

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ROBOT TELEOPERADO CAPAZ DE BRINDAR APOYO EN
OPERACIONES DE RECONOCIMIENTO Y RESCATE EN
ESTRUCTURAS INCENDIÁNDOSE**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR:

Marcelo André Gordillo Paredes

ASESOR:

Jorge Luis Isaac Ramírez Chávez

Lima, Junio, 2025

Informe de Similitud

Yo, Jorge Luis Ramírez Chávez,

docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia


Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado

Robot Teleoperado capaz de brindar apoyo en operaciones de reconocimiento y rescate en estructuras incendiándose , del/de la autor(a)/ de los(as) autores(as) Marcelo André Gordillo Paredes,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 8%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 12/06/2025.
- 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, 12 de Junio del 2025

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: Ramirez Chavez Jorge Luis	
DNI: 73107861	Firma 
ORCID: 0000-0002-8155-2178	

RESUMEN

En la presente tesis investiga las necesidades y problemáticas que enfrentan los bomberos al momento de realizar las operaciones de búsqueda y rescate en estructuras incendiándose con el objetivo de diseñar un sistema capaz de brindar asistencia y de esta forma mitigar los riesgos asociados a esta actividad y mejorar la eficiencia en las labores de rescate.

En primer lugar, se realizó un análisis de la literatura existente en el campo de la robótica y sistemas relacionados a este campo. Al analizarla se pudieron determinar los desafíos y riesgos al momento de implementar la robótica a los ambientes extremos, principalmente la exposición a las altas temperaturas la cual restringe mucho el diseño durante la selección de componentes.

Posteriormente, empleando la metodología del “Árbol de Funciones y Medios” se planteó un diseño conceptual preliminar que pueda satisfacer los requisitos planteados y determinando los módulos necesarios a integrar al diseño del robot.

Finalmente, se desarrolló a mayor profundidad cada uno de los módulos, seleccionando componentes, teniendo en cuenta su grado de resistencia térmica, e integrándose bajo una interfaz que le permita a los bomberos poder navegar adecuadamente a través de este ambiente hostil.

En conclusión, el proyecto de tesis busca realizar el diseño de un robot que brinde asistencia a los bomberos durante las operaciones de búsqueda y rescate en estructuras incendiándose, enfocándose en la seguridad en situaciones de alto riesgo y cuyo desarrollo tiene el potencial de salvar vidas, reducir el impacto humano y mejorar la calidad de vida de los involucrados.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Pág.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Presentación de la problemática	1
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Metodología.....	4
1.4. Marco teórico.....	5
1.4.1. Presupuesto público destinado al cuerpo de bomberos.....	5
1.4.2. Equipo para el reconocimiento y rescate en un incendio.....	5
1.4.3. Procedimiento actual para el reconocimiento y rescate en un incendio	9
1.5. Estado del arte	15
1.5.1. Productos comerciales	15
1.5.2. Investigaciones.....	23
Patentes	25
1.5.3. Requisitos regulatorios.....	27
1.5.4. Idea del producto.....	28
CAPÍTULO 2: DISEÑO CONCEPTUAL	29
2.1. Requisitos del Proyecto	29
2.1.1. Requisitos y requerimiento de usuario.....	29
2.1.2. Matriz de requerimientos	31
2.2. Síntesis de estructura y comportamiento general	32
CAPÍTULO 3: CÁLCULOS Y SIMULACIONES	33
3.1. Análisis Estructural y Dimensional	33
3.2. Locomoción	49
3.3. Módulo de Sensado.....	58
3.4. Módulo de visión	62
3.5. Módulo de sonido	66
3.6. Interconexión entre los módulos.....	69
3.7. Sistema de alimentación	70
3.8. Diagrama Esquemático General	73
3.9. Interfaz de comunicación.....	74
3.10. Diagramas de flujo de Control.....	76
3.11. Comunicación remota	81
3.12. Simulación del sensado de los Ultrasónicos	83
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
REFERENCIAS	90

