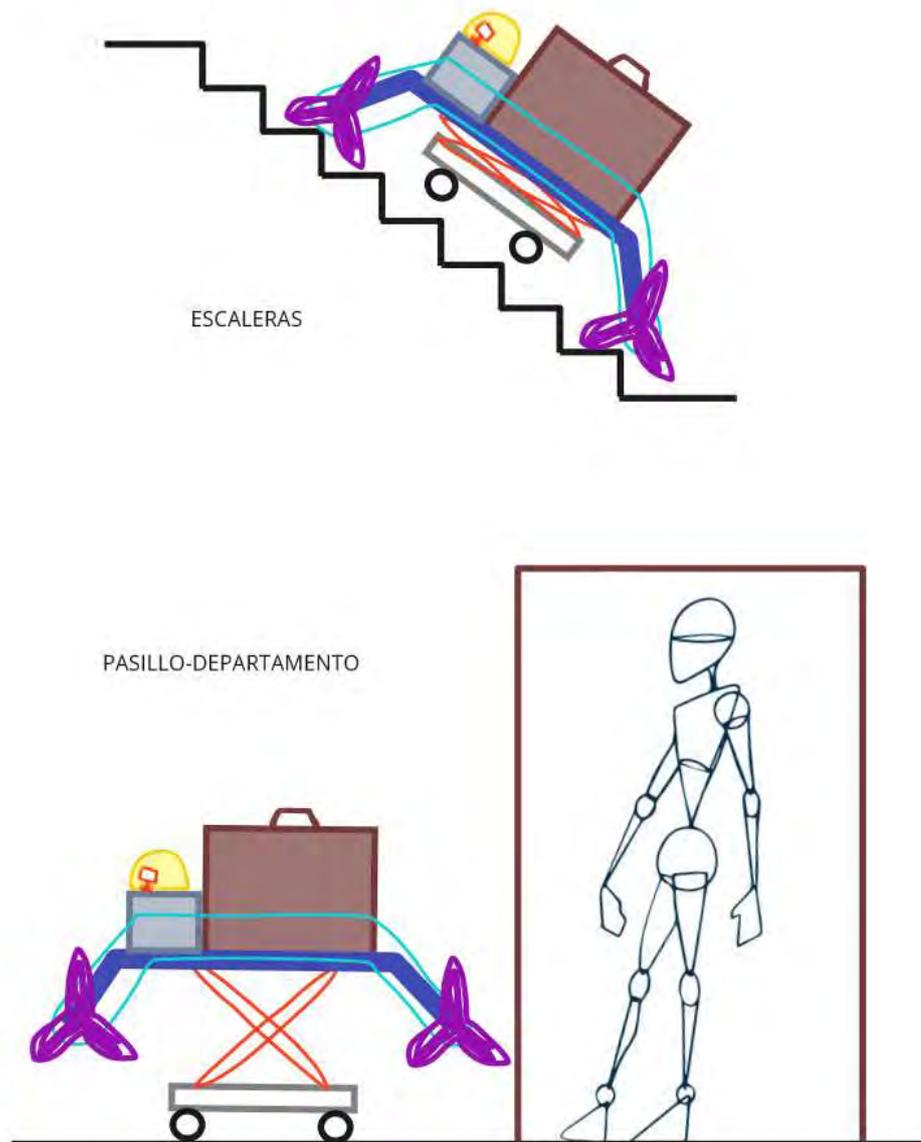


Figura 3.2 Dibujo de robot realizando su labor
Fuente: Elaboración propia

3.4 Arquitectura del sistema mecatrónico

En la Figura 3.3, se presenta la arquitectura del sistema mecatrónico, la cual tiene bloques de colores que indican los diversos sistemas de: medición, actuación, información, energía-materia, interfaz de entrada e interfaz de salida. Fuera de la línea punteada, se tiene al entorno involucrado con la operación del robot, como el entorno donde navega, la persona, los objetos a transportar, entre otros.

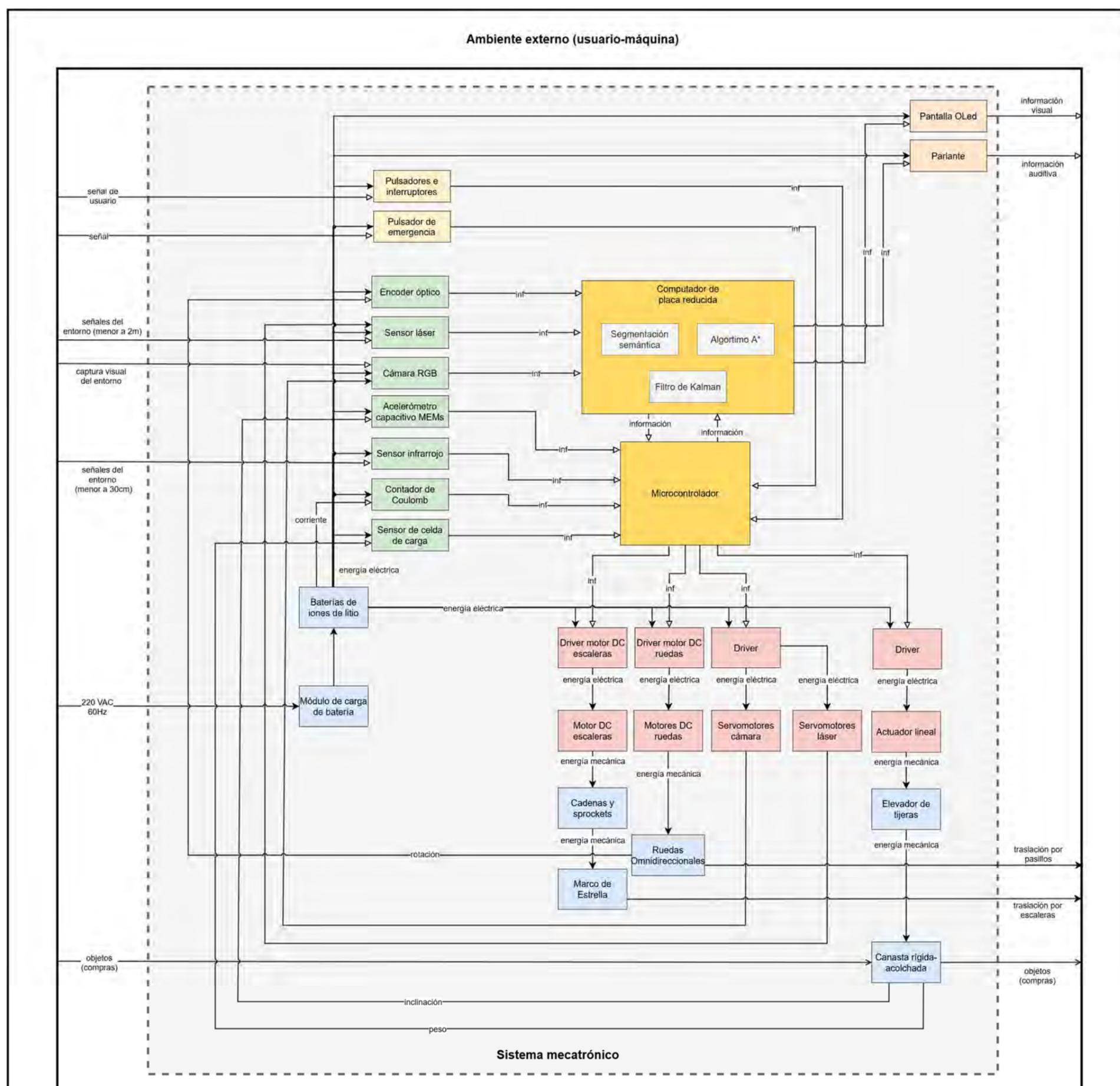


Figura 3.3 Arquitectura del sistema mecatrónico
Fuente: Elaboración propia

3.5 Arquitectura eléctrica electrónica

La Figura 3.4, esquematiza como serían las conexiones. Se puede observar que, la tensión doméstica solo es utilizada para la carga del robot; por otro lado, se subdividió 2 niveles de tensión para el robot, pues se considera una separación de los componentes de actuación que requieren mayor potencia y aparte los componentes tanto de medición como de control. Además, se agrupó a ciertos sensores como actuadores según las funciones que cumplen, para un mayor entendimiento.

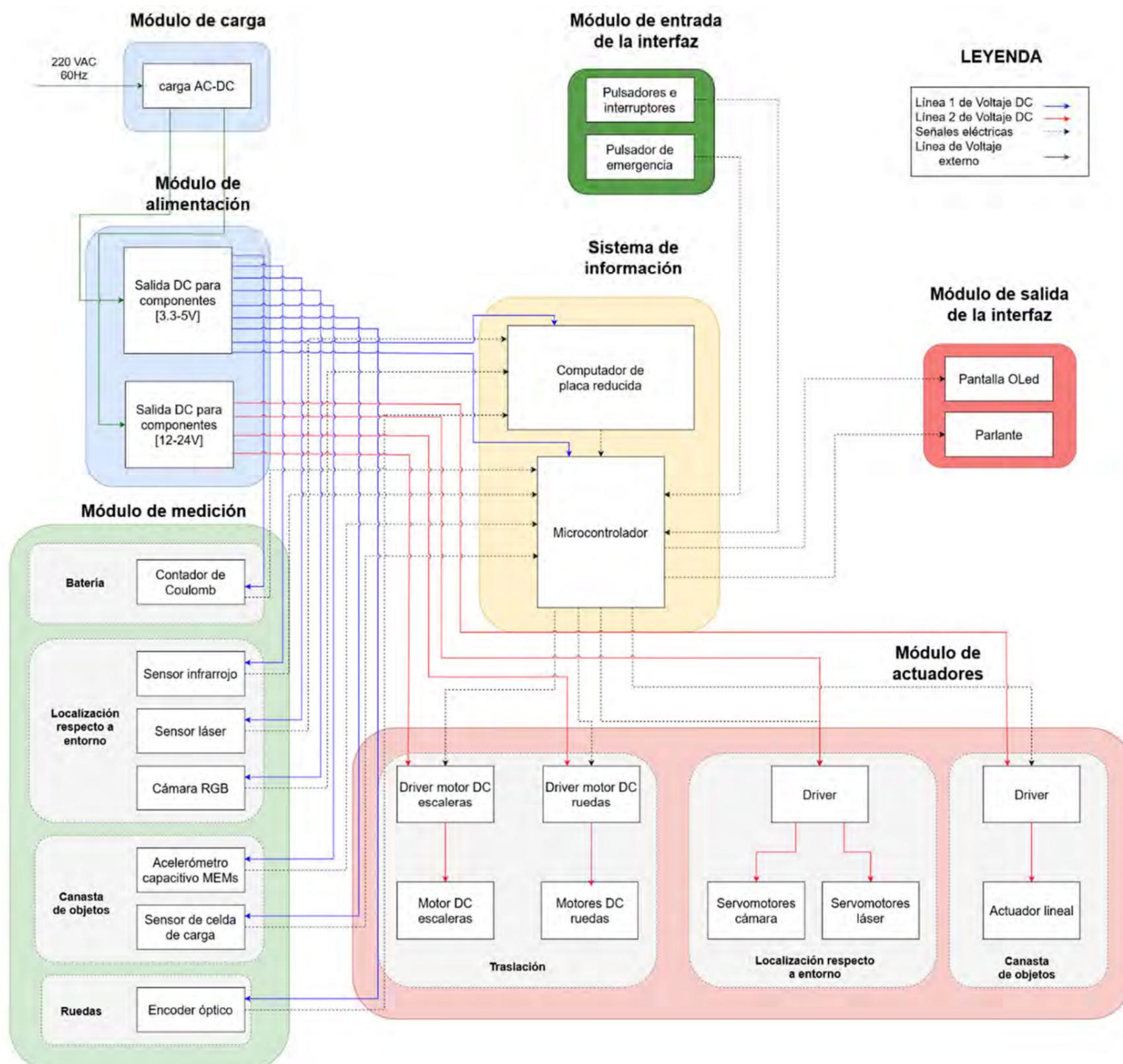


Figura 3.4 Arquitectura eléctrica - electrónica
Fuente: Elaboración propia

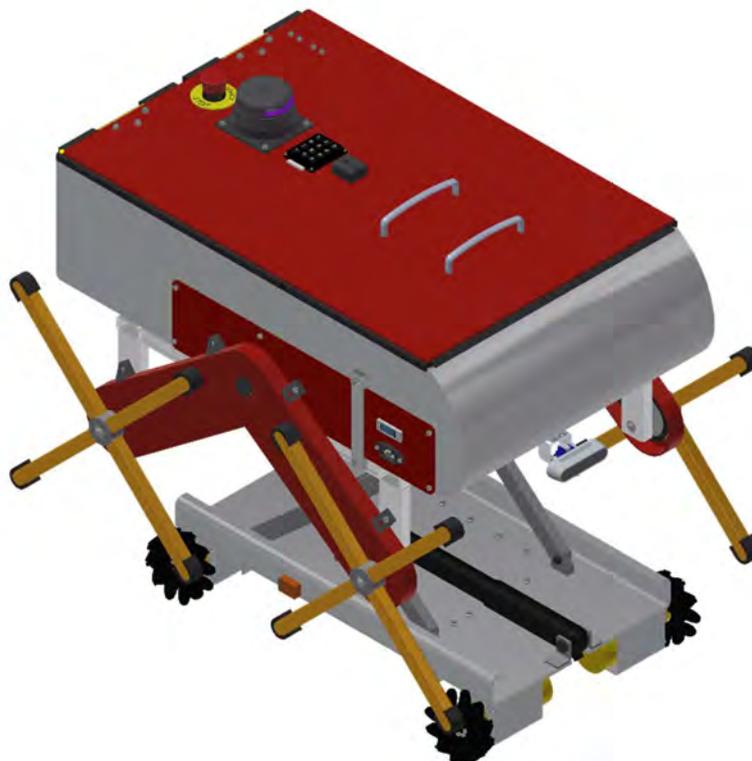
CAPÍTULO 4

DISEÑO INTEGRADOR

En el presente capítulo, se desarrolla el diseño ingenieril del robot móvil autónomo. Se dividió en 4 subsistemas, que involucran parte mecánica, eléctrica-electrónica y de programación; estos son los siguientes:

- a) Subsistema de locomoción: presenta el diseño realizado para la locomoción usada para pasillos y la locomoción diseñada para escaleras.
- b) Subsistema de caja electrónica: consiste en hardware de control, medición y potencia.
- c) Subsistema de interacción con el usuario: se detalla la interacción con un keypad y un altavoz.
- d) Subsistema de navegación y control: expone los diferentes algoritmos para otorgar autonomía al robot y modelos matemáticos para realizar los lazos de control.

En la Figura 4.1, se tiene la vista isométrica del robot con todos sus subsistemas integrados cuando tiene las ruedas desplegadas o usa la locomoción por pasillos.



*Figura 4.1 Vista isométrica del producto final
Fuente: Propia*

En el lado izquierdo de la Figura 4.2, se tiene al robot a su altura máxima para que la persona pueda cargar y descargar sus productos de manera ergonómica. Aquí el robot se moviliza utilizando ruedas mecanum y se eleva a la máxima altura por medio de un elevador de tijeras. Al lado derecho de la Figura 4.2, se observa al robot subiendo las escaleras de tramo recto, cabe resaltar que el mecanismo de tijeras se encuentra totalmente retraído para que las ruedas no choquen con los peldaños. Respecto a bajar escaleras, la operación es la misma que al subirlas, el frente del robot siempre está hacia donde mira la cámara de profundidad.

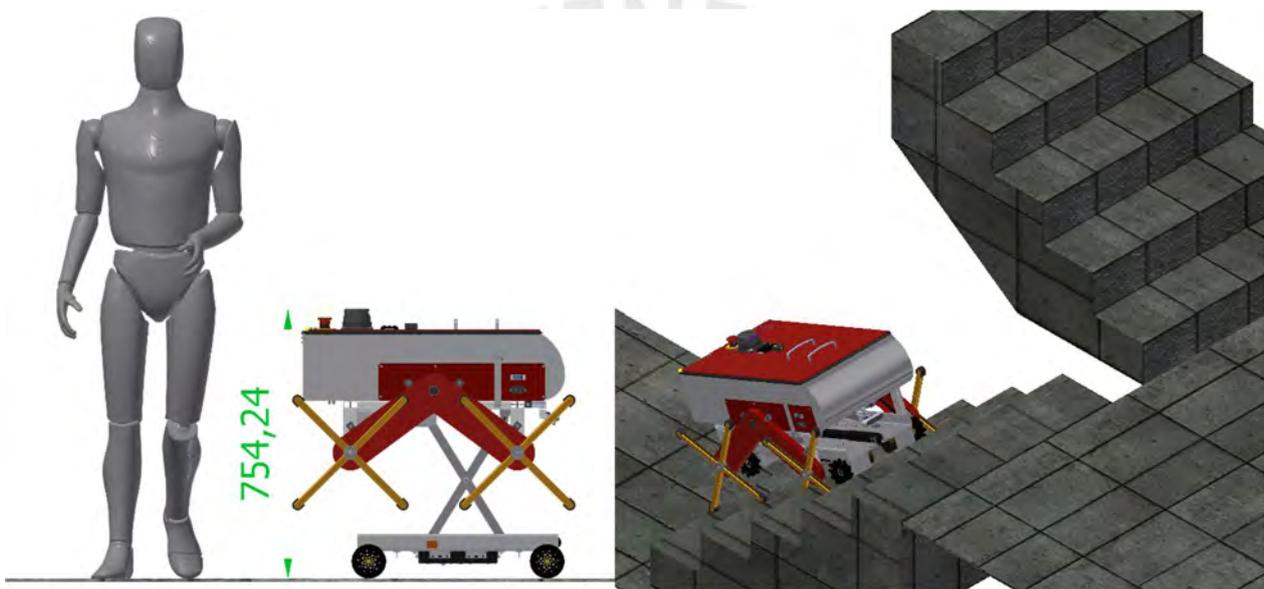


Figura 4.2 Izquierda: vista del robot con una persona. Derecha: vista del robot subiendo escaleras
Fuente: Propia

Las características del robot son las siguientes:

- Volumen máximo para productos: 37.14 dm^3 .
- Tamaño del robot: $75.4 \times 78.7 \times 55.7 \text{ cm}$ (alto \times largo \times ancho) cuando está en posición ergonómica.
- Carga útil máxima: 15 Kg .
- Velocidad máxima: $0.75 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.
- Autonomía: 3 h .
- Sistema de seguridad:
 - Balanza interna.

- Botón de parada de emergencia.
- Sensores de proximidad.
- Visión RGBD
- Algoritmos adecuados según tipo de locomoción.

Finalmente, en la Figura 4.3 se observa el diagrama de flujo de toda la operación que realiza el robot que sigue de manera general este flujo: ser cargado con productos, tener asignado por el usuario el departamento al que debe transportar los objetos, transportar la carga dentro del edificio alternando el tipo de locomoción dependiendo donde se encuentre, arribar al destino, esperar a que se descarguen los productos, recibir indicación de retorno por parte del usuario, regresar a su base y esperar a que otra persona le asigne la tarea de transportar sus productos.