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de tipos de herramientas	8
Tabla 2. Tabla comparativa de productos para reconocimiento y rescate	18
Tabla 3. Tabla comparativa de productos para la lucha contra incendios	22
Tabla 4. Requisitos de usuario	29
Tabla 5. Requisitos de proyecto.....	31
Tabla 6. Parámetros de operación para el sistema de visión.....	32
Tabla 7. Parámetros de operación para detección de obstáculos.....	32
Tabla 8. Parámetros de operación para revisión de temperatura interna en los componentes	32
Tabla 9. Parámetros de operación para estado de la batería	32
Tabla 10. Cálculo de la inversa del factor de conductividad térmica conjunta	36
Tabla 11. Cálculo de la inversa del factor de conductividad térmica conjunta	40
Tabla 12. Cálculo de la inversa del factor de conductividad térmica conjunta	40
Tabla 13. Cálculo de la inversa del factor de conductividad térmica conjunta	41
Tabla 14. Resolución de los casos	41
Tabla 15. Resolución de los casos con enfriamiento.....	44
Tabla 16. Cálculo de la inversa del factor de conductividad térmica conjunta	51
Tabla 17. Velocidad de Operación para distintos casos	52
Tabla 18. Cálculo de la Fuerza de Tracción	54
Tabla 19. Cálculo del Torque del Motor.	54
Tabla 20. Cálculo de la velocidad del motor.....	55
Tabla 21. Cuadro Comparativo de Motores.....	55
Tabla 22. Cálculo de la velocidad del motorreductor	57
Tabla 23. Cuadro Comparativo de Lidar	58
Tabla 24. Cuadro Comparativo Sensores Ultrasónicos	60
Tabla 25. Cuadro Comparativo de Cámaras Térmicas.....	63
Tabla 26. Especificaciones Técnicas: MG995.....	65
Tabla 27. Cuadro Comparativo Micrófono.....	67
Tabla 28. Cuadro Comparativo Altavoz.....	68
Tabla 29. Cálculo de la Batería 1	70
Tabla 30. Cálculo de la Batería 2	72
Tabla 31. Lista de planos	87
Tabla 32. Cotización del proyecto.....	88

INDICE DE IMAGENES

Ilustración 1: Mapa escenario de riesgo por incendios urbanos de Cercado de Lima - CENEPRED y MML.....	1
Ilustración 2: Mapa de densidad de registros de incendios urbanos en Cercado de Lima - CENEPRED y MML.....	2
Ilustración 3: Mapa de lotes según número de pisos de edificaciones en Cercado de Lima - CENEPRED y MML	3
Ilustración 4: Equipo de protección personal.	6
Ilustración 5: Tabla relación (Tasa consumo de aire) Vs. (Valores PSI - % Llenado - Tiempo de Uso).....	7
Ilustración 6: Cámara térmica	9
Ilustración 7: Ruta de búsqueda primaria.....	10
Ilustración 8: Patrón de búsqueda primaria	11
Ilustración 9: Traslado en brazos.....	12
Ilustración 10: Traslado por arrastre inclinado	12
Ilustración 11: Traslado por arrastre con manta.....	13
Ilustración 12: Traslado por arrastre horizontal	13
Ilustración 13: Traslado por las extremidades.....	14
Ilustración 14: Traslado en plataforma de asiento	14
Ilustración 15: Robot ANYmal.....	15
Ilustración 16: Robot TRACKREITAR	16
Ilustración 17: Robot ATLAS.....	17
Ilustración 18: Robot PIAP IBIS	17
Ilustración 19: Robot Colossus	19
Ilustración 20: MVF-5.....	20
Ilustración 21: Robot TRACKREITAR FIREFIGHTING	21