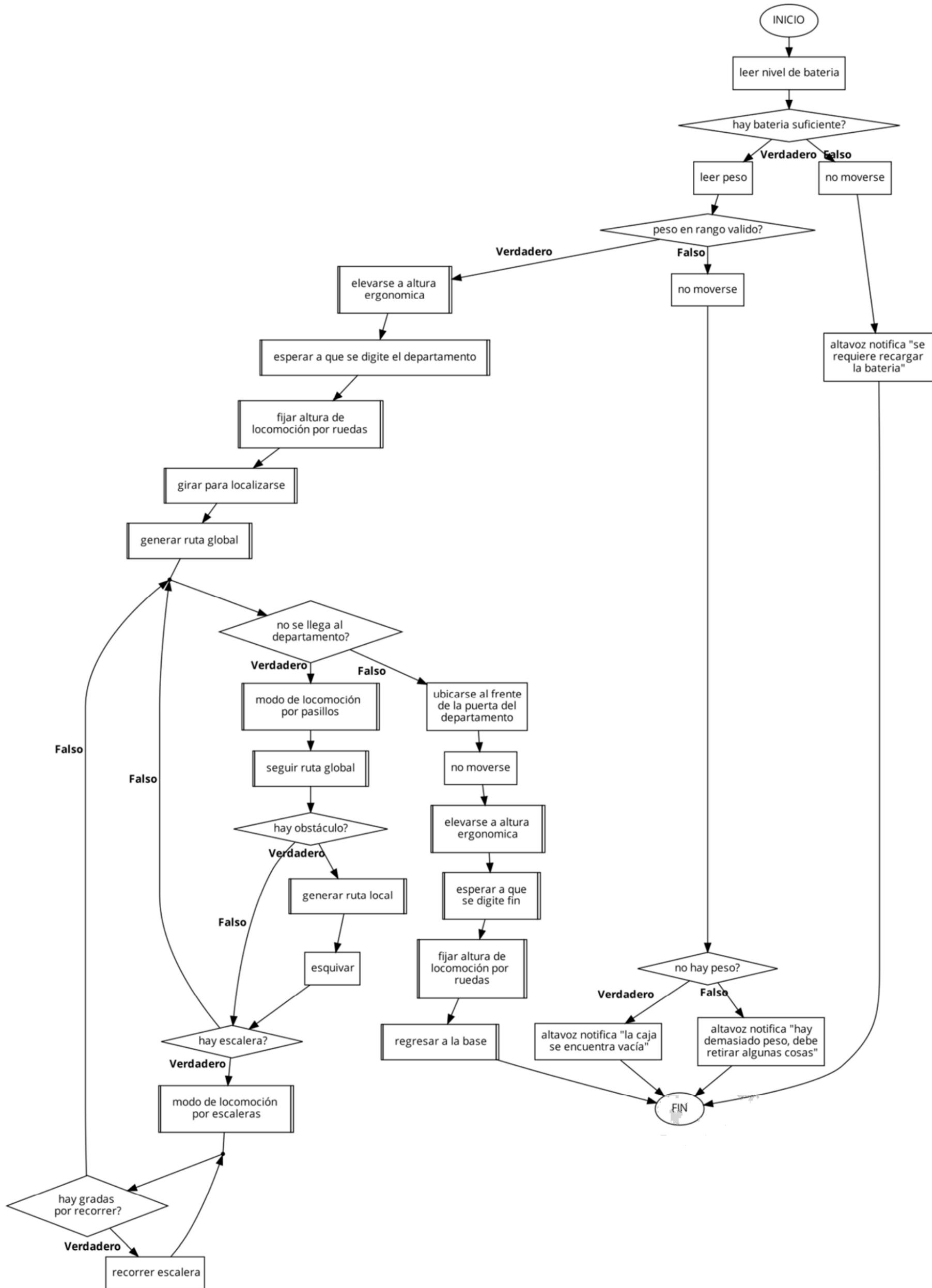


Figura 4.3 Diagrama de flujo del robot
Fuente: Propia

4.1 Subsistema de locomoción

Se componen de 2 partes, la locomoción por pasillos que se realiza con las ruedas omnidireccionales y la locomoción por escaleras que emplea los marcos-estrellas.

4.1.1 Locomoción por pasillos

Se subdivide el diseño en el chasis con ruedas omnidireccionales y el mecanismo de tijeras.

A. Chasis de ruedas omnidireccionales

a. Dimensionamiento de planchas metálicas

Se hizo un predimensionamiento con el libro de Roark's Formulas for Stress and Strain [30], con el cual, se verificó que el chasis no fallase por resistencia y que la deformación fuese de la magnitud de las micras. Se tomó como partida apoyos empotrados del lado largo de la plancha, porque se tiene a las llantas que soportan aquellos lados, esto se ve en la Figura 4.4.

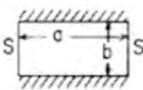
<p>6. Rectangular plate; two long edges fixed, two short edges simply supported</p> 	<p>6a. Uniform over entire plate</p>	<p>(At center of long edges) $\sigma_{max} = \frac{-\beta qb^2}{t^2}$</p> <p>(At center) $y_{max} = \frac{-\alpha qb^4}{Et^3}$</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>a/b</th> <th>1</th> <th>1.2</th> <th>1.4</th> <th>1.6</th> <th>1.8</th> <th>2</th> <th>∞</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>β</td> <td>0.4182</td> <td>0.4626</td> <td>0.4860</td> <td>0.4968</td> <td>0.4971</td> <td>0.4973</td> <td>0.500</td> </tr> <tr> <td>α</td> <td>0.0210</td> <td>0.0243</td> <td>0.0262</td> <td>0.0273</td> <td>0.0280</td> <td>0.0283</td> <td>0.0285</td> </tr> </tbody> </table>	a/b	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	∞	β	0.4182	0.4626	0.4860	0.4968	0.4971	0.4973	0.500	α	0.0210	0.0243	0.0262	0.0273	0.0280	0.0283	0.0285
a/b	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	∞																			
β	0.4182	0.4626	0.4860	0.4968	0.4971	0.4973	0.500																			
α	0.0210	0.0243	0.0262	0.0273	0.0280	0.0283	0.0285																			

Figura 4.4 Expresiones utilizadas para predimensionar plancha metálica

Fuente: [30]

Se utilizó como material el Aluminio 6061, el cual es soldable. En las siguientes Ecuaciones, se observan los resultados siendo el primero el esfuerzo máximo en MPa y el segundo la deformación en mm. Los resultados del predimensionamiento de la plancha con espesor de 5 mm son adecuados dado que la deformación de la plancha está en el orden de las micras.

$$\sigma_{max} = \frac{-\beta qb^2}{t^2}. \quad (1)$$

$$E_{aluminio} = 70000 \text{ MPa},$$

$$\begin{aligned}
 v &= 0.33, \\
 \sigma_{fluencia} &= 225 \text{ MPa}, \\
 a &= 424 \text{ mm}, b = 300 \text{ mm}, \\
 \alpha &= 424 \text{ mm}, \beta = 300 \text{ mm}, \\
 peso &= 60 \text{ kg}, \\
 q &= \frac{9.8pe}{ab}, \\
 \sigma_{max} &= 20.21 \text{ MPa}.
 \end{aligned}$$

Para la deformación máxima de la plancha se realiza lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 \gamma_{max} &= -\frac{\alpha qb^4}{Et^3}, \\
 \gamma_{max} &= 0.00441 \text{ mm}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

b. Selección de motores

En la Figura 4.5, se muestra el DCL de una rueda, la cual carga $\frac{1}{4}$ del peso total del robot. Con ello, se predimensionó el torque requerido por un motor.

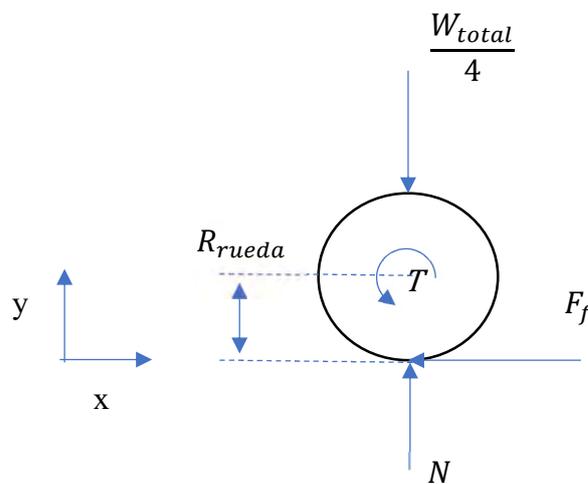


Figura 4.5 DCL para una rueda
Fuente: Propia

$$\begin{aligned}
 \sum \tau &= 0, \\
 \tau &= R\mu_s N, \\
 R &= 96 \text{ mm}, \\
 N &= 61.25,
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$w_{total} = 60 \text{ kg},$$

$$\tau = (96\text{mm})0.3(61.25),$$

$$\tau = 4.23 \text{ Nm}.$$

Con esto, se selecciona la rueda mecanum de 96mm, en la Tabla 4.1 se observan algunas disponibles en el mercado.

Tabla 4.1 Comparación de ruedas comerciales
Elaboración propia

Características	Rueda de 100mm	Rueda de 96mm	Rueda de 96mm delgada
Imagen referencial			
Número de rollers	9	9	10
Capacidad de carga [kg]	30	90	28
Precio de 4 ruedas [soles]	716.34	863.4	533.39
Referencia	enlace	enlace	enlace

Para determinar las RPM que deben tener las ruedas, se realizó el siguiente cálculo.

$$\omega R = v \quad (4)$$

$$v = 1.5 \frac{m}{s},$$

$$\frac{\pi X_{rpm}}{30} \frac{96(10^{-3})}{2} = 1.5,$$

$$X_{rpm} = 298 \text{ RPM}.$$

Con esto se selecciona el motor adecuado, en la Tabla 4.2 se puede ver los motores que se compararon y resaltado el elegido. Los principales criterios de selección fueron el torque y las RPM para cumplir con los requerimientos de diseño. El Servo Motor NEMA23 cumple con las características requeridas.

Tabla 4.2 Comparación de motores para chasis de ruedas

Elaboración propia

Características	Servomotor con imán permanente EMS0-W1248-4K-1-D0	Integrated DC Servo High Torque Encoder DC Servo Motor 300RPM w/ UART/I2C/PPM Drive (RMCS-2205)	Integrated Servo System CPM-SDSK-2341S-RLN
Imagen referencial			
Torque [kg cm]	20.4	30	12.23
RPM	2000	300	590
Voltaje [V]	24	12	24
Consumo de corriente con carga [A]		7,5	
Eje [mm]	8	6	9.53
Precio [soles]	1818.58	306.15	1377
Referencia	enlace	enlace	enlace

La ventaja del motor seleccionado es que ya incluye un encoder y controlador en sí mismo. Otra ventaja es que no se requerirá de un driver, puesto que se puede comandar este motor por comandos, tanto UART como I2C.

c. Resultado 3D

En la Figura 4.6, se aprecia el chasis para las ruedas omnidireccionales, este tiene pliegues en los laterales para hacer de guía a los rodajes, que tienen las partes móviles del mecanismo de tijeras. También, se observa el resultado del diseño del chasis y de los alojamientos para las ruedas omnidireccionales. Nótese que hacia la parte interna de los costados de los motores hay perfiles T, estos refuerzos fueron colocados para disminuir más la flexión en esa dirección.

Cabe mencionar que, en la parte inferior de este chasis del robot, se encuentra una caja que contiene parte de la electrónica del robot; las partes, uniones y soldaduras de este ensamble del chasis puede encontrarse en el Anexo E.

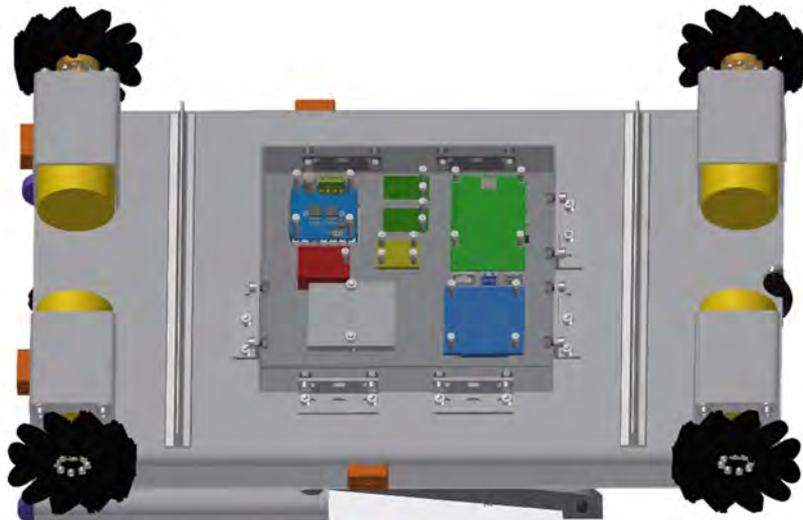


Figura 4.6 Vista inferior del chasis con ruedas omnidireccionales
Fuente: Propia

B. Mecanismo de tijeras

a. Selección de actuador lineal

Se siguió el paper de Saxena [31], del cual se extrajo una expresión generalizada para el dimensionamiento del mecanismo accionador de fuerza. En la Figura 4.7, se tiene una configuración especial la cual fue escogida porque era simple y requería menor fuerza comparada a otra probada. Para que la fuerza no sea excesiva, el ángulo no puede ser muy cercano a 0° .

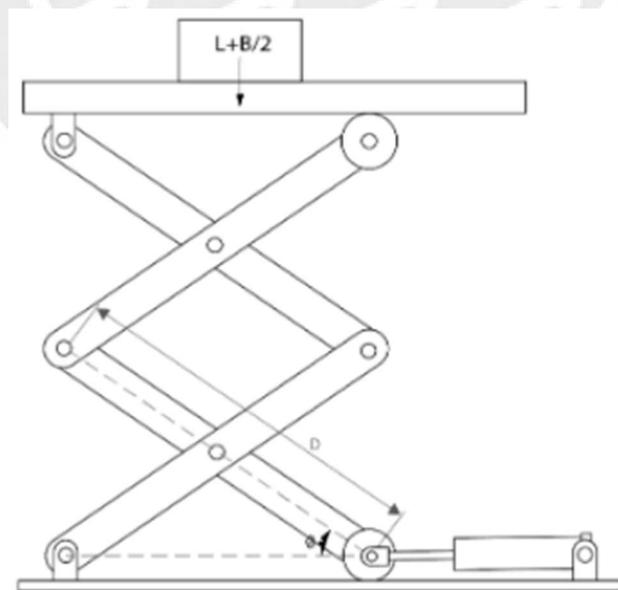


Figura 4.7 Posición del actuador en el mecanismo
Fuente: [31]

F : fuerza del actuador, (5)

L : carga,

B : peso del mecanismo,

n : número de etapas del mecanismo,

$$F = \left(L + \frac{B}{2} \right) \frac{n}{\tan(\theta)}.$$

El diseño realizado tendrá un ángulo aproximado de 7° cuando este plegado el mecanismo, mientras que se tiene un ángulo mínimo de 25° cuando se despliega y carga la mitad superior del robot. La fuerza total requerida para lograr actuar el mecanismo es de 670N, para la condición del ángulo que permite cargar el cuerpo superior del robot con masa de 30 kg (ver Figura 4.8); posteriormente, la fuerza requerida será menor.

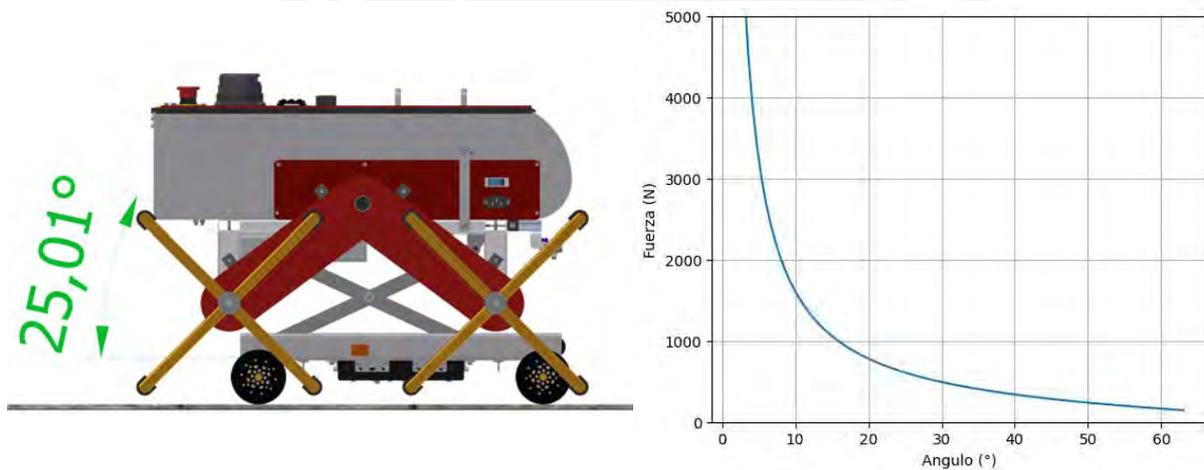


Figura 4.8 Gráfico de fuerza requerida por el actuador en función al ángulo en radianes
Fuente: Propia

Con la fuerza requerida por el para accionar el mecanismo, se selecciona un actuador lineal de la Tabla 4.3, el MD24A050-0200LXP2NNSD cumple con ejercer los 670N y tiene una carrera de 20cm. Además, funciona a 24V y tiene lectura para la posición del actuador.

Tabla 4.3 Comparación de actuadores lineales

Elaboración propia

Características	Linear Actuator PA-03	MD24A050-0200LXP2NNSD	Waterproof Electric Linear Actuator IP67M
Imagen referencial			
Fuerza [N]	888.86	500	800.1
Lectura de posición	-	Sí	-
Voltaje [V]	12	24	12
Consumo de corriente con carga [A]	9	7.5	3.7
Carrera [mm]	200	200	200
Precio [soles]	502.69	1395.54	1078.3
Enlace	enlace	enlace	enlace

b. Verificación de resistencia de marcos del mecanismo

En la Figura 4.9, se presenta el diagrama de cuerpo libre de los eslabones del mecanismo, con esto se busca refrendar la fuerza del actuador requerida y conocer las otras fuerzas, para verificar por resistencia los elementos que conforman al mecanismo.

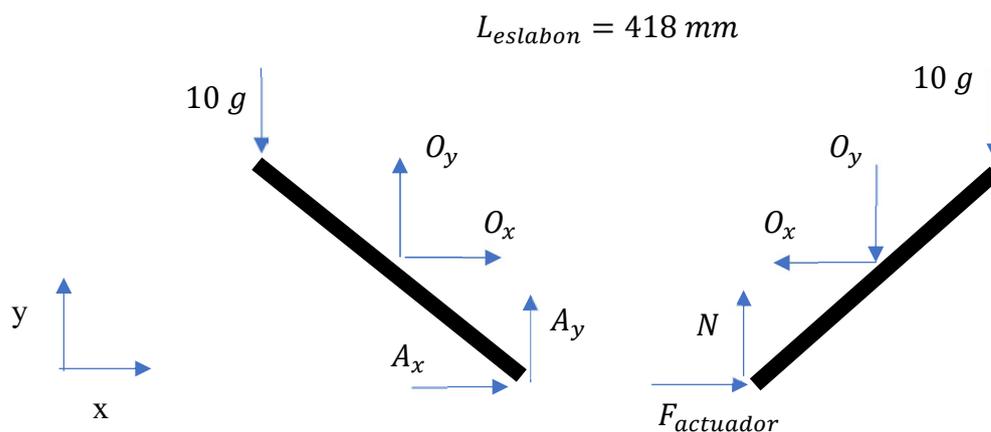


Figura 4.9 DCL de marco de mecanismo de tijeras

Fuente: Propia

Para el eslabón izquierdo:

(6)

$$\begin{aligned}\sum F_x: O_x + A_x &= 0, \\ \sum F_y: O_y + A_y &= 10 \text{ g}, \\ \sum M_o: \frac{A_x \sin(6) L}{2} + \frac{A_y \cos(6) L}{2} &= -\frac{10 \text{ g} \cos(6) L}{2},\end{aligned}$$

Para el eslabón derecho:

$$\begin{aligned}\sum F_x: -O_x + F_{\text{actuador}} &= 0, \\ \sum F_y: -O_y + N &= 10 \text{ g}, \\ \sum M_o: \frac{F_{\text{actuador}} \sin(6) L}{2} + \frac{N \cos(6) L}{2} &= -\frac{10 \text{ g} \cos(6) L}{2},\end{aligned}$$

Teniendo como resultados:

$$\begin{aligned}O_x &= 713 \text{ N}, \\ A_x &= -713 \text{ N}, \\ A_y &= 219 \text{ N}, \\ O_y &= -121 \text{ N}, \\ N &= -23 \text{ N}, \\ F_{\text{actuador}} &= 713 \text{ N}.\end{aligned}$$

Para seleccionar un perfil de aluminio se procedió con el siguiente calculo:

w : módulo de sección

(7)

$$\begin{aligned}\frac{M_f}{\sigma_{\text{fluencia}}} &\leq w, \\ \frac{23.99 \text{ Nm}}{225(10^6)} &\leq w, \\ 0.106 \text{ cm}^3 &\leq w.\end{aligned}$$

Con esto, se escogió un perfil rectangular de 25x15x1.5.

c. Verificación de pandeo de marcos del mecanismo

En la Figura 4.10, se observa resaltado un marco sometido a cargas de compresión, este se encuentra en el caso de empotrado-articulado.

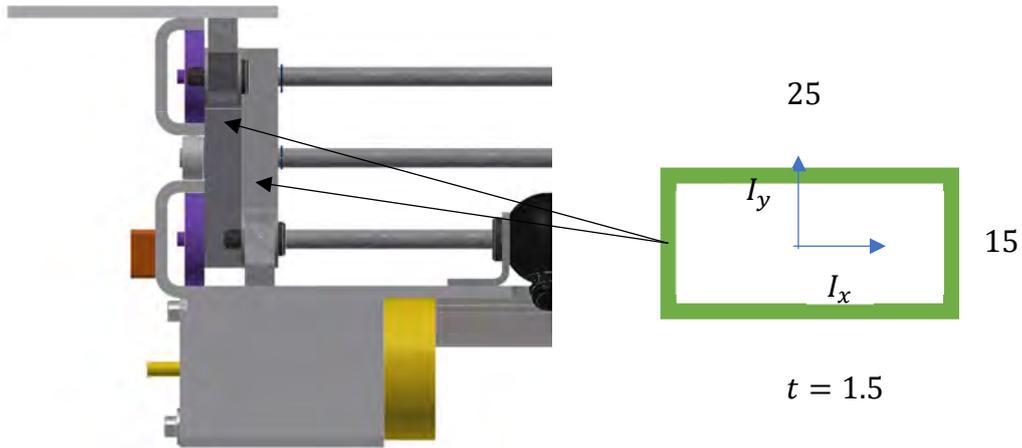


Figura 4.10 Marco del mecanismo de tijeras
Fuente: Propia

$$\begin{aligned}
 I_x &= 0.38 \text{ cm}^4, i_x = 0.5 \text{ cm}, w_x = 0.5 \text{ cm}^3, \\
 I_y &= 0.88 \text{ cm}^4, i_y = 0.8 \text{ cm}, w_y = 0.7 \text{ cm}^3, \\
 \lambda_y &= \frac{L_{\text{eq:articulado-articulado}}}{i_y} \leq 60 \text{ ok!},
 \end{aligned} \tag{8}$$

No se requiere analizar pandeo en ese lado

$$\lambda_x = \frac{L_{\text{eq:empotrado-monodeslizant}}}{i_x} \leq 60 \text{ no!},$$

Se analiza el pandeo en ese lado

$$\sigma_{\text{euler}} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2},$$

$$\sigma_{\text{euler}@\lambda=100} = 69,$$

Siguiendo el método Europeo se construye el diagrama y se procede a realizar lo siguiente:

$$\sigma = \frac{F}{A} \leq \frac{\sigma_{\text{pandeo}}}{FS},$$

$$\lambda_x = \frac{40.8}{0.5} = 80,$$

$$\sigma = \frac{736 \text{ N}}{111 \text{ mm}^2} \leq \frac{107.9}{FS},$$

$$FS = 16 \text{ ok!}.$$

d. Resultado 3D

En la Figura 4.11, se incluyó el mecanismo de elevación al chasis de ruedas, se puede ver las posiciones límites necesarias para el funcionamiento.

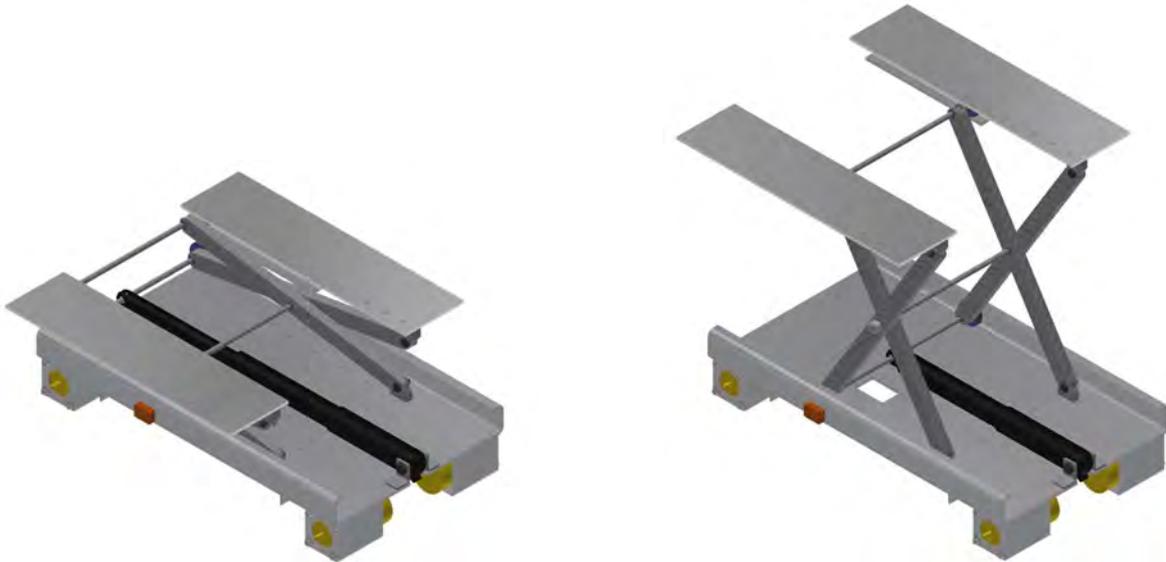


Figura 4.11 Izquierda: Vista isométrica del elevador de tijeras extendido. Derecha: Vista isométrica del elevador de tijeras retraído
Fuente: Propia

4.1.2 Locomoción por escaleras

Se lista lo realizado para el diseño del chasis para los marcos tetra-estrella.

a. Estructura del chasis

Se presenta en la Figura 4.12 la forma constructiva del chasis, donde sobre todas las superficies de la parte superior reposa un peso máximo de 20 kg. Se verificó mediante el software ANSYS que este diseño no fuera a fallar por resistencia y deformación, esto se encuentra en el Anexo D.2.1. El chasis está compuesto de perfiles metálicos 20x40 unidos por medio de soldadura, las posiciones de los agujeros e indicaciones de soldadura se encuentran en el Anexo E. Por otro lado, los cálculos de soldadura están en el Anexo D8.2.



Figura 4.12 Vista isométrica del chasis de marcos-estrellas
Fuente: Propia

b. Diseño de los marcos-estrellas

Para determinar las longitudes adecuadas para el diseño, se tuvo en cuenta las dimensiones estándares de las escaleras, que son de 25 cm el paso y 18 cm el contrapaso. Con ello y análisis geométrico, se determinó que lo más conveniente era emplear 4 puntas en la estrella, de modo que el punto donde tocase la punta de estrella se repita en la siguiente grada. Sabiendo que siempre habrá algún pequeño resbalamiento, se dio una longitud que le permita al robot siempre permanecer en la grada. En la Figura 4.13, se puede apreciar los detalles geométricos a los que se hizo referencia, se observa que la distancia de una punta de estrella es de 217.83 mm.

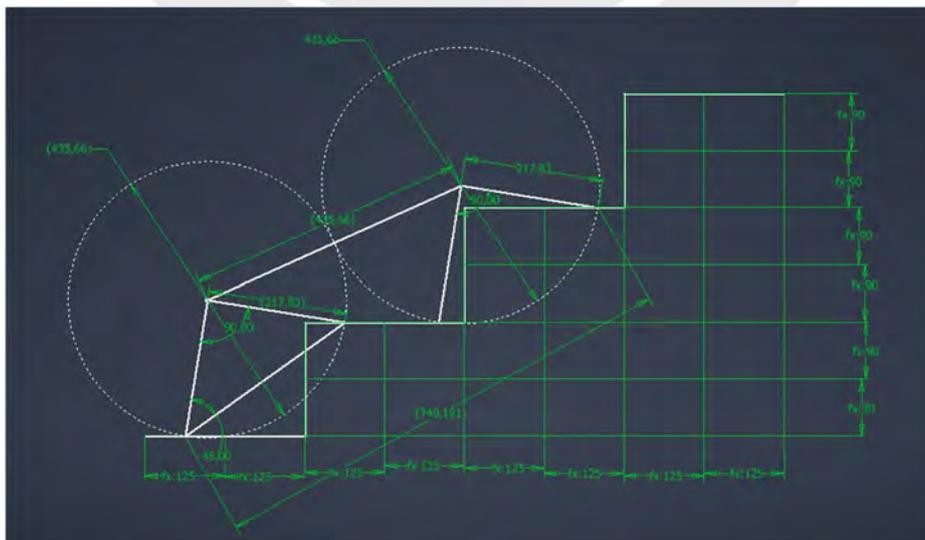


Figura 4.13 Geometría considerada en el diseño
Fuente: Propia

Sea la distancia entre puntas de estrella, la hipotenusa de las dimensiones estándares de una escalera de tramo recto, para una configuración de 4 estrellas se tiene:

$$L_{\text{punta de estrella}} = \sqrt{25^2 + 18^2} \sin(45) \text{ cm.} \quad (9)$$

Para el ascenso o descenso de las escaleras siempre hay 2 puntos en contacto con las gradas, que son como pivotes, de esta observación se utilizó como equivalente al mecanismo de 4 barras. Con esta perspectiva, se procedió a determinar el torque requerido por los marcos-estrellas del robot y las reacciones, que se experimentan durante el traslado por las escaleras. Para esto se realizó el análisis cinemático y cinético del mecanismo de 4 barras, que en este caso es un paralelogramo.

- Cinemática del mecanismo para escaleras

En la Figura 4.14, se muestra al lado derecho el DCL del mecanismo para subir escaleras, mientras que en el lado izquierdo se aprecia la trayectoria de los puntos A y B.

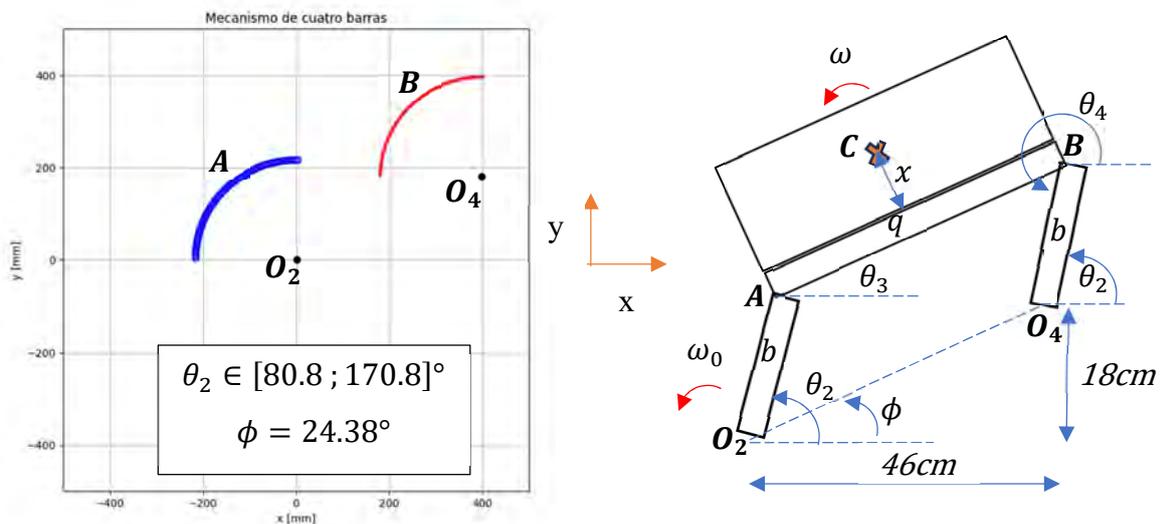


Figura 4.14 Diagrama del mecanismo para escaleras
Fuente: Propia

Las variables tienen los siguientes valores:

$$\begin{aligned} b &= 217 \text{ mm}, q = 460 \text{ mm}, x = 158 \text{ mm}, \\ \phi &= 24.38^\circ, \omega_0 = 3.35 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \alpha_0 = 3.35 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \end{aligned} \quad (10)$$

Se detallan los vectores y relaciones de ángulos:

$$\overline{r_{A|O2}} = b \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) \end{bmatrix}, \overline{r_{O4|B}} = b \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) \\ \sin(\theta_4) \end{bmatrix}, \overline{r_{B|A}} = b \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) \\ \sin(\theta_3) \end{bmatrix},$$

$$\overline{r_{O4|B}} + \overline{r_{B|A}} + \overline{r_{A|O2}} = \overline{r_{O4|O2}},$$

$$\theta_4 - \theta_2 = 180^\circ,$$

$$\theta_3 = \phi,$$

Para las velocidades corresponden las siguientes ecuaciones:

$$\overline{v_{A|O2}} = \overline{v_{O2}} + \widehat{\omega}_0 \times \overline{r_{A|O2}},$$

$$\overline{v_{B|O4}} = \overline{v_{O4}} + \widehat{\omega}_0 \times \overline{r_{B|O4}},$$

$$\overline{v_B} = \overline{v_A} + \widehat{\omega} \times \overline{r_{B|A}},$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -\omega_0 \\ \omega_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \cos(\theta_2) \\ b \sin(\theta_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_0 \\ \omega_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \cos(\theta_2) \\ b \sin(\theta_2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_0 \\ \omega_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \cos(\theta_3) \\ q \sin(\theta_3) \end{bmatrix},$$

$$\omega = 0 \rightarrow \text{traslación pura!!} \rightarrow \overline{v_A} = \overline{v_B} = \overline{v_C}.$$

Para las aceleraciones corresponden las siguientes ecuaciones:

$$\overline{a_{A|O2}} = \overline{a_{O2}} + \widehat{\alpha}_0 \times \overline{r_{A|O2}} - \omega_0^2 \overline{r_{A|O2}},$$

$$\overline{a_{B|O4}} = \overline{a_{O4}} + \widehat{\alpha}_0 \times \overline{r_{B|O4}} - \omega_0^2 \overline{r_{B|O4}},$$

$$\overline{a_B} = \overline{a_A} + \widehat{\alpha} \times \overline{r_{B|A}} - \omega_0^2 \overline{r_{B|A}},$$

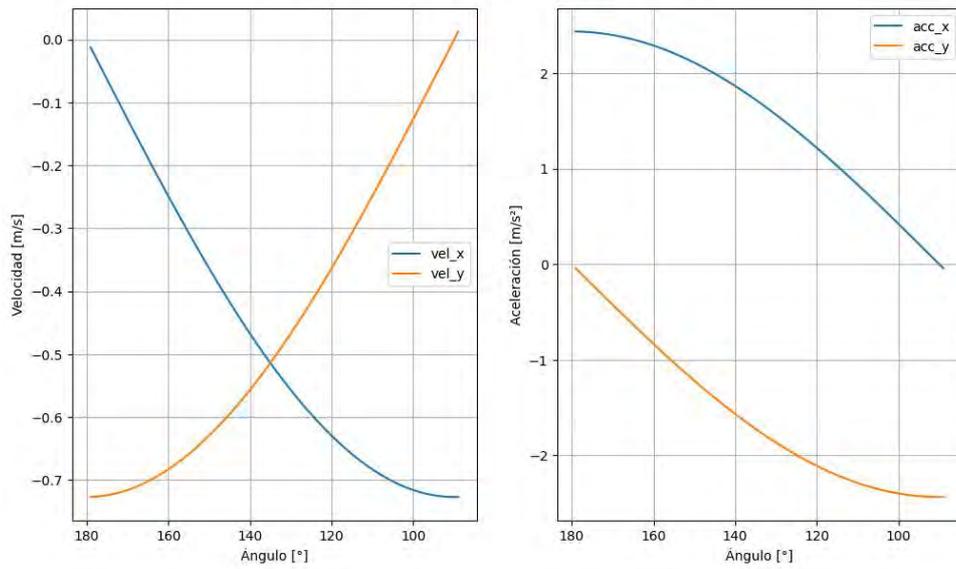
$$\widehat{\alpha}_0 \begin{bmatrix} b \cos(\theta_2) \\ b \sin(\theta_2) \end{bmatrix} - \omega_0^2 \begin{bmatrix} b \cos(\theta_2) \\ b \sin(\theta_2) \end{bmatrix}$$

$$= \widehat{\alpha}_0 \begin{bmatrix} b \cos(\theta_2) \\ b \sin(\theta_2) \end{bmatrix} - \omega_0^2 \begin{bmatrix} b \cos(\theta_2) \\ b \sin(\theta_2) \end{bmatrix} + \widehat{\alpha}_0 \begin{bmatrix} q \cos(\theta_3) \\ q \sin(\theta_3) \end{bmatrix},$$

$$\alpha = 0 \rightarrow \text{traslación pura!!} \rightarrow \overline{a_A} = \overline{a_B} = \overline{a_C}.$$

Los resultados de las velocidades y aceleraciones del mecanismo a utilizar en las escaleras se presentan en las Figuras 4.17.

Resultados de la cinemática [SUBIDA]



Resultados de la cinemática [BAJADA]

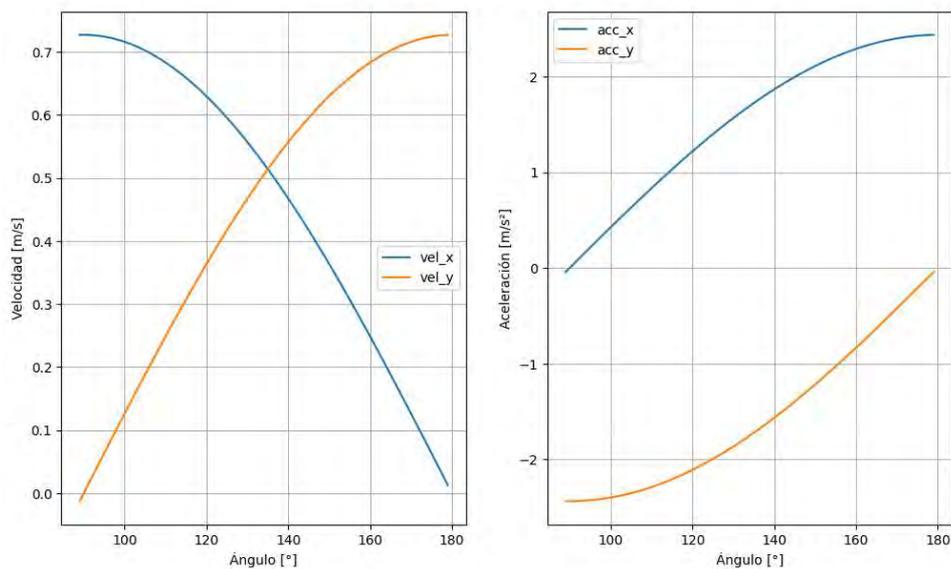


Figura 4.15 Resultados de la cinemática para el ascenso y descenso por escaleras

Fuente: Propia

- Cinética del mecanismo para escaleras

A continuación, se detallan los DCL's y las ecuaciones del mecanismo de 4 barras.