<i>Ilustración 22: Robot LUF 300 HF</i>	21
<i>Ilustración 23: Robot BEAR</i>	23
<i>Ilustración 24: Robot CENTAURO</i>	24
<i>Ilustración 25: Robot SAFFIR</i>	25
<i>Ilustración 26: Sistema de válvulas para doble agente extintor</i>	26
<i>Ilustración 27: Search and rescue robot</i>	26
<i>Ilustración 28: Full terrain crawler-type multifunctional fire-fighting truck</i>	27
<i>Ilustración 29: Armadura parte inferior</i>	34
<i>Ilustración 30: Armadura parte superior</i>	34
<i>Ilustración 31: Unión Armadura parte Inferior y Superior</i>	35
<i>Ilustración 32: Cuadro de Propiedades del Inconel 601</i>	36
<i>Ilustración 33: Cuadro de Propiedades del aire</i>	39
<i>Ilustración 34: TEC1-12730</i>	42
<i>Ilustración 35: Curva de funcionamiento TEC1-12730</i>	42
<i>Ilustración 36: Simulación Térmica Caso 1</i>	44
<i>Ilustración 37: Silla de Rescate</i>	45
<i>Ilustración 38: Unión Módulos</i>	45
<i>Ilustración 39: Esfuerzo de Von Misses en Silla de Rescate</i>	46
<i>Ilustración 40: Desplazamientos en Silla de Rescate</i>	46
<i>Ilustración 41: Factor de Seguridad en Silla de Rescate</i>	47
<i>Ilustración 42: Esqueleto del sistema</i>	47
<i>Ilustración 43: Esfuerzo de Von Misses en Esqueleto del sistema</i>	48
<i>Ilustración 44: Desplazamientos en Esqueleto del sistema</i>	48
<i>Ilustración 45: Factor de Seguridad en Esqueleto del sistema</i>	49
<i>Ilustración 46: Rueda tipo oruga</i>	50
<i>Ilustración 47: Ubicación Rueda Tipo Oruga</i>	50
<i>Ilustración 48: Características Físicas, correa dentada trapezoidal</i>	51
<i>Ilustración 49: Diagrama de cuerpo libre del sistema subiendo una pendiente</i>	53
<i>Ilustración 50: Curva de funcionamiento Motorreductor MPP24 - Caja Reductora 30:1</i>	57
<i>Ilustración 51: YDLIDAR X4</i>	60
<i>Ilustración 52: Sensor Ultrasónico UB500-18GM75-I-V15</i>	61
<i>Ilustración 53: Arreglo de sensores ultrasónicos</i>	62
<i>Ilustración 54: Cámara térmica MLX90640</i>	64
<i>Ilustración 55: Columna giratoria del módulo de visión</i>	65
<i>Ilustración 56: Cilindro protector</i>	66
<i>Ilustración 57: SPW2430</i>	67
<i>Ilustración 58: CMT-12-SMT-TR</i>	68
<i>Ilustración 59: Diagrama de Interconexión</i>	69
<i>Ilustración 60: Banco de Baterías 6S8P</i>	71
<i>Ilustración 61: RT 1232</i>	72
<i>Ilustración 62: Diagrama Esquemático del Sistema Mecatrónico</i>	73
<i>Ilustración 63: Interfaz de página web</i>	75
<i>Ilustración 64: Diagrama de control entre equipos</i>	76
<i>Ilustración 65: Diagrama de flujo primer y segundo Arduino</i>	77
<i>Ilustración 66: Diagrama de flujo Raspberry</i>	78
<i>Ilustración 67: Diagrama de flujo Nube y funciones</i>	79
<i>Ilustración 68: Diagrama de flujo Nube y funciones</i>	80
<i>Ilustración 69: Diagrama de flujo Nube y funciones</i>	80
<i>Ilustración 70: Interfaz de página web</i>	82
<i>Ilustración 71: Diagrama esquemático Primer Arduino</i>	83
<i>Ilustración 72: Diagrama de bloques - Transmisión de señal de sensado - Sensor Ultrasónico</i>	84
<i>Ilustración 73: Distancia real de objeto detectado</i>	84
<i>Ilustración 74: Señal de entrada por el Sensor Ultrasónico</i>	85
<i>Ilustración 75: Señal de salida del Sensor Ultrasónico</i>	86
<i>Ilustración 76: Señal de salida del Adecuador de señal</i>	86

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se explicará la problemática y analizarla presentando los objetivos y proponiendo una solución.

1.1. Presentación de la problemática

En el Perú, el cuerpo de bomberos está conformado por voluntarios que tienen la labor de atender distintas emergencias como la lucha contra incendios, enfatizando en el proceso de reconocimiento y rescate de víctimas, siendo esta una de las actividades más peligrosas debido a los riesgos que conlleva.

Según el Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú (2025), durante el año 2024 hubo 10918 incendios a nivel nacional, de los cuales 6394 sucedieron en Lima siendo Cercado de Lima el distrito con mayor incidencia. Como se puede ver en la Ilustración 1, la zona de Cercado de Lima presenta un índice alto en general por los 13141 lotes los cuales están catalogados en nivel muy alto y alto en riesgo de incendio (CENEPRED, 2020).

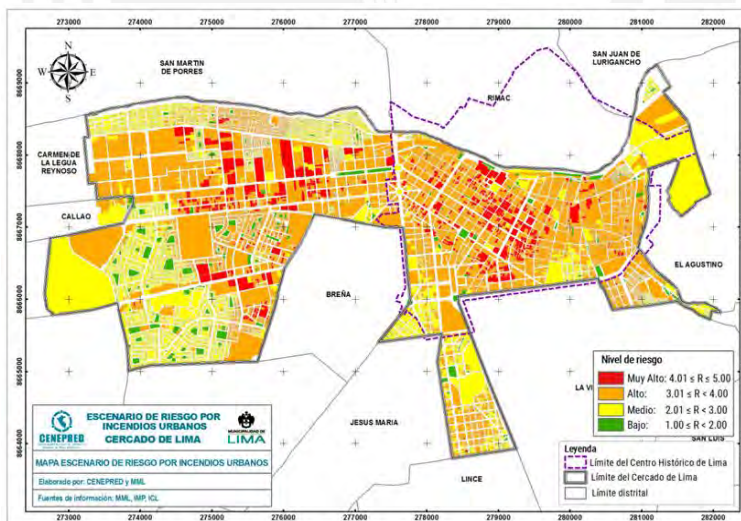


Ilustración 1: Mapa escenario de riesgo por incendios urbanos de Cercado de Lima - CENEPRED y MML.

Tomado de CENEPRED (2020) *Escenario de riesgo por incendio urbano del Cercado de Lima*

Esta situación se ve reflejada en la Ilustración 2 donde se detalla la densidad de incendios en la zona registrados por los bomberos siendo las partes de mayor ocurrencia las que presentan una

mayor concentración de estructuras con niveles de riesgo de incendio alto lo cual aumentará las labores de reconocimiento y rescate de víctimas.

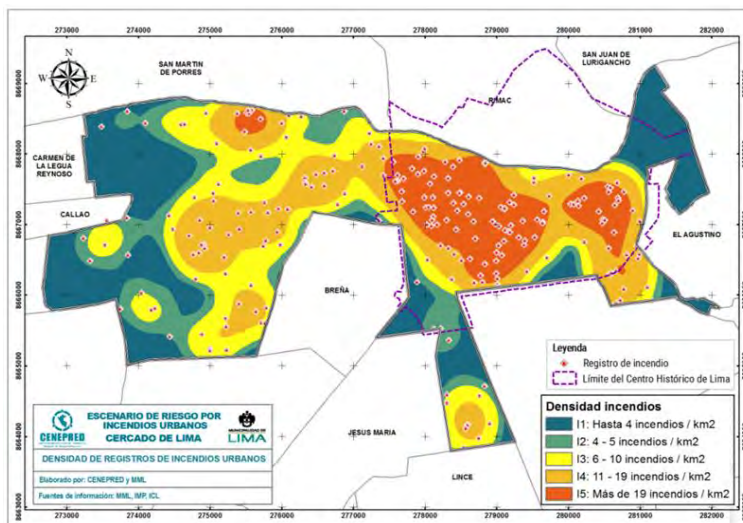


Ilustración 2: Mapa de densidad de registros de incendios urbanos en Cercado de Lima - CENEPRED y MML Tomado de CENEPRED (2020) Escenario de riesgo por incendio urbano del Cercado de Lima

Además de lo mencionado anteriormente, existen factores que aumentan el riesgo que conllevan las labores de reconocimiento y rescate de víctimas durante un incendio.

El primer factor es el equipo de protección de los bomberos, aparte del peso que dificulta la movilidad, este solo permite aguantar en contacto directo con el fuego durante 15 minutos efectivos en condiciones extremas y con un uso controlado una hora por lo cual resulta ser insuficiente porque los incendios duran más tiempo (Orellana, 2016). Por otro lado, tenemos la falta de personal ya que no todos los incendios son atendidos de inmediato y puede existir lapsos de hasta una hora para la atención de incendios debido a que el protocolo establece que cada grupo mínimo debe estar conformado por dos personas.

Por último, tenemos un inconveniente relacionado a la distribución de la ciudad, poniendo de ejemplo nuevamente a Cercado de Lima se puede apreciar que hay múltiples estructuras conformadas por varios pisos como se ve en la Ilustración 3 lo que dificulta el reconocimiento y ayuda a la propagación del fuego. Además, de acuerdo con el Estudio del Mercado de Edificaciones en Lima Metropolitana realizado por CAPECO (2020), en Lima Centro, conformada por el Cercado, Breña, La Victoria y Rímac cuenta con edificaciones de 13.9 pisos en promedio.