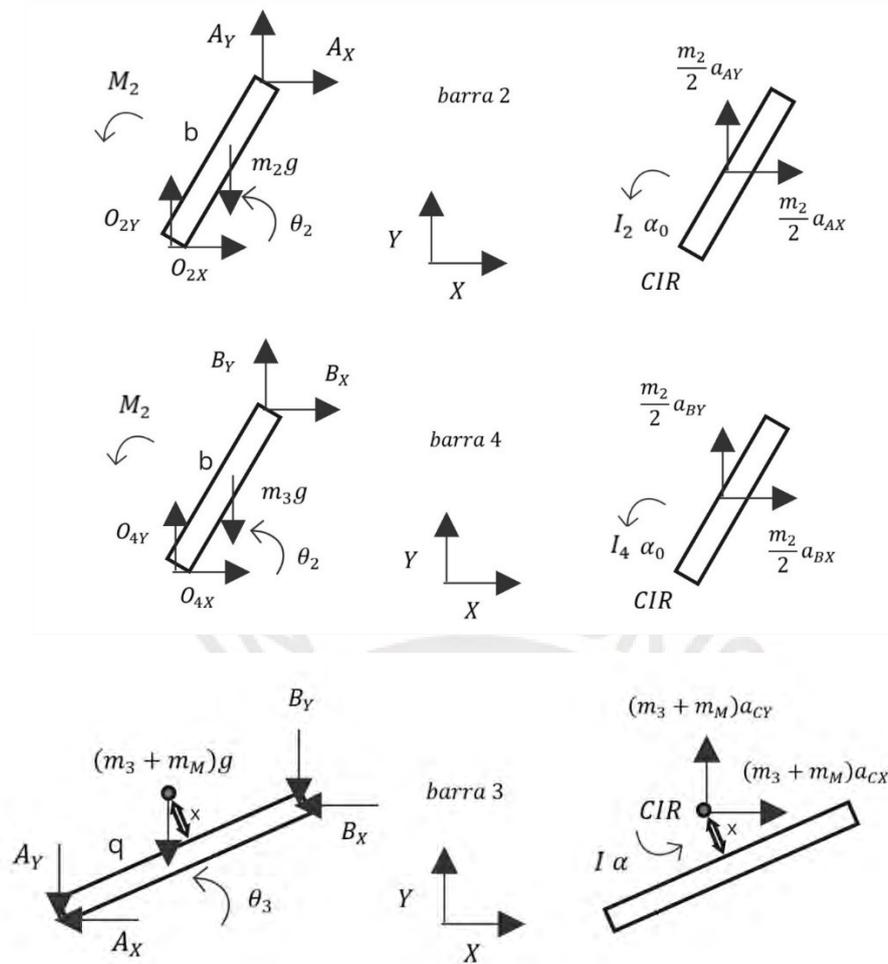


Figura 4.16 Diagrama de cuerpo libre del mecanismo de 4 barras
Fuente: Propia

Las variables tienen los siguientes valores:

$$m_2 = 0.1355 \text{Kg}, m_3 = 1.657 \text{Kg}, \quad (11)$$

$$m_M = 58 \text{Kg},$$

Cálculo de inercias:

$$I_2 = \frac{m_2 b^2}{3} = I_4,$$

$$I_C = I_{G3} + x^2 M \rightarrow \frac{m_3 q^2}{12} + x^2 M,$$

Dinámica de sólido rígido:

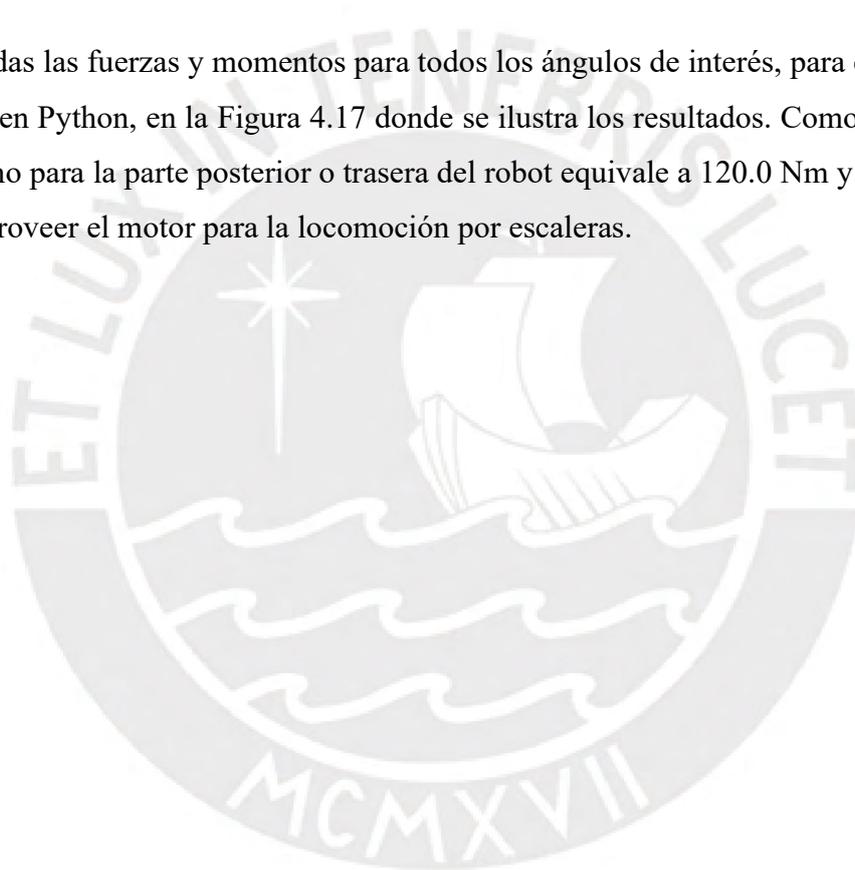
$$O_{2x} + A_x = \frac{m_2 a_x}{2},$$

$$O_{2y} + A_y - m_2 g = \frac{m_2 a_y}{2},$$

$$M_2 - b \sin(\theta_2) A_x + b \cos(\theta_2) A_y = I_2 \alpha + \frac{m_2 g \cos(\theta_2) b}{2},$$

$$\begin{aligned}
B_x + O_{4x} &= \frac{m_2 a_x}{2}, \\
B_y + O_{4y} - m_2 g &= \frac{m_2 a_y}{2}, \\
M_2 - b \sin(\theta_2) B_x + b \cos(\theta_2) B_y &= I_4 \alpha + \frac{m_2 g \cos(\theta_2) b}{2}, \\
-A_x - B_x &= (m_3 + m_M) a_x, \\
-A_y - B_y - (m_3 + m_M) g &= (m_3 + m_M) a_y, \\
-L \sin(\beta + \theta_3) A_x + L \cos(\beta + \theta_3) A_y + L \sin(\beta - \theta_3) B_x - L \cos(\beta - \theta_3) B_y \\
&= 0.
\end{aligned}$$

Se calculó todas las fuerzas y momentos para todos los ángulos de interés, para esto se realizó un programa en Python, en la Figura 4.17 donde se ilustra los resultados. Como se observa el torque máximo para la parte posterior o trasera del robot equivale a 120.0 Nm y es este torque el que debe proveer el motor para la locomoción por escaleras.



Resultados de la cinética [SUBIDA] en función del ángulo[°] del mecanismo

Resultados de la cinética [BAJADA] en función del ángulo[°] del mecanismo

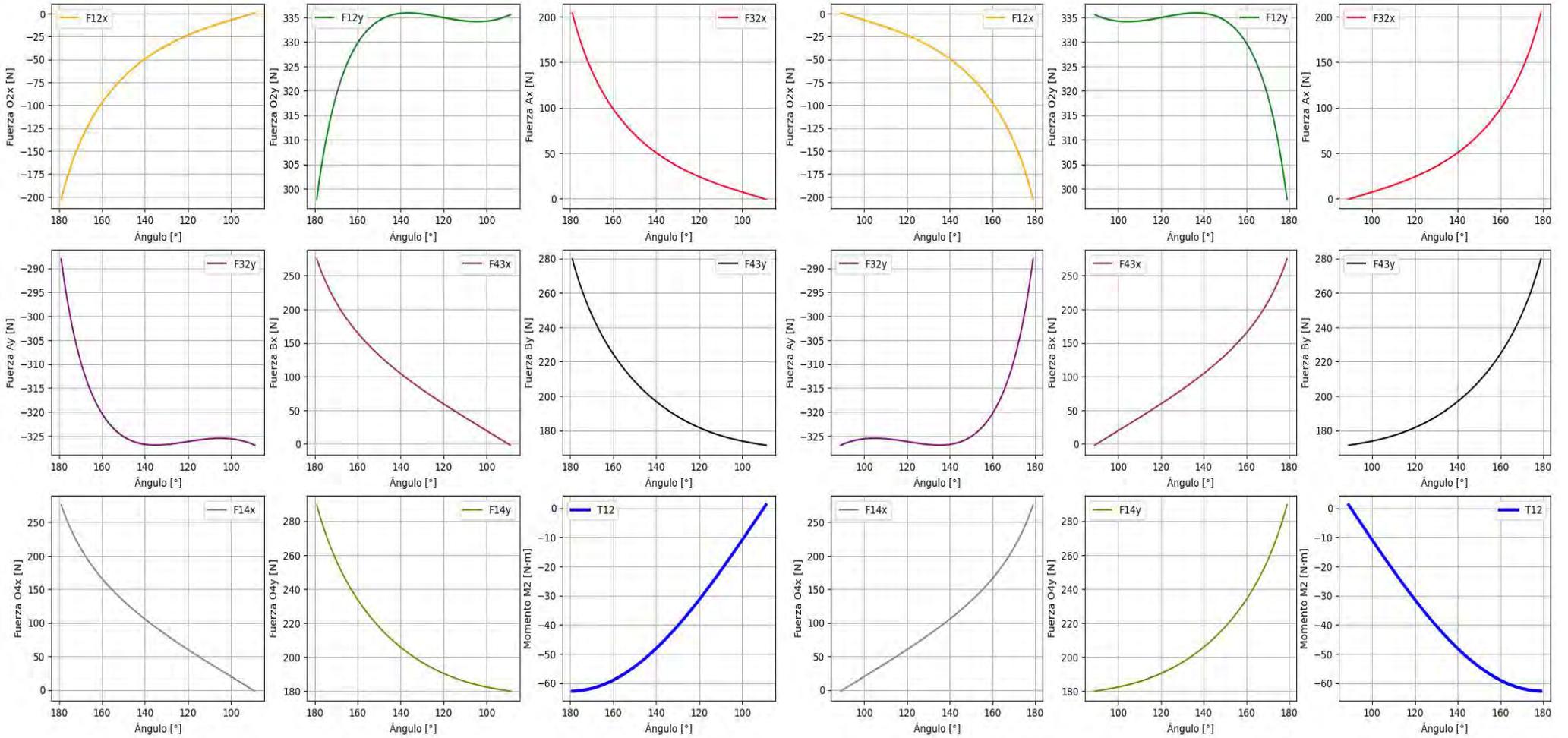


Figura 4.17 Resultados de la cinética del mecanismo para escaleras. Izquierda: subida. Derecha: bajada
Fuente: Propia

- Dimensionamiento de la sección de la punta de estrella

Se realizó el diagrama de cuerpo libre que se observa en la Figura 4.18, cuando se da la situación más crítica.

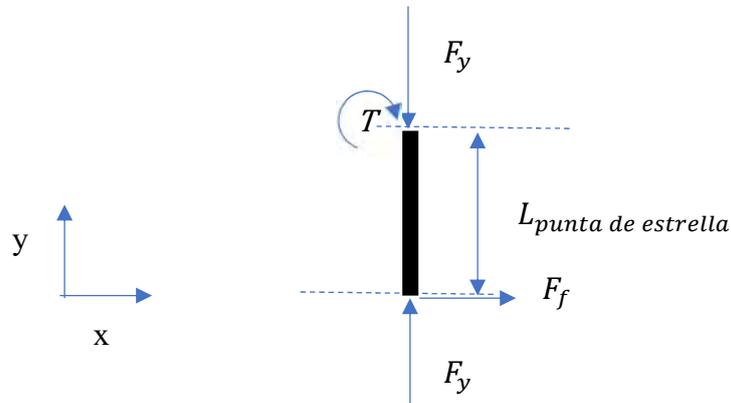


Figura 4.18 DCL de una punta de estrella
Fuente: Propia

De donde se tiene lo siguiente:

$$\sigma_{combinado} = \frac{F_y}{A} + \frac{\tau_2 \left(\frac{\text{lado}_{perfil}}{2} \right)}{I} \leq \frac{310}{(FS = 2.5)} \quad (12)$$

Para un perfil cuadrado de acero estructural de 20x20x1.5 ([enlace](#)),

$$\sigma_{combinado} = 106.5 \leq 124.0 \text{ MPa.}$$

Se utiliza un factor de seguridad alto porque la tetra-estrella (ver Figura 4.19) estará sometida bajo fatiga y cargas dinámicas. Si bien lo expuesto es de metal, la punta de la estrella tendrá gebe, de modo que haya buena fricción entre el suelo del edificio y los marcos-estrellas. Por otro lado, los cálculos de soldadura están en el Anexo D8.1.

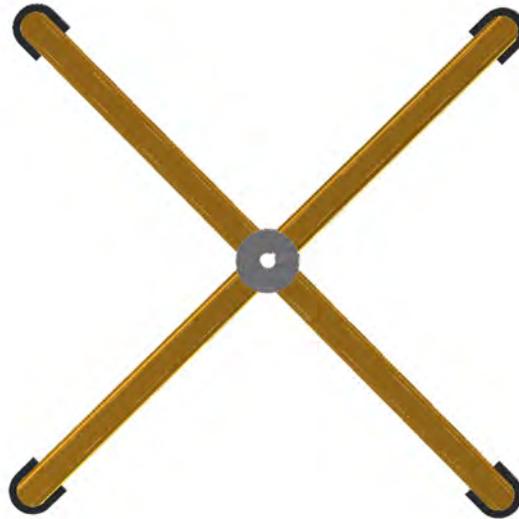


Figura 4.19 Marco tetra-estrella
Fuente: Propia

c. Selección de motor

Con el torque obtenido en el apartado anterior, se realiza lo siguiente para saber la velocidad que se requiere en el marco-estrella.

$$\omega R = v, \quad (13)$$

Se asume que la velocidad a la que una persona sube las escaleras es la mitad de su velocidad de marcha promedio:

$$v = \frac{1.5 \text{ m}}{2 \text{ s}},$$

$$\frac{\pi X_{rpm}}{30} \frac{0.218(10^{-3})}{2} = 0.75,$$

$$X_{rpm} = 32 \text{ RPM}.$$

Con estos 2 requerimientos que son la velocidad y el torque requerido, se evaluó a los motores de la Tabla 4.4, donde el motor sombreado fue el escogido.

Tabla 4.4 Comparación de motores para chasis de marcos-estrellas

Elaboración propia

Características	Motor trifásico de 250 W con caja reductora	Geared hub motor RUIPU 500W	BAFANG Front Hub Motor 250w
Imagen referencial			
Torque [N m]	3.9	278	45
RPM	1650	180	270
Voltaje [Vrms]	220	24	36
Consumo de corriente con carga [A]	-	Hasta 30	-
Eje [mm]	18	19	-
Precio [soles]	374.27	868.31	621.11
Referencia	enlace	enlace	enlace

d. Selección de cadenas y sprockets

Para determinar el número de dientes de los sprockets junto a la cantidad de eslabones de la cadena, se siguió los pasos indicados por el catálogo de la marca Renold [32]. Se seleccionó 2 sprockets del mismo tamaño para no aumentar velocidad, pues no se requiere. No se consigue hacer que el sprocket conducido, que es el de la rueda sea más pequeño, sea más grande porque hay una limitación de espacio que se da por el centro del marco-estrella con el extremo de una grada.

La potencia que se requiere para accionar 1 tetra-estrella es de 100.53 W, (14)

$$P_{seleccion} = P f_1 f_2,$$

$$f_1 = 1 \text{ factor de aplicación,}$$

$$f_2 = 1.11 \text{ factor por dientes,}$$

Por tanto, de acuerdo a la gráfica del estándar americano, el paso del sprocket es de 3/8 de pulgada tipo simplex. Y para una distancia entre centro de 294 mm, se determina el número de eslabones:

$$L = \frac{z_{dientes\ 1} + z_{dientes\ 2}}{2} + \frac{2d_{centros}}{Paso} + \frac{\left(\frac{z_{dientes\ 1} + z_{dientes\ 2}}{2\pi}\right)^2 Paso}{d_{centros}},$$

$$L = 84 \text{ eslabones (redondeado a par superior).}$$

Para el diseño se buscó las características del sprocket, en la Figura 4.20 se observa que se escoge el encerrado en rojo de Tipo A.

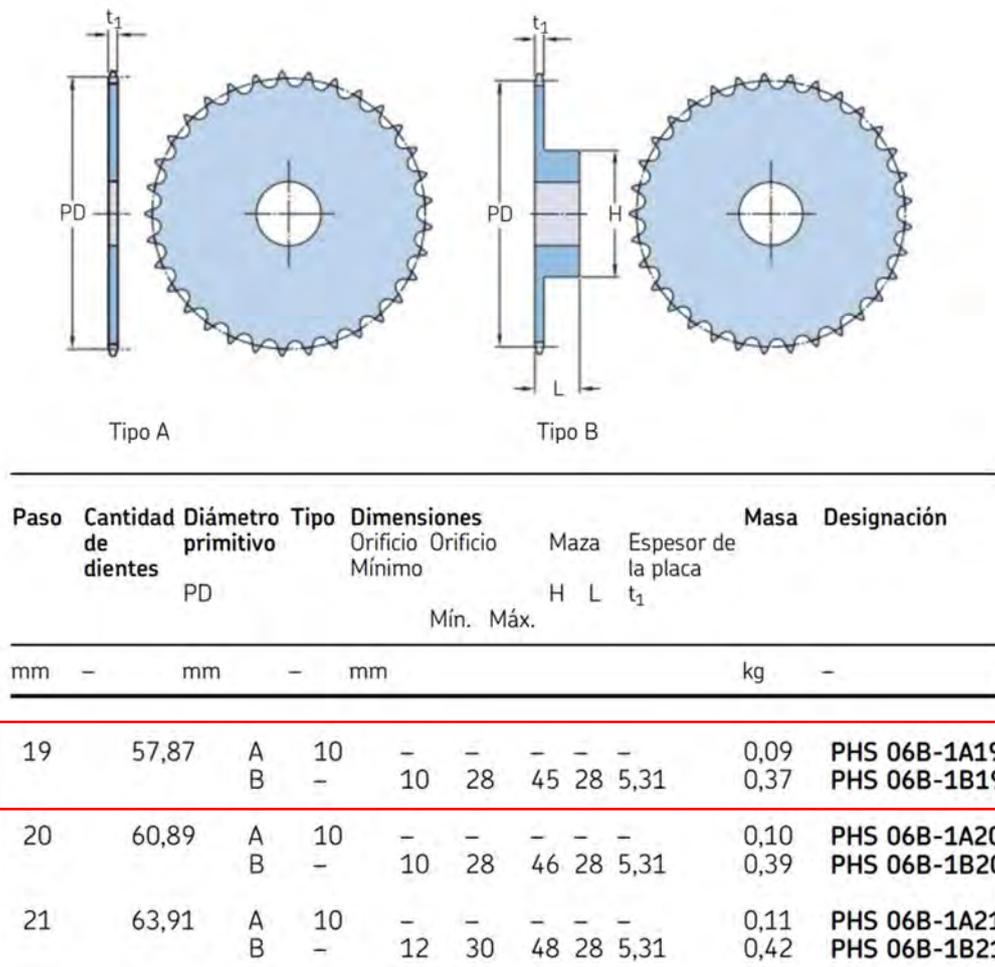


Figura 4.20 Selección del sprocket
Fuente: [33]

e. Cálculo de ejes de transmisión con marcos-estrellas

En la Figura 4.21 se indican los nombres que se le asignaron a cada eje que requiere el diseño

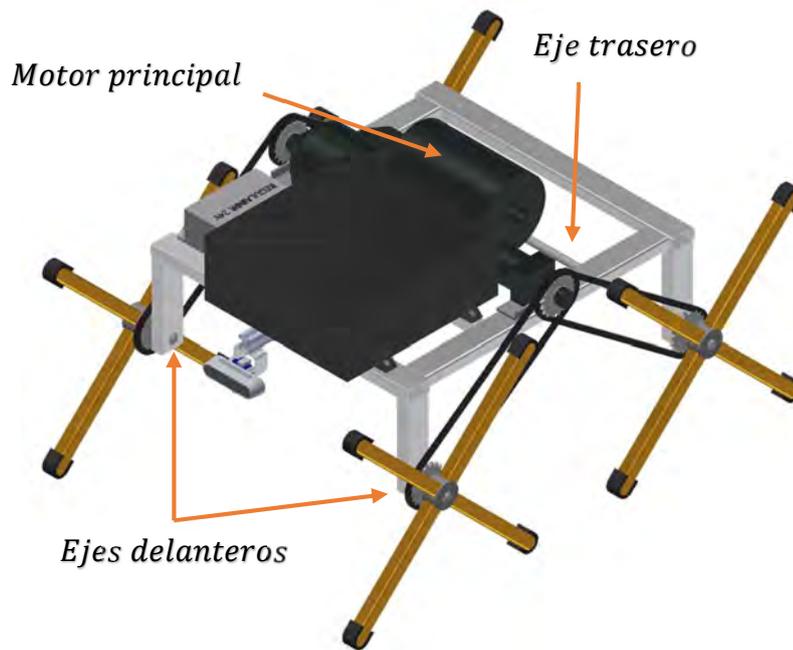


Figura 4.21. Ejes de transmisión en el chasis de marcos-estrellas
Fuente: Propia

Para los ejes delanteros, dado que son cortos y solo están sometidos a la torsión requerida por los motores, considerando de material al acero se realizó lo siguiente:

$$\begin{aligned}\sigma_b &= 240 \text{ MPa}, \\ \tau &= \frac{16T}{\pi d^3}, \\ \sigma_{eq} &= \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}, \\ \sqrt{3} \frac{16 T}{\pi d^3} &\leq \frac{\sigma_b}{(FS = 4)}, \\ 14.0 \text{ mm} &\leq d.\end{aligned}\tag{15}$$