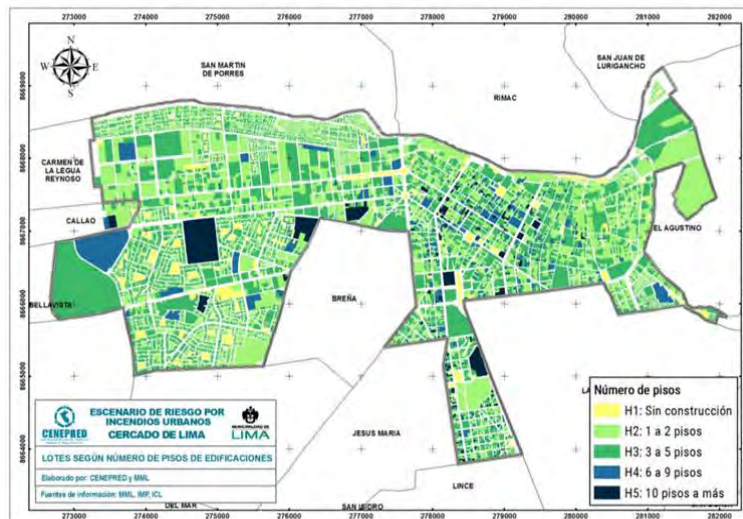


Ilustración 3: Mapa de lotes según número de pisos de edificaciones en Cercado de Lima - CENEPRED y MML Tomado de CENEPRED (2020) Escenario de riesgo por incendio urbano del Cercado de Lima

Entre las consecuencias que pueden ocurrir tanto a los bomberos y las víctimas, aparte de las quemaduras y muerte, existen otras secuelas que pueden desarrollarse con el paso de los años debido a la rutina que estos desempeñan y largos periodos de exposición a altas temperaturas y gases tóxicos. Primero tenemos a las enfermedades cardiacas que se estima que el 45% de los fallecimientos de los bomberos está relacionado a ataques del corazón debido a su exposición continua al monóxido de carbono y a las altas temperaturas. También tenemos al cáncer debido a la exposición de los bomberos durante los incendios a los productos químicos favorece el desarrollo de ciertos tipos de cáncer como el de cerebro, colon, pulmón, vejiga y riñón. Entre las secuelas más comunes se encuentran las enfermedades respiratorias causadas también debido a la exposición a material químico que ocasiona en muchos casos un daño permanente a los pulmones. Todos estos factores causan que los bomberos vivan alrededor de 9 años menos que las personas promedio (Segunda Compañía de Bomberos de Santiago, s.f.).

Se propone el diseño de un sistema mecatrónico capaz de realizar apoyo en labores de reconocimiento y rescate durante incendios reduciendo el tiempo de exposición de las personas a situaciones peligrosas.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de la presente tesis es el diseño de un sistema mecatrónico capaz de realizar apoyo en labores de reconocimiento y rescate durante incendios reduciendo el tiempo de exposición de las personas a situaciones peligrosas. A continuación, se presentan los objetivos específicos:

- Desarrollar el concepto de solución en base a la metodología de diseño detallada en la siguiente sección.
- Diseñar la estructura mecánica del sistema mecatrónico según requerimiento de solución.
- Diseñar el sistema eléctrico y electrónico teniendo en consideración las funcionalidades del sistema mecatrónico.
- Presentar planos mecánicos y electrónicos
- Presentar el algoritmo de control
- Diseñar la interfaz para el sistema
- Evaluar el costo del proyecto

1.3. Metodología

Para el desarrollo del proyecto se emplea la siguiente metodología:

- Análisis de la problemática.
- Definir requerimientos del usuario.
- Definir las funciones del sistema.
- Utilizar la macro Árbol de Funciones y Medios (De Negri, Muñoz, & Vígolo, 2021) para realizar la matriz de soluciones y evaluación técnico/económica.
- Diseño de estructura mecánica.
- Diseño de módulos funcionales.
- Integración de sistema mecánico, electrónico y de control

1.4. Marco teórico

En el presente capítulo se describe el contexto actual en el que se encuentra el Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú (CGBVP) enfocándose principalmente en el proceso de reconocimiento y rescate de víctimas en incendios.

1.4.1. Presupuesto público destinado al cuerpo de bomberos

El Ministerio del Interior (2016) mediante el decreto legislativo N°1260 creó La Intendencia Nacional de Bomberos del Perú (INBP) la cual se encargaría de regular al CGBVP. Entre las funciones que ejerce está el proporcionar los bienes y servicios necesarios para el desempeño de las funciones a los bomberos, y la elaboración de su presupuesto.

En el año 2018, el Gobierno suministró un presupuesto suplementario de 23,4 millones de soles adicionales al presupuesto anual de 76,6 millones de soles que se destinó al mantenimiento del parque automotor, y mantenimiento, reparación y acondicionamiento de la infraestructura de las compañías de bomberos (Ministerio de Economía y Finanzas, 2018). Además, durante la pandemia se amplió el presupuesto por temas de sanidad como las pruebas moleculares, alcohol en gel, mascarillas, entre otros. Asimismo, durante este año 2022 han asignado 1.7 millones de soles adicionales destinados a la compra de combustibles (Ministerio de Economía y Finanzas, 2022).

Sin embargo, hay registros preocupantes como en el 2018 donde la Defensoría del Pueblo mediante una nota de prensa señaló la deficiencia presupuestal por parte del INBP al tener 31 vehículos en Lima fuera de servicio debido a la falta de combustible y la ausencia de nueva indumentaria, incluso solo habiendo ejecutado alrededor del 20% del presupuesto anual a cinco meses de concluir el año (Defensoría del Pueblo, 2022). De la misma manera, este año 2022, la ciudadanía ha presenciado cómo los bomberos necesitan vender productos para la compra de su indumentaria o la reparación de sus vehículos debido a la falta de presupuesto.

1.4.2. Equipo para el reconocimiento y rescate en un incendio

A continuación, se enumeran los implementos necesarios para realizar de una forma adecuada el procedimiento de reconocimiento y rescate en un incendio.

Equipo de protección personal

Conjunto de elementos que permiten al bombero desempeñar sus funciones al protegerlo lo mejor posible de las altas temperaturas y gases nocivos. En Ilustración 4, se muestra que el equipo está conformado por un casco, capucha, equipo de protección respiratorio autónomo (EPRA), botas, capote, guantes, pantalón y protección para los ojos.



Ilustración 4: Equipo de protección personal.

Tomado del CGBVP (2017) *Curso Búsqueda y Rescate en Estructuras Incendiándose - Brei*

El EPRA tiene implementado un sistema de seguridad para respiración de emergencias, un dispositivo de sistema de seguridad personal (PASS) que manda una alerta cuando detecta que el bombero ha estado inmóvil alrededor de 30 segundos y una alarma de baja presión que mandará una alerta en caso se esté consumiendo el aire de reserva. Según el Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (2017), un hombre adulto consume en promedio 40 litros por minuto bajo una carga de trabajo moderada por lo que en la, podemos observar que un respirador tendrá un tiempo máximo de 45 minutos.

Tabla Relación (Tasa Consumo Aire)											1800 LTS. 4500 PSI.			
Vs. (Valores PSI - % Llenado - Tiempos de Uso)														
TT = Tiempo Total - TE = Tiempo Efectivo - TR = Tiempo Reserva														
Esfuerzo Físico	Tasa Consumo Aire Lts./min	4500 psi.	4000 psi.	3500 psi.	3000 psi.	2500 psi.	2000 psi.	1500 psi.						
		45	40	35	30	25	20	15						
		100%	89%	78%	67%	56%	44%	33%						
		TT	TE	TT	TE	TT	TE	TT	TE	TT	TE	TR		
Nominal	40	45:00	30:00	40:03	25:03	35:06	20:06	30:09	15:09	25:12	10:12	19:48	04:48	15:00
	50	36:00	24:00	32:02	20:02	28:05	16:05	24:07	12:07	20:10	08:10	15:50	03:50	12:00
Alto	60	30:00	20:00	26:42	16:42	23:24	13:24	20:06	10:06	16:48	06:48	13:12	03:12	10:00
	70	25:43	17:09	22:53	14:19	20:03	11:29	17:14	08:39	14:24	05:50	11:19	02:45	08:34
Muy Alto	80	22:30	15:00	20:01	12:31	17:33	10:03	15:04	07:34	12:36	05:06	09:54	02:24	07:30
Extremo	90	20:00	13:20	17:48	11:08	15:36	08:56	13:24	06:44	11:12	04:32	08:48	02:08	06:40
	100	18:00	12:00	16:01	10:01	14:02	08:02	12:04	06:04	10:05	04:05	07:55	01:55	06:00
Presión de Alerta x 100		3000 psi.	2750 psi.	2500 psi.	2250 psi.	2000 psi.	1750 psi.							
		30	28	25	23	20	18							

Ilustración 5: Tabla relación (Tasa consumo de aire) Vs. (Valores PSI - % Llenado - Tiempo de Uso). Tomado del CGBVP (2017) Curso Búsqueda y Rescate en Estructuras Incendiándose - Brei

Equipo para entrada forzada

Conjunto de herramientas cuya función es el crear un acceso al domicilio o habitación debido a la falta de una ruta. Las herramientas que conforman esta categoría se pueden subdividir en 3 y su uso dependerá de las circunstancias.