Para el eje trasero, puesto que es un eje estructural se realizó la teoría de Von Misses, como sigue:

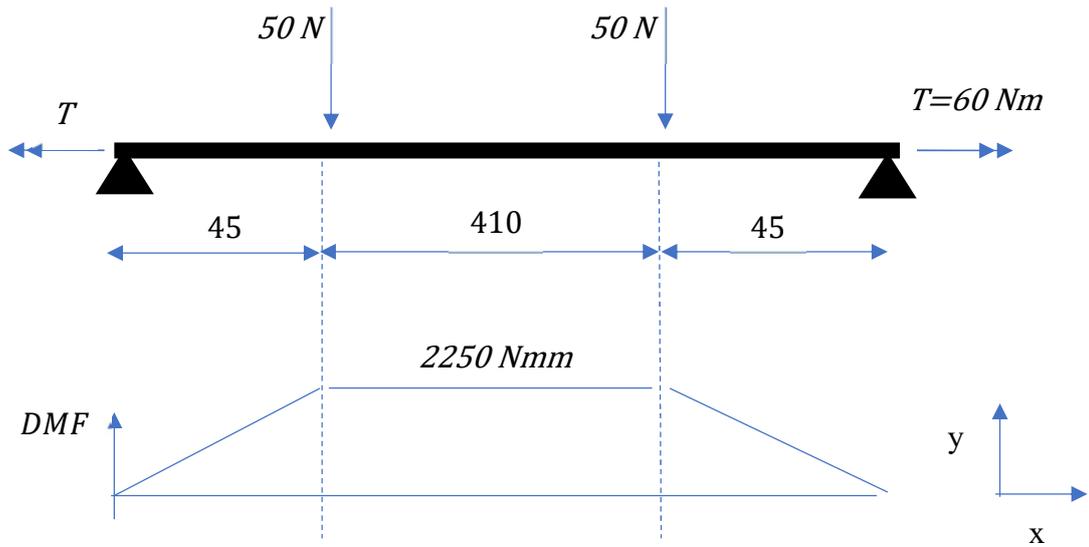


Figura 4.22 DCL de eje de sincronización
Fuente: Propia

$$\sigma = \frac{32M_f}{\pi d^3}, \quad (16)$$

$$\tau = \frac{16T}{\pi d^3},$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

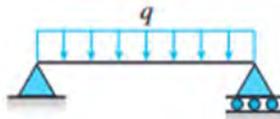
$$\sigma_{eq} \leq \frac{\sigma_b}{(FS = 2.5)},$$

$$d \geq 17.67 \text{ mm.}$$

Del mismo modo, para este eje trasero de 18 mm se verificó la deflexión, como sigue:

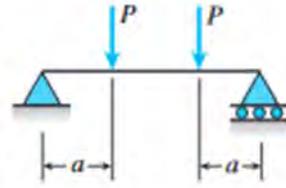
$$\rho_{lineal} = q = 7850 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) A(\text{mm}^2) \frac{1\text{m}^3}{10^9\text{mm}^3} = \frac{7850\pi d^2}{4(10^9)} \frac{\text{kg}}{\text{mm}}, \quad (17)$$

$$\text{deflexión por propio peso} = \delta_1 = \frac{5qL^4}{384EI},$$



$$\delta_1 = \frac{5(8.71)10^{-4}500^4}{384(210k) \frac{\pi r^4}{4}} = 0.001 \text{ mm,}$$

$$\text{deflexión por carga simétrica} = \delta_2 = \frac{Pa(3L^2 - 4a^2)}{24EI},$$



$$\delta_2 = \frac{50(45)}{24(210k) \frac{\pi d^4}{64}} (3(500^2) - 4(45)^2) = 0.081 \text{ mm},$$

Por recomendación del curso de Resistencia de Materiales, la deflexión debe cumplir con lo siguiente en un eje:

$$\delta_{total} \leq \frac{L_{eje}}{360} = 1.38 \text{ mm} \rightarrow OK!$$

f. Rodamientos del diseño

La selección de estos se encuentra en el anexo D.2.3.

4.2 Subsistema de interacción con el usuario

Este subsistema representa todo con lo que estará en contacto e interacción con el público objetivo.

4.2.1 Cajón de carga

Se lista lo realizado para el cajón de carga.

a. Material escogido y método de fabricación

Se eligió material la fibra de vidrio, dado que es muy usado en cajas de transporte en vehículos motorizados. Algunos de los beneficios que otorga el uso de este material son buena resistencia, estabilidad dimensional ante variaciones de temperatura y no se pudre en caso caiga sobre ella algo orgánico.

La caja resulta como se ve en la Figura 4.23, su forma se adaptó a los espacios libres, de modo que se pudiera aprovechar todo el volumen posible. Del mismo modo, se utilizará 1 pistón de gas para que el usuario no tenga problemas en levantar la tapa.

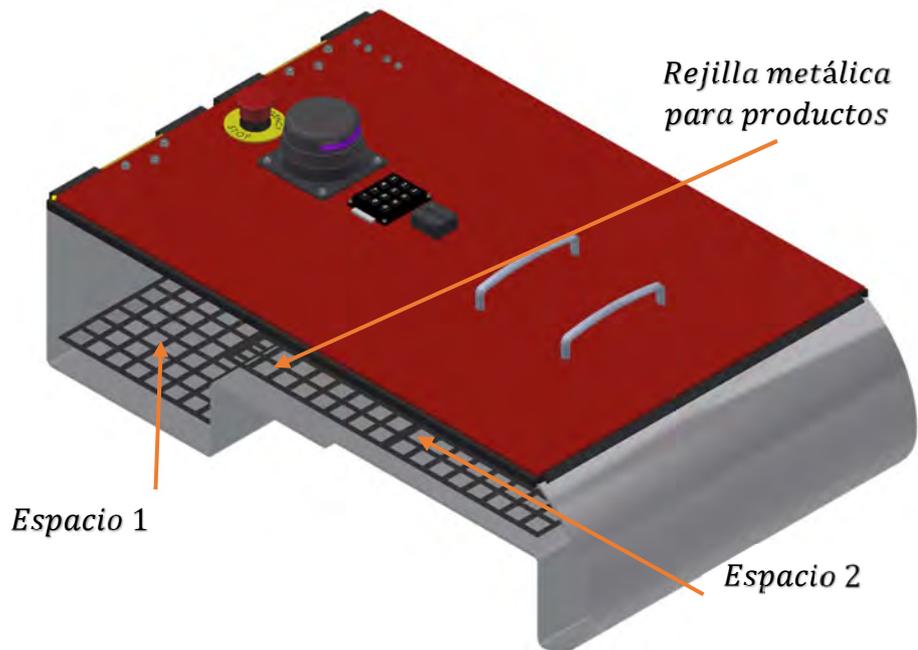


Figura 4.23 Cajón de carga
Fuente: Propia

b. Elementos adicionales

Adicionalmente, en la Figura anterior, se pudo observar un panel numérico, un botón de emergencia, entre otros objetos; todo ello, se acopla a la caja con tornillos y para los objetos que lo requieran hay agujeros pasantes. En la parte interior de la caja hay rejillas, sobre estas se colocan los objetos para el hogar del usuario.

c. Verificación de volcadura

Para hacer la verificación se asume un caso más crítico, por ello se consideró a una persona que le da un golpe al robot, es decir una fuerza impulsiva con un valor de 4kgf. Con el diseño completo del robot se midió 2 factores importantes, el peso y el centro de gravedad. En la Figura 4.24, se muestra el lugar del centro de gravedad, la altura a la que se encuentra es de 287 mm. El peso del robot sin carga es de 60 kg, de acuerdo con el software.



Figura 4.24 Altura del centro de gravedad
Fuente: Propia

Con esto, se realizó el DCL del robot cuando estuviera a punto de volcar, este se observa en la Figura 4.25. Dado que las dimensiones de una grada son 25 mm por 18 mm, se tiene un ángulo menor igual a 37° de inclinación por parte del robot. Nótese que la situación crítica de estar por volcar se da cuando el robot está sostenido sobre un solo punto el cual es representado como “P”, para tanto subida como bajada tomar el momento ahí elimina la fuerza de fricción.

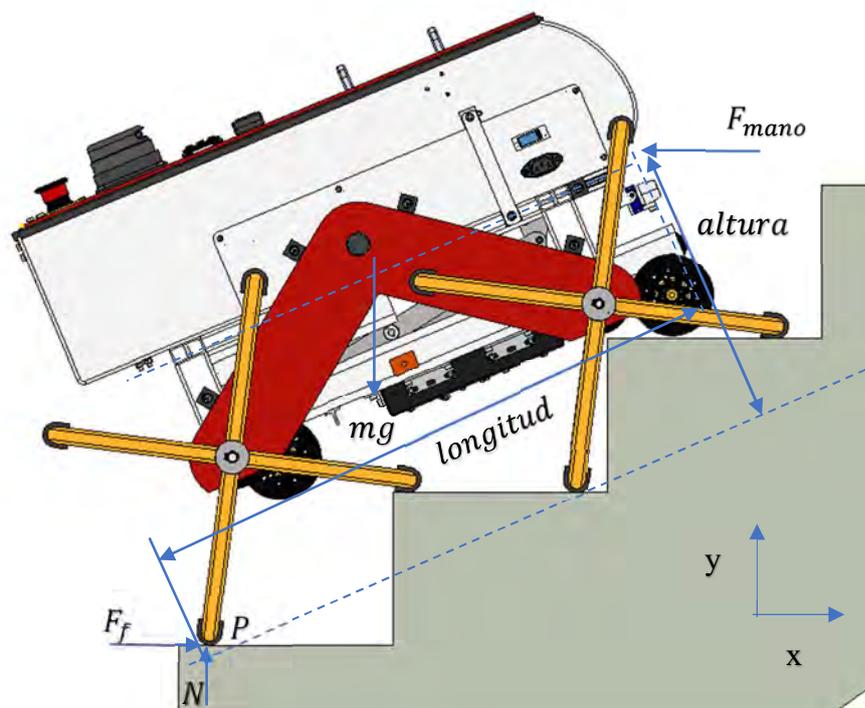


Figura 4.25 DCL para análisis de volcadura
Fuente: Propia

$$\Sigma M_p: F_{mano} \cos(37) h_{max} + F_{mano} \sin(37) longitud + mg \sin(37) h_{max} \quad (20)$$

$$- \frac{mg \cos(37) longitud}{2} = 0,$$

$$h_{max} = \frac{\left(\frac{mg \cos(37)}{2} - F_{mano} \sin(37) \right) longitud}{(mg \sin(37) - F_{mano} \cos(37))},$$

$$m = 60 \text{ kg},$$

$$h_{max} = 329 \text{ mm},$$

$$altura = 287 \leq h_{max} \rightarrow OK!$$

d. Medición de la inclinación

Para saber que el robot se encuentra en una escalera, se decide medir la inclinación. Para esto se puede utilizar un acelerómetro o un giroscopio, ambos sensores si se utiliza juntos pueden conseguir una medición más adecuada que usando solamente uno de ellos, a esto se le llama combinación de sensores y es lo que se escogió. El módulo escogido de orientación absoluta BNO055 realiza esta combinación ([enlace](#)).

e. Balanza

En la Figura 4.26 se muestra una vista de perfil del cajón de carga sin tapa lateral, permitiendo visualizar 2 unidades de pesaje dentro de este contenedor de carga para sus 2 secciones interiores.

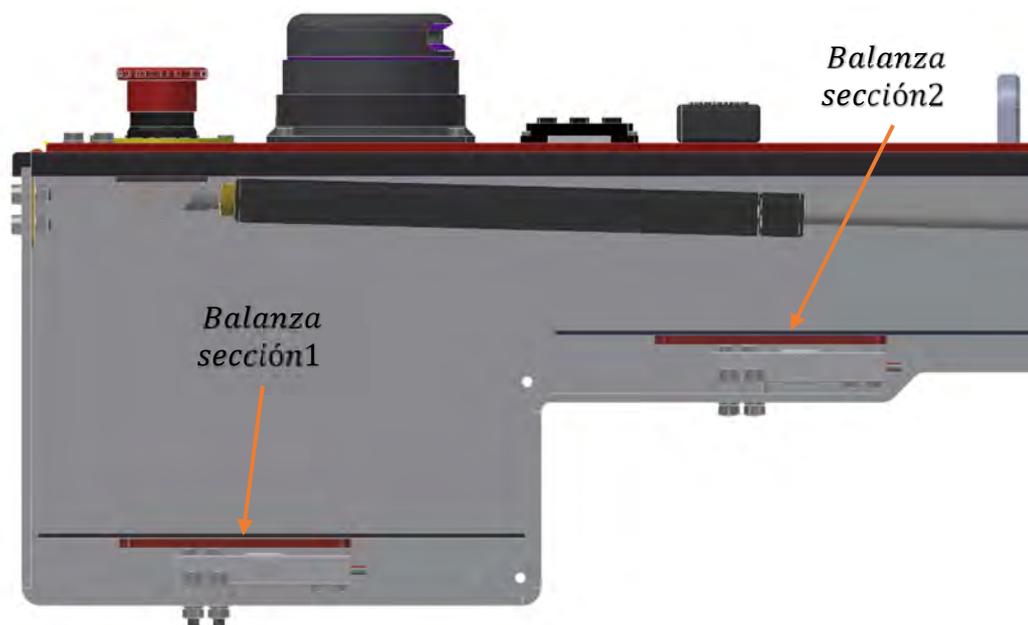


Figura 4.26 Ubicación de las balanzas dentro del cajón de carga
Fuente: [34]

Se seleccionó el sensor que fuese más simple de utilizar en la caja (ver Tabla 4.5), el cual es el que permite medir el peso cuando la carga genera flexión sobre la celda de carga.

Tabla 4.5 Comparación de Celdas de carga
Elaboración propia

Características	Sensor 1	Sensor 2
Imagen referencial		
Método de uso	Puede colocarse el peso encima	Debe haber una flexión en la barra
¿Requiere amplificar su salida?	sí	sí
Capacidad de carga [kg]	50	10
Precio [soles]	47.84	33.88
Enlace	enlace	enlace

4.2.2 Interfaz para usuario

La Figura 4.27 muestra el hardware con el que interactúa el usuario, donde lo principal son el panel numérico y el altavoz. A continuación, se detalla la selección de hardware y se esquematiza el diagrama de operación con la interfaz.

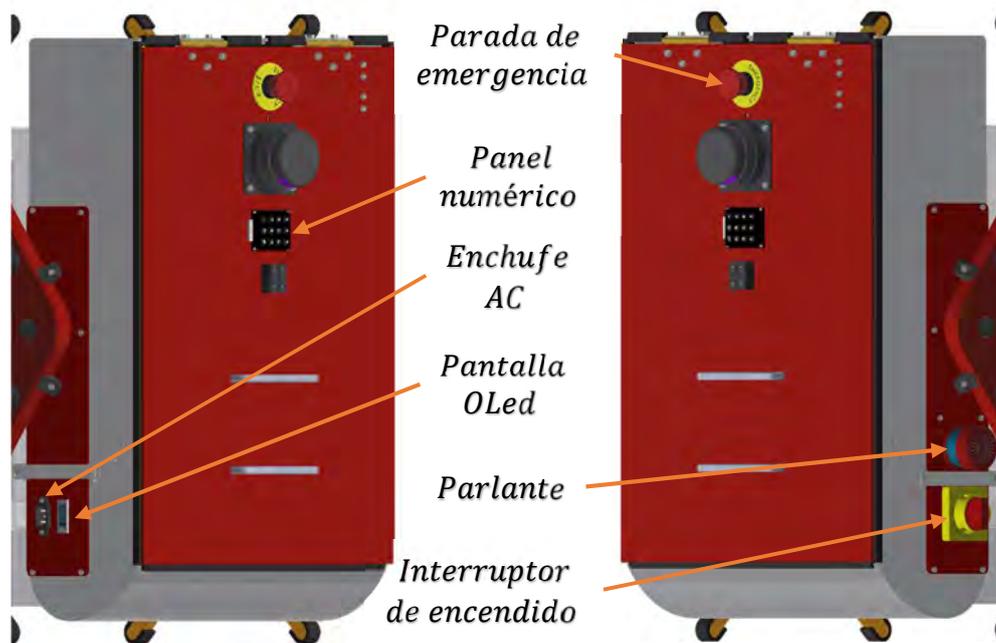


Figura 4.27 Vistas superiores inclinadas 45° a los lados. Izquierda: lateral derecho del robot. Derecha: lateral izquierdo del robot.
Fuente: Propia

a. Selección de hardware

Para el altavoz se optó por el que tuviera la conexión más simple (ver Tabla 4.6), en este caso tanto el audio como la alimentación de energía se da por el USB.

Tabla 4.6 Comparación de altavoces
Elaboración propia

Características	TECHZOOM	HONKYOB	Bose SoundLink
Imagen referencial			
Bluetooth	sí	no	sí
Batería	sí	no	no
Conexión audio	-	USB	Jack
Precio [soles]	21.77	51.83	509
Enlace	enlace	enlace	enlace

Para el panel numérico se optó por la cantidad de teclas necesarias (ver Tabla 4.7), puesto que es un edificio, se requiere de números y unas teclas para usar como confirmación.

Tabla 4.7 Comparación de paneles numéricos

Elaboración propia

Características	3x4 Matrix Keypad	Membrane 3x4 Matrix	4x4 Matrix Keypad
Imagen referencial			
Precio [soles]	31.73	15.71	19
Enlace	enlace	enlace	enlace

Finalmente, se requería de una pantalla pequeña para visualizar el estado de la batería, para esto se escogió una pantalla Oled de 0.69'' ([enlace](#)), un botón de emergencia ([enlace](#)) y un interruptor para encender o apagar el robot ([enlace](#)), estos se ven en la Figura 4.28.



Figura 4.28 Elementos adicionales para la interacción del usuario
Fuente: Propia

b. Diagrama de operación

En las Figuras 4.31 y 4.31, se muestran los diagramas de flujo la secuencia de pasos que debe seguir el usuario para poner en marcha al robot e indicar el final de uso de este.