Primero tenemos a las herramientas de corte y golpe que están conformadas por la motosierra, motoamoladora, cizalla, hacha, martillo, combo, entre otros. La mayoría de estas herramientas son empleadas al momento de ingresar al domicilio, sin embargo, su uso en interiores no es adecuado debido a su falta de portabilidad por lo que el protocolo establece el uso del hacha en estos casos.

Segundo tenemos a las herramientas para separar y apretar que está conformado principalmente por el separador hidráulico. Su uso es en casos de aprisionamiento de víctimas, apertura de puertas y levantamiento de cargas.

Por último, tenemos a las herramientas de palanca que están conformadas por la barra y halligan. Se destaca este último por su versatilidad al estar compuesta por una garra, una hoja y un pico que permite acceder a distintos tipos de puertas. En conjunto a un hacha plana son la combinación más usada por el cuerpo de bomberos.

Tabla 1.

Tabla de tipos de herramientas

	Función	Ejemplos
Herramientas de corte o golpe	Apertura de puertas, romper obstáculos.	Hacha, martillo, motosierra, combo, entre otros
Herramientas para separar o apretar	Apertura de puertas, levantamiento de cargas.	Separador hidráulico
Herramientas de palanca	Apertura de puertas, perforar superficies, romper obstáculos.	Barra, halligan

Nota. Elaboración propia

Sistema de control personal

Conjunto de elementos que se centran en el control del bienestar del personal. Está conformado por una cuerda guía, una bolsa para la cuerda guía, cuerda de vida personal, una tarjeta administrativa de control del bombero con todos los datos personales importantes, un tablero de control y un dispositivo PASS.

El tablero de control o también conocido como pizarra permite un control idóneo de recursos humanos y logísticos al momento de realizar el reconocimiento y rescate en el que se almacenan los datos de cada equipo. Principalmente, se controla los tiempos como la hora de entrada, hora de alerta y hora de salida de cada equipo, y el estado del EPRA en cada ronda.¹⁰

Cámara térmica

Herramienta indispensable en la lucha contra incendios ya que esta permite captar a través del humo los puntos calientes facilitando el reconocimiento y rescate. Es una cámara de imágenes infrarrojas empleada en la evaluación del incendio determinando los riesgos en la edificación, al

buscar víctimas o el apoyo a sus compañeros gracias a que se transmiten las imágenes en tiempo real a la brigada. Se emplea en muchos países incluyendo Perú.¹⁰



Ilustración 6: Cámara térmica

Tomado de la Academia Nacional de Bomberos de Chile (2018) *Guía de Autoinstrucción N°7 Técnicas de Búsqueda y Rescate en Incendios*

1.4.3. Procedimiento actual para el reconocimiento y rescate en un incendio

El realizar el reconocimiento y rescate de víctimas conlleva una planificación y control de la situación bajo un protocolo como se describe a continuación.

Planificación del reconocimiento y rescate

La planificación empieza en el instante en el que se recibe la alarma de incendio donde se consideran factores como el tipo de estructura afectada, la hora y día estimando el número de posibles víctimas y ubicaciones. Para identificar prioridades en las acciones de búsqueda se realizan consultas a testigos del lugar del incendio. Las prioridades estarán determinadas en el siguiente orden: por la zona más afectada, la zona con mayor cantidad de víctimas, los que permanezcan aún en el área del incendio y por último las áreas expuestas.