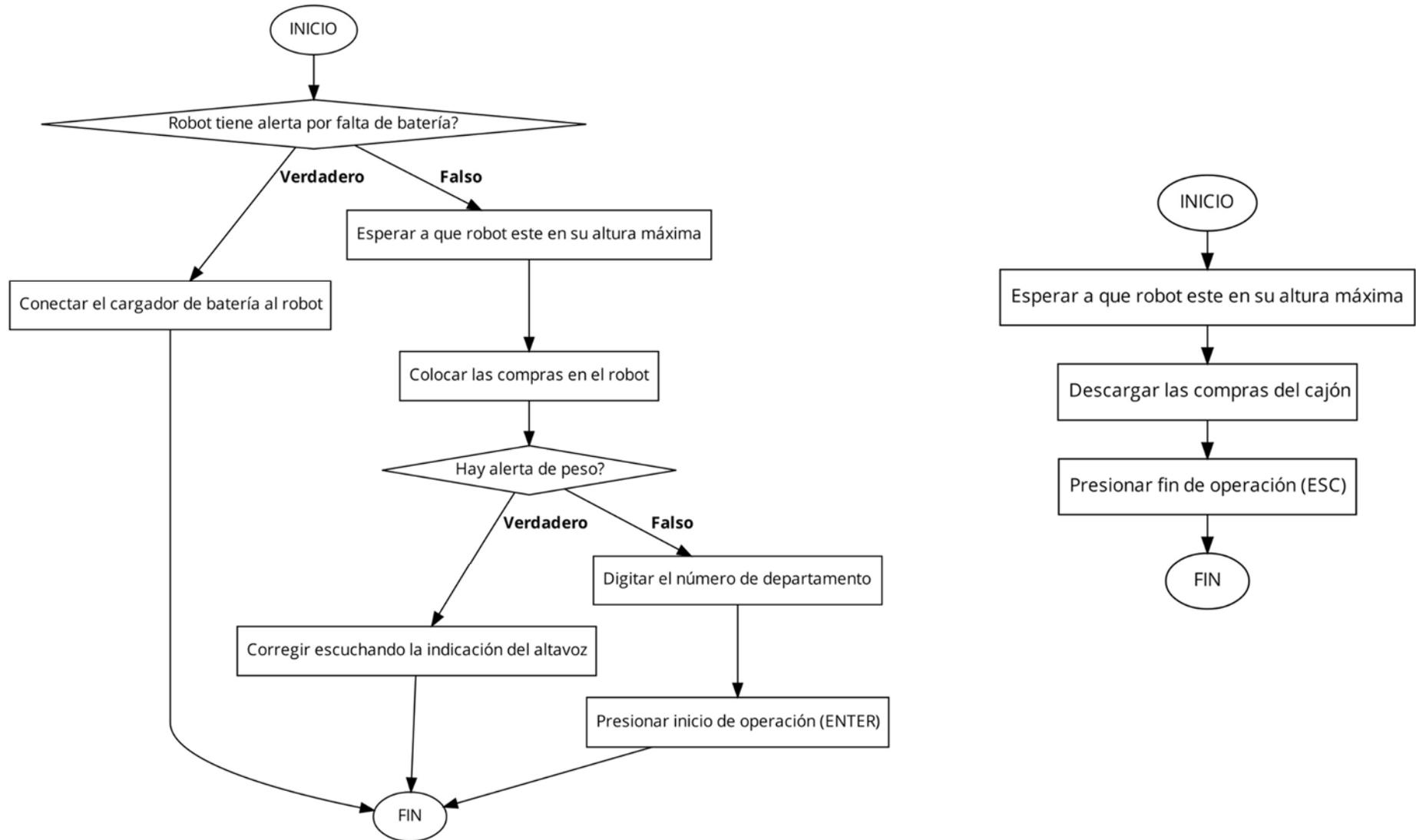


Figura 4.29 Diagramas de flujo para la interfaz de usuario. Izquierda: pre-operación. Derecha: post-operación
Fuente: Propia

4.3 Subsistema de caja electrónica

Este subsistema tiene como foco principal la energía y el hardware más importante del robot.

4.3.1 Banco de baterías

Se lista lo realizado para el banco de baterías.

a. Consumo de energía máximo

Se presenta la Tabla 4.8 con el listado de componentes electrónicos y su consumo de corriente en caso extremo.

*Tabla 4.8 Consumo de energía
Elaboración propia*

Componente	Corriente [A]	Voltaje [V]	Potencia [W]
Computadora de placa reducida	1.7	5	9.85
Microcontrolador	0.3	5	0.15
Actuador lineal	3.7	12	44.4
4 motores de ruedas	30	12	360
Motor principal	30	24	720
LiDAR	0.5	5	2.5
Cámara	0.5	5	2.5
Otros (acelerómetro, infrarrojos, celdas de carga, pulsadores)	0.3	5	1.5
Altavoz	0.5	5	2.5
TOTAL	67.5	-	1140.9

Teniendo en cuenta que durante la operación del robot no se dará un caso en el que se consuma toda la corriente calculada, se pudo realizar los siguientes cálculos, ya que los sistemas de locomoción se alternan y no funcionan al mismo tiempo.

$$\begin{aligned} \text{Consumo} &= \text{Potencia}(\text{Tiempo}), \\ \text{Tiempo} &= 3h \text{ continuas}, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\text{Consumo} = 1710W@50\% \text{ duty cycle},$$

$$\text{Corriente}_{\text{hora}} = \text{Consumo}/\text{Voltaje},$$

$$\text{Corriente}_{\text{hora}} = 71.3 \text{ Ah},$$

Teniendo esto, se puede estimar la cantidad de usos como sigue:

$$\text{Dist}_{5\text{pisos}} = 200m,$$

$$t_{5\text{pis}} \text{ (subida o bajada)} = \frac{\text{Dist}_{5\text{pisos}}}{\text{vel}_{\text{robot}}@0.5 \frac{m}{s}} + t_{\text{transiciones o decisiones}} = 9\text{min},$$

$$\text{Cantidad de usos} = \frac{3h}{2 t_{5\text{pisos}}(\text{subida o bajada})} = 10 \text{ veces}.$$

b. Selección de fuente de energía

El criterio de selección fue que la capacidad de entregar corriente sea alta y que el tamaño de toda la batería sea lo más compacto posible. En la tabla 4.9, se observan todas las características tomadas en cuenta para la elección. Adicionalmente, la mejor alternativa nos permite leer información del estado de la batería.

Tabla 4.9 Comparación de fuentes de energía

Elaboración propia

Características	LG Battery for Service Robot	LiFePO4 battery	GTK-batería de iones de litio
Imagen referencial			
Modelo de celda	18650/3.6V/3.35Ah	2770145/3.2V/20Ah	/1.24V/
Configuración	7S18P	8S3P	-
¿BMS incorporado?	sí	sí	sí
Voltaje nominal [V]	25.2	25.6	24
Capacidad [Ah]	60	60	60
Voltaje de carga [V]	29.4	29.2	
Corriente de carga máxima [A]	15	20	20
Peso [kg]	7.5	15	8

Comunicación	RS485 para información de la batería	RS485 para información de la batería	no
Dimensiones [mm]	265x250x100	270x230x190	260x230x170
Precio [soles]			1139.03
Enlace	enlace	enlace	enlace

c. Selección de cargador de batería

Teniendo en cuenta el anterior apartado, en la Tabla 4.10 se muestra cargadores para baterías de 24V, los criterios de elección se centraron en la corriente de salida y la protección para polaridad inversa.

Tabla 4.10 Comparación de cargadores para batería de 24V
Elaboración propia

Características	Scooter battery charger	Portable Quick Car Battery Charger	LiFEPO4 LFP Lithium Battery Charger
Imagen referencial			
Rango de voltaje de carga [V]	29.4	29.6	29.2
Corriente [A]	15	10	10
Peso [kg]	1.3	1.8	0.75
Dimensiones [mm]	180x90x63	285x245x145	160x89x186
Conexión	Por cocodrilos u otras salidas estándares	Por cocodrilos	Por cocodrilos
¿protección contra cortocircuito?	sí	sí	sí
¿protección para polaridad inversa?	-	-	sí
Precio [soles]	199.3	303.03	398.6
Enlace	enlace	enlace	enlace

4.3.2 Módulos y drivers

Se lista lo realizado para la selección de módulos y drivers.

a. Módulos para niveles de voltaje requeridos

En la Tabla 4.11 se presentan los reguladores BUCK, estos permiten obtener niveles de tensión de manera constante y también consiguen entregar la corriente requerida para cada nivel de voltaje.

Tabla 4.11 Reguladores BUCK

Elaboración propia

Características	Regulador de voltaje	Regulador de voltaje	Regulador de voltaje
Imagen referencial			
Voltaje de alimentación [V]	10-36	18-35	5.5-32
Voltaje de salida [V]	24	12	5
Corriente máxima [A]	30	30	5
Precio [soles]	255.38	62.07	18.46
Enlace	enlace	enlace	enlace

b. Módulo de transmisor de carga

Para amplificar la señal del puente de Wheatstone para medir el peso se hará uso del módulo que se ve en la Figura 4.30.



Figura 4.30 Módulo HX711

Fuente: [35]

c. Módulo expensor serial

Para poder tener más puertos seriales UART en la computadora de placa reducida, se utilizará el siguiente expensor que permite cambiar la conexión de comunicación por medio de un selector. Se observa al módulo en la Figura 4.31.

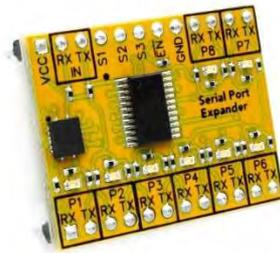


Figura 4.31 Serial Port Expander
Fuente: [36]

d. Módulo de visión

Las cámaras comparadas en la Tabla 4.12 son iguales en resolución, por lo que se eligió la de costo intermedio, dado que puede capturar imágenes desde una distancia más corta y tiene IMU.

Tabla 4.12 Comparación de cámaras de profundidad
Adaptado de [37]

Características	D415	D435i	D455
Imagen referencial			
FOV de profundidad [H°xV°]	65x40	87x58	87x58
Resolución de Profundidad	1280x720	1280x720	1280x720
FPS máximos de profundidad	90	90	90
Resolución de rgb	1920x1080	1920x1080	1920x1080
FOV de RGB [H°xV°]	69x42	69x42	90x65
¿incluye IMU?	no	sí	no
Distancia mínima de operación [cm]	45	28	52
Distancia máxima recomendada [m]	3	3	6
Precio [soles]	1078.4	1367.9	1661.3
Enlace	enlace	enlace	enlace

Con la cámara elegida se realizó unos cálculos y luego se determinó el servomotor que le otorgará 1 grado de libertad, esto se encuentra en el Anexo D.3.1.

e. Módulo de localización

Se seleccionó el LiDAR en base a los puntos que puede obtenerse en 1 segundo, en la Tabla 4.13 se observa los criterios tomados en cuenta. También su ubicación sobre la tapa del cajón del robot le permite sentir los alrededores sin obstáculo alguno.

Tabla 4.13 Comparación de LiDAR

Adaptado de [38]

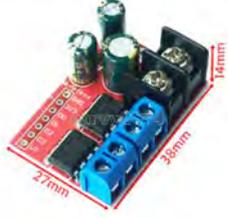
Características	RPLiDAR A2M8	RPLiDAR A3M1	RPLiDAR S1
Imagen referencial			
Voltaje [V]	5	5	5
Distancia de detección [m]	0.15-8	0.15-10	0.2-10
Frecuencia de escaneo [Hz]	5-15	5-20	8-15
Puntos/segundo @ f=10Hz	4000	12000	7200
Operación para exteriores	sí	sí	sí
Precio [soles]	1315.5	2235.9	2247.8
Enlace	enlace	enlace	enlace

f. Drivers

Se requiere de 2 puentes H para el motor principal y para el actuador lineal. Para el caso de los motores, estos solo se comandan la interfaz de comunicación UART. En la Tabla 4.14, se observan las características de los drivers escogidos.

Tabla 4.14 Características de los drivers de motor

Elaboración propia

Características	BTS7960 Driver motor	Puente Doble H
Imagen referencial		
Uso para	Motor principal	Actuador lineal
Voltaje de alimentación [V]	5.5 a 27	3 a 14
Corriente máxima [A]	43	5
Precio [soles]	23.66	14.94
Enlace	enlace	enlace

4.3.3 Procesamiento de datos

Se lista lo realizado para el procesamiento de datos.

a. Elementos de hardware totales

En la Tabla 4.15, se listan todos los elementos de hardware y que es lo que requieren para ser usados y así poder seleccionar los siguientes ítems.

Tabla 4.15 Lista de elementos hardware

Elaboración propia

Hardware	Requerimiento	Conectado a
Pantalla Oled	I2C	Microcontrolador
Altavoz	USB2.0	Computador de placa reducida
Keypad	7 x digital	Microcontrolador
Balanza (Celdas de carga)	2 x digital	Microcontrolador
LiDAR	USB 3.0	Computador de placa reducida
Cámara	USB 3.0	Computador de placa reducida
Acelerómetro	I2C	Microcontrolador
Infrarrojos	6 x digital	Microcontrolador

Motores ruedas	4 x UART	Computador de placa reducida
Motor principal	3 x digital 1 x PWM	Microcontrolador
Servomotor	1 x PWM	Microcontrolador
Pistón	3 x digital 1 x PWM	Microcontrolador

b. Selección de computador de placa reducida

Se escogió la computadora de placa reducida en función de la RAM y el precio, en la Tabla 4.16 se observan otras características observadas.

Tabla 4.16 Comparación de computadores de placa reducida
Elaboración propia

Características	Banana Pi M5	Jetson Nano	Raspberry Pi 4
Imagen referencial			
Cores	4	4	4
RAM	4	4	8
CPU	Allwinner A20	ARM Cortex-A57	Broadcom BCM2835
GPU	Mali-G31 MP2	NVIDIA Maxwell	Broadcom Videocore VI
Cantidad de GPIO	40	40	40
Puertos USB	4x USB 3.0	4x USB 3.0 1x USB 2.0 micro B	2x USB 3.0 2x USB 2.0
Arquitectura	64	64	64
Precio [soles]	475.29	388.63	626.23
Enlace	enlace	enlace	enlace

c. Selección de microcontrolador

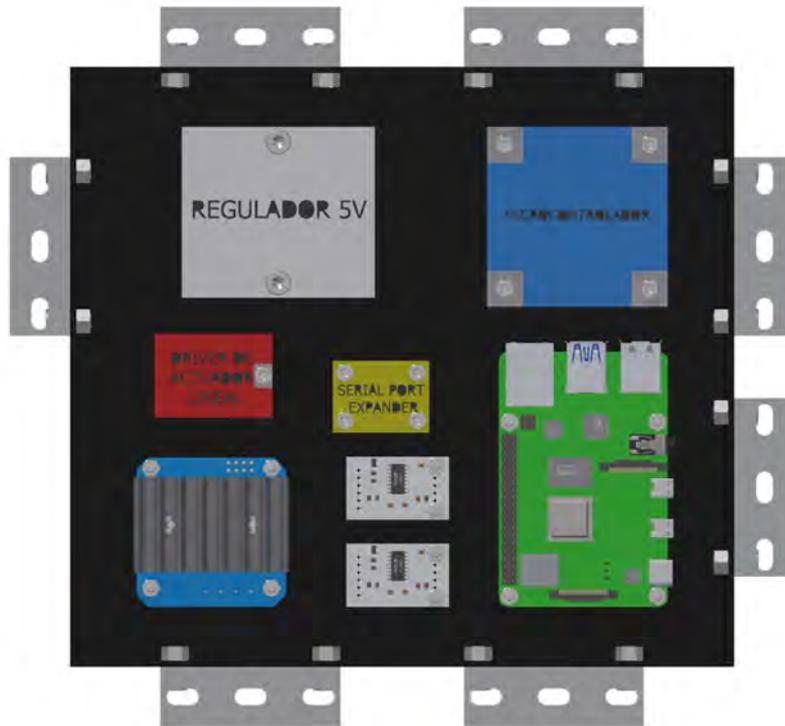
En función de la Tabla 4.17, se requiere 2 pines I2C, 19 digitales y 3 PWM, dando un total de 24 pines. Por tanto, se optó por un microcontrolador con una frecuencia de reloj alta y bastantes pines con diversas funciones.

Tabla 4.17 Comparación de microcontroladores
Elaboración propia

Características	Arduino UNO	Raspberry Pi Pico	ESP32-WROOM-32E
Imagen referencial			
Voltaje [V]	5	3.3	3.3
Frecuencia de reloj [MHz]	16	133	240
Cores	1	2	2
Memoria Flash	32 KB	2 MB	4 MB
Arquitectura [bit]	8	32	32
Pines	20	26	40
Precio [soles]	63	23	11.3
Enlace	enlace	enlace	enlace

4.3.4 Distribución de componentes electrónicos

Como se explicó en la sección 4.1.1, en la parte inferior del chasis de ruedas del robot se encuentran los drivers, módulos y hardware de procesamiento de datos. Todos los componentes mencionados en la sección 4.3 se observan en la Figura 4.32, con excepción de dos convertidores buck, estos últimos se encuentran ubicados entre el subsistema de locomoción por escaleras y los costados del cajón de carga.



*Figura 4.32 Distribución de los componentes electrónicos dentro de caja de MDF
Fuente: Propia*

4.4 Subsistema de navegación y control

Esta sección desarrolla modelos de control, también hace mención de los algoritmos que permiten la navegación del robot por el edificio.

4.4.1 Modelos matemáticos del robot

Se presentan los modelos matemáticos para posteriormente realizar el control sobre estos.

a. Modelo cinemático para desplazamiento por pasillos

Se revisó el libro de Introduction to Mobile Robot [14], donde se utilizará la forma estándar de robots con 4 ruedas mecanum. En la Figura 4.33, se observa en el centro del robot móvil su sistema de referencia fijo a él, pero a su vez hay un sistema de referencia XY global fijo a tierra. A su vez, se muestra las velocidades lineales y angular respecto al robot, en función a las velocidades angulares de cada rueda, este corresponde al modelo cinemático del robot.

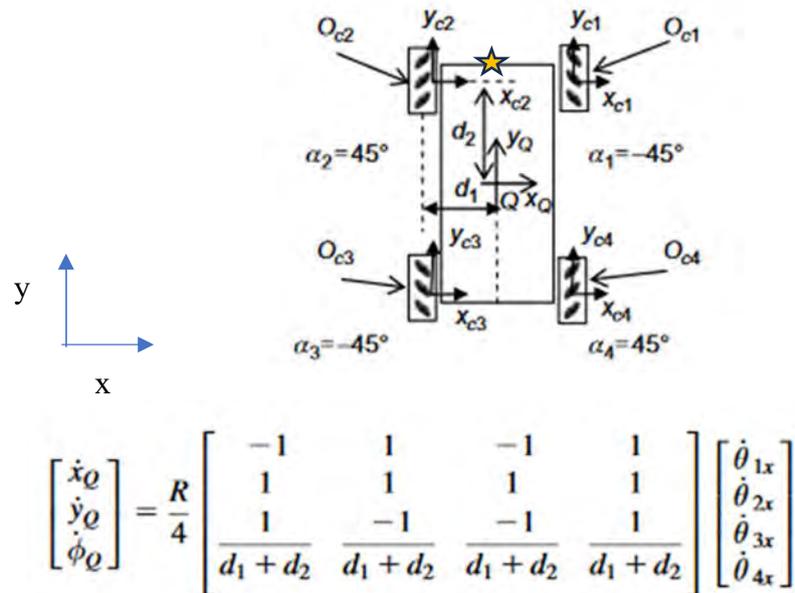


Figura 4.33 Sistema de referencia $X_Q Y_Q$ fijo al robot
Fuente: [14]

Para el control de velocidad angular de cada rueda se necesitará lo inverso a lo anterior, por lo que la expresión quedaría de esta manera:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} -d_2 - d_1 & 1 & -1 \\ d_2 + d_1 & 1 & 1 \\ d_2 + d_1 & 1 & -1 \\ -d_2 - d_1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_z \\ v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad (24)$$

La Figura 4.34 se traslada las velocidades del robot al marco de referencia global.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_Q \\ \dot{y}_Q \\ \dot{\phi}_Q \end{bmatrix}$$

Figura 4.34 Velocidades del robot globales
Fuente: [14]

Por otro lado, el control buscará que un punto (estrella amarilla en Figura 4.33) sea el que deba alcanzar una posición objetivo. Por esta razón, se requiere trasladar las velocidades de dicho punto al marco de referencia global.

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & -d_2 \sin(\phi) \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & d_2 \cos(\phi) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{Qx} \\ v_{Qy} \\ \omega_{Qz} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

De esto último se definirá la siguiente matriz, la cual será importante para realizar el control.

$$M = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & -d_2 \sin(\phi) \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & d_2 \cos(\phi) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow M^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) & 0 \\ -\sin(\phi) & \cos(\phi) & -d_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{Qx} \\ v_{Qy} \\ \omega_{Qz} \end{bmatrix}.$$

b. Modelo dinámico para desplazamiento por escaleras

Siguiendo el DCL para el mecanismo de 4 barras, realizado en la sección 4.1.2.b, se utilizó Lagrange para describir el movimiento del robot el cual tiene 1 grado de libertad.

Se desarrollan las ecuaciones de energía cinética y potencial de cada eslabón. (26)

$$T_4 = T_1 = \frac{1}{2} (m_2 v_2^2 + I_2 \dot{\theta}^2) = \frac{\dot{\theta}^2}{2} \left(\frac{m_2 b^2}{4} + I_2 \right),$$

$$U_1 = m_2 g h_2 = m_2 g \left(\frac{b}{2} \sin(\theta) \right),$$

$$U_4 = m_2 g h_2 + q \sin(\phi) = m_2 g \left(\frac{b}{2} \sin(\theta) \right) + q \sin(\phi),$$

$$T_3 = \frac{1}{2} (m_3 v_3^2 + I_3 \dot{\theta}^2) = \frac{\dot{\theta}^2}{2} (m_3 b^2),$$

$$U_3 = m_3 g h_3 = m_3 g \left(b \sin(\theta) + \sqrt{\frac{q^2}{4} + x^2} \sin(\beta + \phi) \right),$$

$$L = T - U, \quad \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = u_i,$$

$$T = \dot{\theta}^2 \left(\frac{m_2 b^2}{4} + I_2 + \frac{m_3 b^2}{2} \right),$$

$$U = (m_2 g b + m_3 g b) \sin(\theta) + q \sin(\phi) + m_3 g \sqrt{\frac{q^2}{4} + x^2} \sin(\beta + \phi),$$

Se tendrá la siguiente equivalencia, dado que muchas son constantes

$$T = A\dot{\theta}, \quad U = B\sin(\theta) + C,$$

$$L = A\dot{\theta} - B\sin(\theta) - C,$$

Realizando las derivadas se tiene:

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = -B \cos(\theta),$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = 2A\dot{\theta} \rightarrow \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = 2A\ddot{\theta},$$

Así es como se obtiene la siguiente ecuación diferencial, la cual describe el movimiento del mecanismo para ascenso y descenso de escaleras.

$$2A\ddot{\theta} + B \cos(\theta) = \text{Torque} \equiv M_{\theta} \ddot{\theta} + V_{(\theta, \dot{\theta})} = \tau_0,$$

$$A = 1.210, \quad B = 108.45.$$

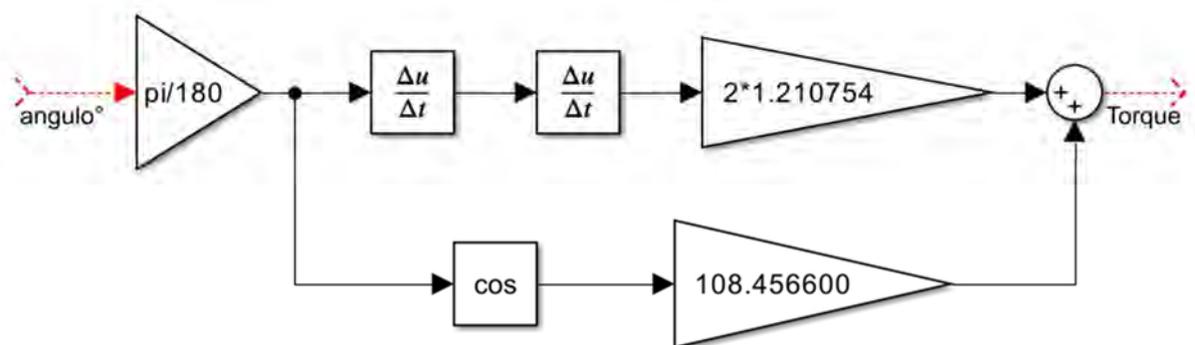


Figura 4.35 Diagrama de bloques de la locomoción por escaleras
Fuente: Propia

c. Modelo para sistema de elevación

En el Anexo D.4.1 se detalla la obtención de este modelo.

4.4.2 Estrategias de control para el robot

Se presentan los diagramas de bloques para el control de desplazamientos.

a. Control para desplazamiento por pasillos

En la Figura 4.36, se tiene el esquema de control para el desplazamiento con ruedas mecanum, se observa que hay en la parte superior izquierda un 'generador de trayectorias' este viene a ser lo que manden los planificadores de rutas global y local que se describirán en las siguientes secciones. El bloque de 'control de seguimiento' transforma la información de los puntos deseados a las velocidades lineales y angular del robot, que posteriormente pasan por un bloque de conversión para generar las velocidades angulares que deben tener las ruedas del móvil.

Finalmente, siendo controladas las ruedas, el robot se logra controlar y se realimenta con la información de posición que entrega el sensor LiDAR.

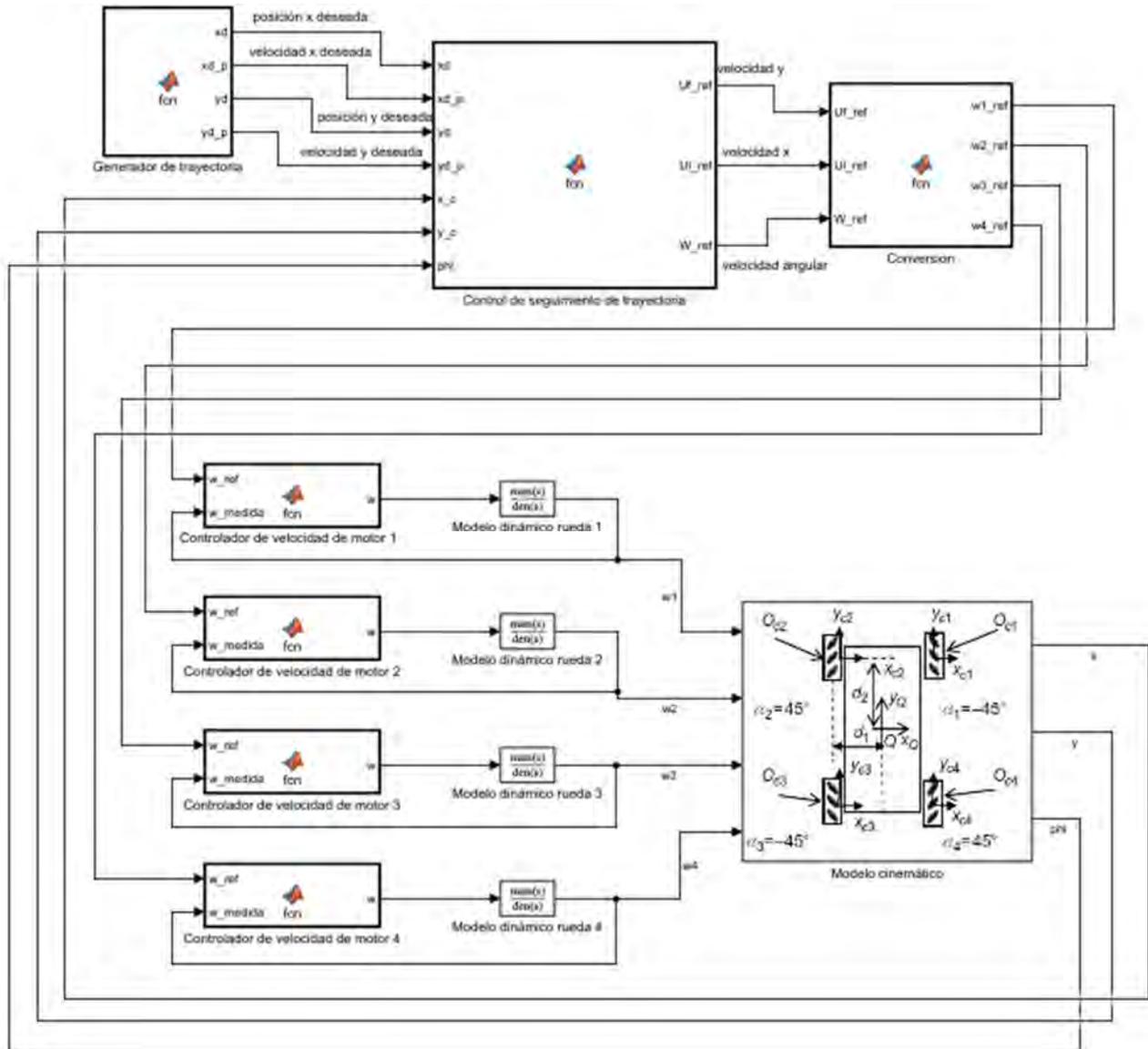


Figura 4.36 Control de posición para la locomoción por ruedas omnidireccionales
Fuente: Propia

Ahondando en el bloque que realiza el control de seguimiento de trayectoria, la forma en la que se determinan las velocidades sobre el robot es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}, \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix},$$

El siguiente control proporcional será utilizado para el control de seguimiento de trayectorias, expresado en función del “error”:

$$0 = \dot{e} + k e,$$

Lo cual equivale a:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \text{ deseado} \\ v_y \text{ deseado} \\ \omega_z \text{ deseado} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 e_x \\ k_2 e_y \\ k_3 e_\phi \end{bmatrix},$$

Con relación a las ganancias se determinan como sigue:

$$k = \frac{4}{T_{ess}},$$

$T_{ess} = \text{Tiempo de establecimiento},$

Finalmente se puede resolver de manera separada los valores del vector de velocidades del robot y posteriormente transformar el vector de velocidades a las velocidades angulares de las ruedas.

$$\text{Velocidades del robot} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}.$$

Esta estrategia de control fue probada en el robot utilizando una simulación en ROS (Robotics Operating System), donde se hizo que este siguiera diferentes trayectorias como lo fueron líneas y circunferencias. Los bloques de control programados, para la validación, fueron las 3 cajas de la parte superior de la Figura 4.36 y también la lectura de la odometría del robot. En la Figura 4.37, se observa una trayectoria en línea diagonal realizada por el robot omnidireccional, donde para efectos demostrativos se mantuvo la misma orientación durante todo el recorrido.

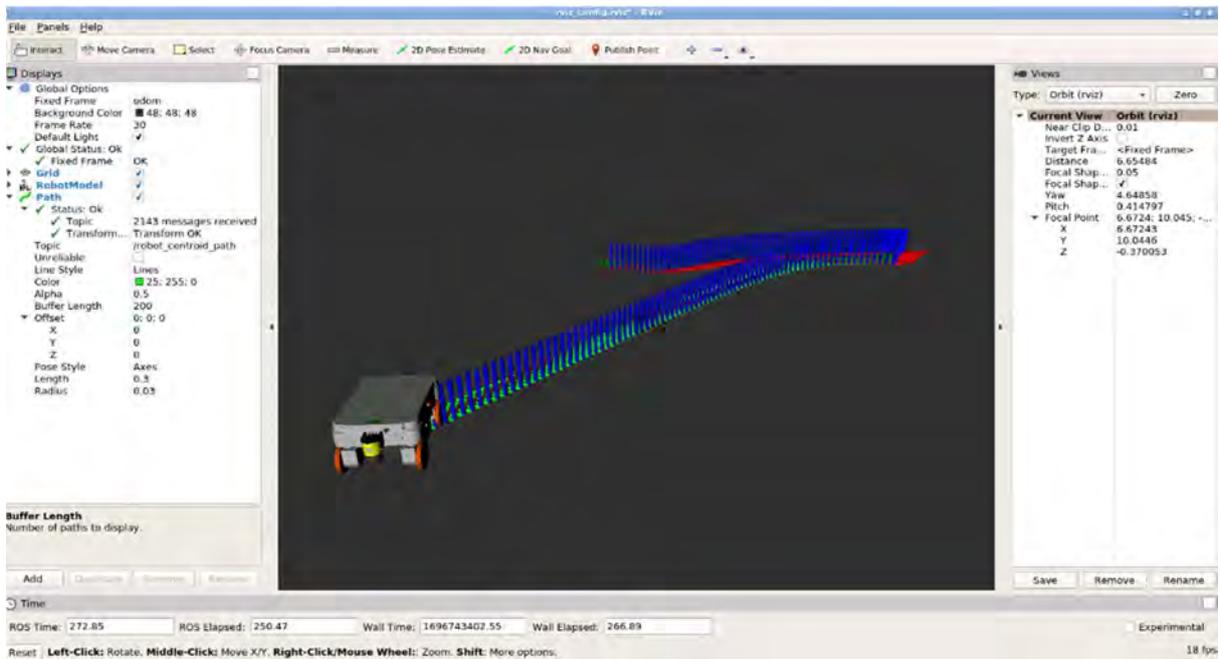


Figura 4.37 Seguimiento de trayectoria diagonal manteniendo la misma orientación. Visualización en RVIZ
Fuente: Propia

b. Control para desplazamiento por escaleras

Dado que el desplazamiento es por escaleras de tramo recto, lo más crucial es el alineamiento y posicionamiento previo a la subida o bajada de escaleras. Explicado esto, queda resaltado la importancia del control posición y orientación con el controlador de trayectoria para que pueda ser exitosa esta etapa.

Luego de ello, se debe aplicar los torques como se ve en la Figura 4.38, de ese modo se consigue una velocidad constante en las subidas y bajadas que efectúe el robot. Con las gráficas se refrenda el torque calculado mediante cinética para el mecanismo de 4 barras.

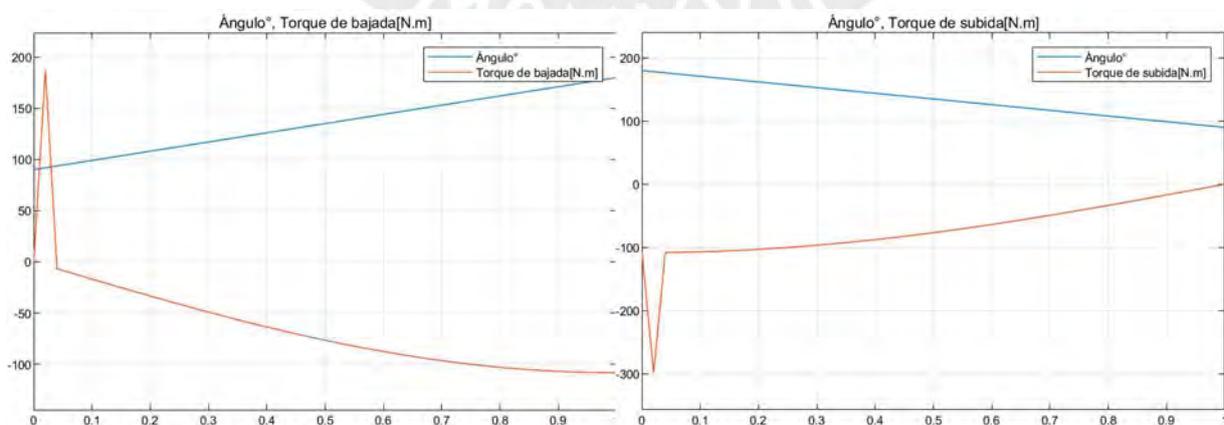


Figura 4.38 Señales de torque para el control del mecanismo de escaleras
Fuente: Propia

c. Control para sistema de elevación

En el Anexo D.4.1 se detalla la estrategia de control de este sistema.

4.4.3 Localización

La localización del robot se realiza con búsqueda informada, lo que significa que previamente el robot tiene información del edificio.

a. Mapa del edificio

Para que el robot pueda ubicar los departamentos, debe tener un mapa por piso. Este mapa suele ser un archivo de imagen el cual es consultado por el robot. Lo usual es que haya uno cuando es un terreno de un solo nivel, para este caso que es un edificio se debe tener más de uno, que represente a cada piso. Esta es una tarea que debe realizarse antes de poner en operación al robot en algún edificio, será realizada haciendo uso del paquete de ROS2 “cartographer_ros” que emplea SLAM para levantar el mapa.

b. Adaptive Monte Carlo Localization - AMCL

Se utiliza este sistema de localización basado en probabilidad, donde se utiliza un ‘filtro de partículas’ que se combinará en este caso con el algoritmo de “likelihood field range finder model” [39]. Consiste en que el robot coloca varios puntos arbitrariamente en el mapa como se observa en la Figura 4.39, luego con el algoritmo “likelihood” se determina la densidad de probabilidad de dónde está realmente el robot, finalmente se vuelve a poner los puntos donde hubo mayor peso. Este proceso se realiza cada 20 cm, con un mínimo de 100 partículas y un máxima de 5000 partículas, todo esto por el costo computacional y recomendación [40].

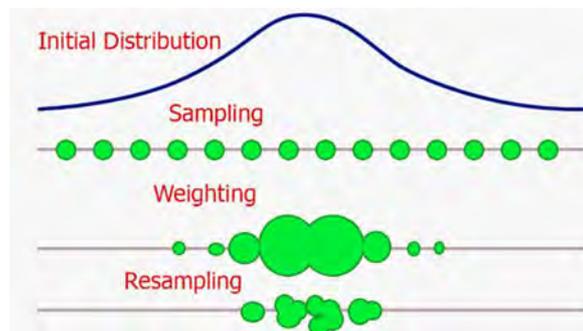


Figura 4.39 Filtro de partículas
Fuente: [41]

Una estrategia para localizarse es que al iniciarse el robot este gire sobre su eje de modo que puede ubicarse en el mapa si se tiene detalles que le permitan localizarse adecuadamente.

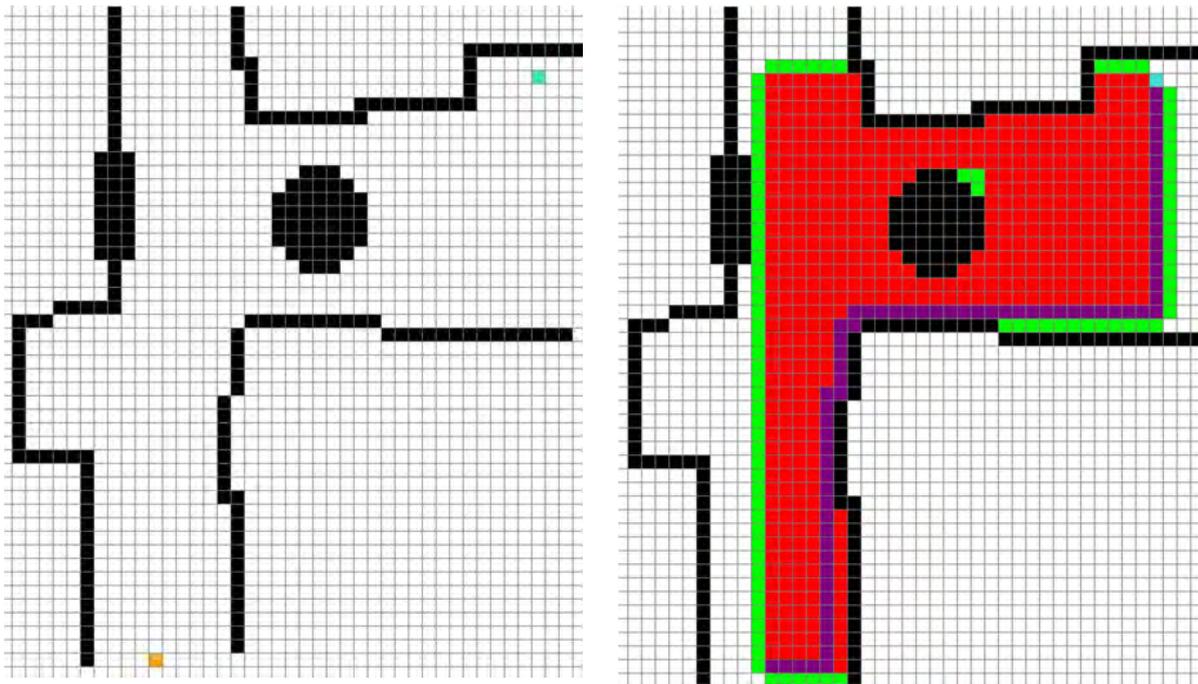
4.4.4 Navegación global

Se escogió el algoritmo de “A*” el cual tiene como objetivo minimizar el costo de la solución, es decir llegar al punto de destino [39]. Donde se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 f(n): & \text{coste más barato estimado de la solución de } n, & (28) \\
 g(n): & \text{coste del camino desde el nodo de inicio al nodo } n, \\
 h(n): & \text{función heurística: coste de ir al nodo objetivo,} \\
 & f(n) = g(n) + h(n).
 \end{aligned}$$

Lo más práctico y sencillo para funciones heurísticas es utilizar la distancia euclidiana. Por otro lado, para las funciones de coste se puede hacer algo como ‘costmap_2d’ (se aplica en ROS), donde se usa información de los sensores, el mapa y ciertas configuraciones para construir este mapa que corresponde a $g(n)$.

En la Figura 4.40, se observa un mapa al lado izquierdo, en color naranja el punto de partida y en color celeste el punto objetivo. Como se observa lo que está hacia adelante del punto naranja (el robot) es un pasillo, en el medio hay una fuente que se representa como un círculo y el rectángulo oscuro representa al cambio entre piso (escalera). Al lado derecha de la misma Figura 4.46, se tiene en color morado el camino tomado por el robot para llegar al punto objetivo, en color rojo están todos los puntos evaluados. Al tener la información del camino esta se puede entregar al controlador de seguimiento de trayectorias del robot para que este se desplace hacia el punto objetivo.



*Figura 4.40 Izquierda: Mapa de un piso. Derecha: Ruta trazada para ir al punto objetivo
Fuente: Propia*

Continuando con el ejemplo anterior, se preparó una simulación en GAZEBO de un 1er piso muy similar al mostrado. En la Figura 4.41, se observa las puertas de los departamentos, la escalera de tramo recto, la fuente circular y al robot ya en su departamento de destino; cabe indicar que el punto de partida corresponde a donde está la línea de color azul, que corresponde al eje Z. Posteriormente, se codificó el programa que emplea ROS1 para ejecutar el seguimiento de la trayectoria que es indicado por el algoritmo A*. En la Figura 4.42, se tiene en color morado la trayectoria seguida para llegar al departamento, esto se visualizó usando RVIZ.



Figura 4.41 Entorno de simulación para validar la navegación por pasillos
Fuente: Propia

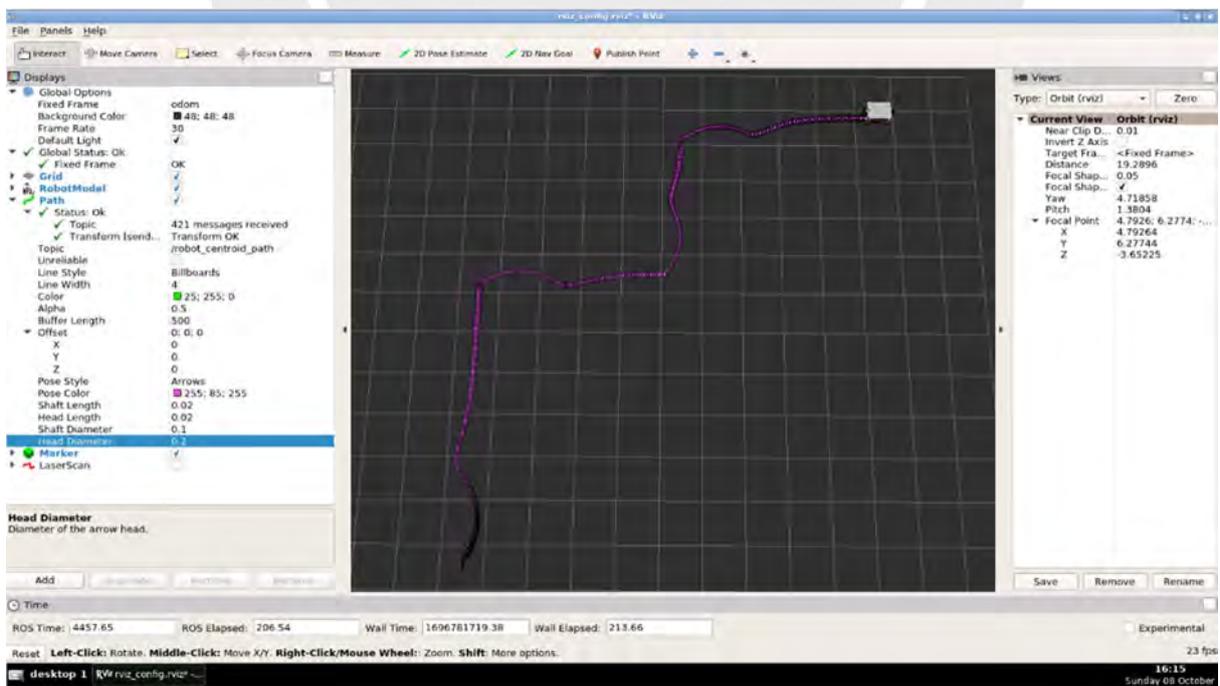


Figura 4.42 Trayectoria seguida por el robot para llegar al departamento indicado
Fuente: Propia

4.4.5 Navegación local

Se optó por utilizar el algoritmo “time elastic band” [42], el cual consiste en deformar la trayectoria cuando hay un obstáculo en la trayectoria determinada por el planificador global, como si se tratase de una banda elástica como lo indica el nombre. Lo bueno de este algoritmo es que toma en cuenta las velocidades máximas y limitaciones de locomoción del robot al generar las bandas alternativas (trayectorias posibles) cuando aparece un obstáculo.

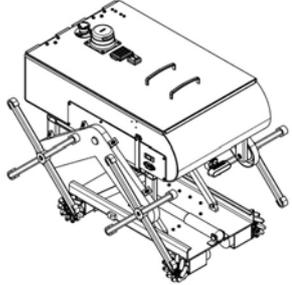
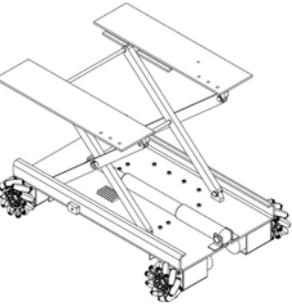
4.5 Lista de planos del producto final

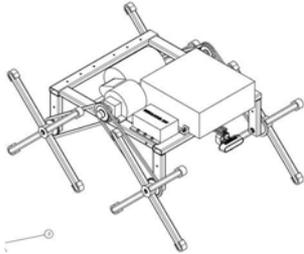
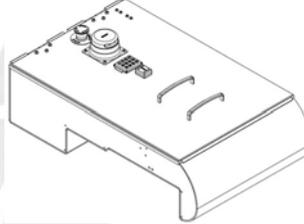
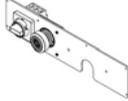
En este apartado se presentan 2 listados de planos del diseño finalizado del robot.

4.5.1 Lista de planos mecánicos

En la Tabla 4.18 se listan los planos del diseño del robot, estos se encuentran en el Anexo E.

*Tabla 4.18 Planos mecánicos
Elaboración propia*

Descripción	Lámina	Imagen referencial del ensamble principal
Ensamble de subsistemas	0	
Ensamble de locomoción por pasillos	A	
Ensamble de chasis de ruedas y mecanismo de tijeras	A1	
Ensamble de rueda	A1.1	
Chasis de ruedas	A1.2	
Marco de tijera	A1.3	
Ensamble de caja electrónica	A2	
Base de caja electrónica	A2.1	
Pared de caja electrónica	A2.2	
Ensamble de rueda derecha	A3	

Ensamble de rueda izquierda	A4	
Ensamble de locomoción por escaleras	B	
Ensamble de chasis de marcos-estrella	B1	
Chasis de estrellas	B1.1	
Ensamble de rueda-estrella delantera	B2	
Marco tetra-estrella delantero	B2.1	
Cubo delantero	B2.1.1	
Eje delantero	B2.2	
Ensamble de ruedas-estrella traseras	B3	
Marco tetra-estrella trasero	B3.1	
Cubo trasero	B3.1.1	
Eje trasero	B3.2	
Ensamble de percepción RGBD	B4	
Cámara y soporte	B4.1	
Ensamble de cajón de carga e interacción con el usuario	C	
Ensamble de cuerpo de cajón y balanzas	C1	
Ensamble de cuerpo de cajón	C1.1	
Base de cajón	C1.1.1	
Pared lateral de cajón	C1.1.2	
Ensamble de balanza	C1.2	
Base de balanza	C1.2.1	
Espaciador de sensor	C1.2.2	
Ensamble de hardware de tapa de cajón	C2	
Tapa de cajón	C2.1	
Ensamble para acelerómetro	C2.2	
Ensamble de lateral derecho	D	
Tapa lateral derecha	D1	
Ensamble de lateral izquierdo	E	
Tapa lateral izquierda	E2	
Ensamble de cobertor de cadena	F	
Cobertor de cadena	F1	
Platina de Fijación	G1	
Punta de estrela	G2	

4.5.2 Lista de planos electrónicos

En la Tabla 4.19 se listan los planos esquemáticos, estos se encuentran en el Anexo D1.

Tabla 4.19 Planos electrónicos
Elaboración propia

Descripción	Lámina	Referencia
Esquema de conexiones 1	1/3	INTERRUPTOR ON/OFF EXPANSOR DE PUERTO SERIAL ALTAVOZ HONKYOB CAMARA INTEL D435I RPLIDAR A3M1 SENSORES INIFRARROJOS LG BATTERY FOR SERVICE ROBOT OLED 0.69" FUSIBLE DE 30A FUSIBLE DE 7.5A CONVERTIDOR BUCK 5V CONVERTIDOR BUCK 12V CONVERTIDOR BUCK 24V RASPBERRY PI 4B+
Esquema de conexiones 2	2/3	CH340E LD1117S33TR_S0T223 LED RESISTENCIA 10K RESISTENCIA 470 SWITCH CAPACITOR ELECTROLITICO CAPACITORES CERAMICOS ESP32 WROOM 32U MODULO HX711 CELDA DE CARGA
Esquema de conexiones 3	3/3	BOTON DE EMERGENCIA CONECTOR 6X2 PAD NUMERICO MOTORES DE RUEDAS OMNIDIRECCIONALES ACELEROMETRO BNO055 SERVO SG90 ACTUADOR LINEAL MOTOR PRINCIPAL DRIVER L298N 5AD DRIVER BTS7969

4.6 Costos del diseño

En el Anexo D.6 se encuentra 2 listas de costos de componentes y manufactura tanto para cosas mecánicas como electrónicas. En la tabla 4.20, se resumen los costos totales, resultando 27,809.76 soles el presupuesto requerido para desarrollar 1 robot.

Tabla 4.20 Presupuesto para proyecto
Elaboración propia

Descripción	Costo [soles]
Costo de componentes y manufactura electrónica	12,795.29
Costo de componentes y manufactura mecánica	6,379.51
Costo de ingeniería [10.00 soles/h]	4,000.00
Importación, impuesto, otros	20% de los otros costos
TOTAL [soles]	27,809.76

CONCLUSIONES

Se concluyó con el diseño integrador de un robot, con la capacidad de cargar y transportar productos para el hogar por escaleras de edificios sin ascensor. Así mismo, se garantizó una carga/descarga ergonómica para dar accesibilidad a las personas con discapacidad, de tercera edad, embarazadas y menores de edad. La operación del robot es confiable, debido a que el robot ejecuta sus 2 tareas fundamentales, de trasladarse y lidiar con escaleras, con la alternativa más adecuada para cada una de ellas. De igual importancia, el hecho que el robot se haya diseñado autónomo permite que el público objetivo no tenga problemas en adaptarse al uso de este.

En cuanto a características técnicas, el robot podrá operar de manera constante por 3 horas a una velocidad de 0.75 m/s, la carga máxima que se admite es de 15 kg, el volumen máximo a poder colocar en el cajón es de 37.14 L y las dimensiones máximas del robot (elevado a altura ergonómica) son 75.4 x 78.7 x 55.7 cm de alto, largo y ancho, respectivamente. Para que el robot funcione, solo se digitará en un keypad el número del departamento de destino, luego el robot navegará de manera autónoma a ese punto del edificio. Como sistemas de seguridad se tiene una balanza interna, sensores de cercanía, botón de emergencia, cámara para identificación de objetos y algoritmos diseñados especialmente para cada tipo de movimiento.

Con relación a la calidad de vida, se cumple con el objetivo de desarrollo sostenible número 3, salud y bienestar, pues se cuida la salud física de los más vulnerables, haciendo que no realicen la ardua labor de carga; por tanto, se reducirán los riesgos de lesiones por sobreesfuerzos, fatiga física, lesiones dorsolumbares y lesiones músculo-esqueléticas. Cabe destacar que el uso de este robot otorga mayor autonomía a cualquier persona, facilitándole la tarea del transporte de sus productos para el hogar dentro de su edificio.

Con relación al enfoque comercial, los propietarios de edificios representan un mercado potencial significativo para la adquisición del robot diseñado. Si bien la falta de ascensores en edificios no es solo un problema del Perú, una revisión en otros mercados podría revelar nuevos potenciales compradores. Por otro lado, supermercados que ofrecen delivery (usando automóvil) y entrega a piso se perfilan como posibles clientes.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Colegio de Arquitectos del Perú, «RNC - Reglamento Nacional de Contruccion ilustrado - Peru». Accedido: 28 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: https://issuu.com/residente/docs/rnc_ilustrado_peru/21
- [2] Instituto Nacional de Estadística e Informática, «Perú: Perfil Sociodemográfico, 2017». Accedido: 1 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1539/libro.pdf
- [3] A. Delafuente, «Número de pisos promedio de edificios de viviendas (2011 - 2018) [INFOGRAFIA]», La República. Accedido: 2 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://larepublica.pe/economia/1375170-numero-pisos-promedio-edificios-viviendas-2011-2018-infografia/>
- [4] Instituto Nacional de Estadística e Informática, «En el Perú existen más de cuatro millones de adultos mayores». Accedido: 28 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://m.inei.gov.pe/prensa/noticias/en-el-peru-existen-mas-de-cuatro-millones-de-adultos-mayores-12356/>
- [5] Instituto Nacional de Estadística e Informática, «Estado de la poblacion peruana 2020». Accedido: 28 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1743/Libro.pdf
- [6] Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, «Manipulación manual de cargas». Accedido: 28 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: http://www3.vivienda.gov.pe/csst/documentos/MANIPULACIÓN_MANUAL_DE_CARGAS-MVCS.pdf
- [7] Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo, «Guía de seguridad y salud en el trabajo para estibadores terrestres y transportistas manuales». Accedido: 23 de enero de 2022. [En línea]. Disponible en: http://www.trabajo.gov.pe/archivos/file/CNSST/GUIA_DE_TIBADORES_FINAL.pdf
- [8] A. E. Praeli Eguiguren, «Resolución ministerial N° 375-2008-TR». Accedido: 28 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: [https://www2.congreso.gov.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/982841B4C16586CD05257E280058419A/\\$FILE/4_RESOLUCION_MINISTERIAL_375_30_11_2008.pdf](https://www2.congreso.gov.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/982841B4C16586CD05257E280058419A/$FILE/4_RESOLUCION_MINISTERIAL_375_30_11_2008.pdf)
- [9] «Delivery creció 250% en el Perú durante la pandemia», Gestión. Accedido: 2 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://gestion.pe/economia/servicio-de-delivery-en-peru-crecio-250-durante-la-pandemia-nndc-noticia/>
- [10] R. PQS, «Peruanos aumentan la frecuencia de compra de alimentos, según Kantar». Accedido: 30 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://pqs.pe/actualidad/peruanos-aumentan-frecuencia-compra-alimentos-kantar/>
- [11] Naciones Unidas, «Objetivo de desarrollo sostenible». Accedido: 1 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [12] J. A. Diego Mas, «Guía para el levantamiento de carga del INSHT», Ergonautas, Universidad Politécnica de Valencia. Accedido: 15 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.ergonautas.upv.es/metodos/ginsht/ginsht-ayuda.php>
- [13] L. J. H. Rasmussen *et al.*, «Association of Neurocognitive and Physical Function with Gait Speed in Midlife», *JAMA Netw Open*, vol. 2, n.º 10, oct. 2019, doi: 10.1001/jamanetworkopen.2019.13123.

- [14] S. Tzafestas, *Introduction to Mobile Robot Control*. Elsevier, 2014. doi: 10.1016/C2013-0-01365-5.
- [15] L. Bruzzone y G. Quaglia, «Review article: Locomotion systems for ground mobile robots in unstructured environments», *Mechanical Sciences*, vol. 3, n.º 2. Copernicus GmbH, pp. 49-62, 2012. doi: 10.5194/ms-3-49-2012.
- [16] Institute of Electrical and Electronics Engineers, «Chaos», Robots IEEE. Accedido: 16 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://robots.ieee.org/robots/chaos/?gallery=photo1>
- [17] Institute of Electrical and Electronics Engineers, «Kobra», Robots IEEE. Accedido: 16 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://robots.ieee.org/robots/kobra/?gallery=photo1>
- [18] «Amoeba GO-1», Amoeba Energy. Accedido: 16 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://en.amoebaenergy.com/product>
- [19] Institute of Electrical and Electronics Engineers, «Digit», Robots IEEE. Accedido: 16 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://robots.ieee.org/robots/digit/?gallery=photo1>
- [20] Institute of Electrical and Electronics Engineers, «Spot», Robots IEEE. Accedido: 16 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://robots.ieee.org/robots/spotmini/?gallery=photo1>
- [21] Institute of Electrical and Electronics Engineers, «ANYmal», Robots IEEE. Accedido: 16 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://robots.ieee.org/robots/anymal/?gallery=photo1>
- [22] Institute of Electrical and Electronics Engineers, «RHex», Robots IEEE. Accedido: 16 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://robots.ieee.org/robots/rhex/?gallery=photo1>
- [23] «ROBOT MÓVIL SUMMIT-XL», Robotnik. Accedido: 16 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://robotnik.eu/es/productos/robots-moviles/summit-xl-es/>
- [24] «Meet Roxo™, the FedEx SameDay Bot®», FedEx. Accedido: 16 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.fedex.com/en-us/innovation/roxo-delivery-robot.html>
- [25] «ROVéo», Rovenso. Accedido: 16 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.rovenso.com/solution/>
- [26] Institute of Electrical and Electronics Engineers, «Handle», Robots IEEE. Accedido: 16 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://robots.ieee.org/robots/handle/?gallery=photo2>
- [27] «RoboSimian», NASA JPL. Accedido: 16 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.jpl.nasa.gov/robotics-at-jpl/robosimian>
- [28] «Swiss-Mile», Swiss-Mile. Accedido: 16 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.swiss-mile.com/>
- [29] A. Day y I. Karamouzas, «A Study in Zucker: Insights on Interactions Between Humans and Small Service Robots», jul. 2023.
- [30] R. J. Roark, W. C. Young, y R. Plunkett, *Formulas for Stress and Strain*, 7th ed., vol. 43, n.º 3. McGraw-Hill, 1976. doi: 10.1115/1.3423917.
- [31] A. Saxena, «Deriving a Generalized, Actuator Position-Independent Expression for the Force Output of a Scissor Lift».
- [32] RENOLD, «Transmission chain Installation, maintenance & designer guide», RENOLD. Accedido: 20 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.renold.es/media/165418/transmission-i-and-m-ren12-eng-10-10.pdf>

- [33] SKF, «Catálogo General de Transmisión de Potencia», Issuu. Accedido: 20 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: https://issuu.com/skfdelperu/docs/cat_logos_general_de_transmision_d
- [34] I. Luuk, «50kg Load Cells with HX711 and Arduino. 4x, 2x, 1x Diagrams». Accedido: 17 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://circuitjournal.com/50kg-load-cells-with-HX711>
- [35] «Módulo HX711 Transmisor de celda de carga», Naylamp mechatronics. Accedido: 17 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://naylampmechatronics.com/fuerza-peso/147-modulo-hx711-transmisor-de-celda-de-carga.html>
- [36] «8:1 Serial Port Expander», AtlasScientific. Accedido: 17 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://atlas-scientific.com/ezo-accessories/81-serial-port-expander/>
- [37] «Compare cameras», intel REALSENSE. Accedido: 20 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.intelrealsense.com/compare-depth-cameras/>
- [38] «How to select the right LiDAR?», Generation Robots. Accedido: 20 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.generationrobots.com/blog/en/how-to-select-the-right-lidar/>
- [39] P. N. J. Russell Stuart, *Inteligencia Artificial Un Enfoque Moderno*. 2004.
- [40] «amcl», ROS.org. Accedido: 10 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://wiki.ros.org/amcl>
- [41] M. Dimitrov, «Particle Filters (Part I)». Accedido: 10 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.lancaster.ac.uk/stor-i-student-sites/martin-dimitrov/2021/05/14/particle-filters/>
- [42] C. Rösmann, «teb_local_planner», ROS.org. Accedido: 19 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: http://wiki.ros.org/teb_local_planner