El tipo de búsqueda y el procedimiento por realizar en general dependerá del estado del incendio clasificándose en incendio muy pequeño, incendio activo y edificación totalmente en llamas. La primera no representa un peligro inmediato para la vida por lo que se realizará una búsqueda interior tanto para despejar la zona como verificar el estado del fuego. El incendio activo representa un mayor peligro por lo que se realizan las acciones de rescate en conjunto a las de control de incendio realizando primero una búsqueda primaria y posteriormente una búsqueda secundaria. En el caso de edificación totalmente en llamas, la búsqueda primaria es imposible y la

supervivencia de víctimas es poco probable por lo que una vez controlado el incendio, y la edificación se encuentre iluminada y ventilada se procederá a realizar una búsqueda secundaria.¹⁰

Búsqueda de supervivientes

Esta etapa se centra en la búsqueda de supervivientes que puede subdividirse en búsqueda primaria y búsqueda secundaria las cuales son empleadas en distintas circunstancias.

La búsqueda primaria se realiza mientras se está realizando el ataque ofensivo desde el interior de la edificación y usado cuando aún hay ocupantes. El bombero deberá estar equipado con una herramienta de apertura, hacha plana, radio portátil y un extintor de agua. Cada equipo deberá estar conformado mínimo por 2 bomberos y con un máximo de 4. El desplazamiento dentro deberá ser gateando para evitar el humo y tanteando en un mismo sentido entrando en las habitaciones con la mano en la pared, como se ilustra en la Ilustración 7, utilizando patrones de búsqueda preferiblemente empleando el hacha como una extensión del brazo para poder abarcar una mayor área de búsqueda. Dentro de cada habitación un bombero permanecerá en la entrada, denominado ancla, y el resto del equipo serán buscadores que revisarán la habitación. En caso el bombero se pierda puede emplear su cuerda guía o deberá buscar una manguera y orientarse usando los embones para encontrar la salida.¹⁰

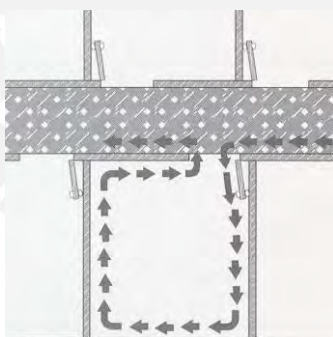


Ilustración 7: Ruta de búsqueda primaria
Tomado del CGBVP (2017) *Curso Búsqueda y Rescate en Estructuras Incendiándose - Brei*



Ilustración 8: Patrón de búsqueda primaria
Tomado del CGBVP (2017) *Curso Búsqueda y Rescate en Estructuras Incendiándose - Brei*

La búsqueda secundaria se realizará en todas las habitaciones una vez haya sido controlado el incendio. Esta búsqueda es más exigente por lo que se moverán todos los muebles en busca de supervivientes. En caso no se haya realizado con anterioridad, revisar los lugares con probabilidad de supervivencia donde se pudieron refugiar las víctimas como puede ser roperos, armarios, sótanos, baños, duchas, detrás de muebles, debajo de las escaleras o de la cama.¹⁰

Técnicas de transporte de víctimas

Según la Academia Nacional de Bomberos de Chile (2018), existen varios tipos de técnicas al momento de transportar a las víctimas correctamente, teniendo en consideración que los bomberos deberán cuidar su cuerda de vida y el estado del EPRA debido a que son acciones que requieren de un mayor esfuerzo y por ende consumirá más volumen de aire. Las técnicas de transporte pueden clasificarse en:

- Traslado en brazos: Empleado en niños o adultos conscientes en el que se deberá colarse en frente de la víctima levantandola por debajo de las rodillas y hombros manteniendo la espalda recta mientras se traslada a un lugar seguro como se muestra en la Ilustración 9.



Ilustración 9: Traslado en brazos

Tomado de la Academia Nacional de Bomberos de Chile (2018) *Guía de Autoinstrucción N°7 Técnicas de Búsqueda y Rescate en Incendios*

- Traslado por arrastre inclinado: Empleado principalmente en víctimas inconscientes en el que el bombero pondrá a la víctima de espaldas para ubicarse detrás de su cabeza y levantarla por debajo de sus brazos arrastrandola a un lugar seguro como se muestra en la Ilustración 10.



Ilustración 10: Traslado por arrastre inclinado

Tomado de la Academia Nacional de Bomberos de Chile (2018) *Guía de Autoinstrucción N°7 Técnicas de Búsqueda y Rescate en Incendios*

- Traslado de arrastre con manta: Empleado en casos donde el bombero no pueda levantar a la víctima por lo que se asegurará a la víctima enrollándola en una manta manteniendo su cara descubierta para trasladarla finalmente a una zona segura como se muestra en la Ilustración 11.



Ilustración 11: Traslado por arrastre con manta
Tomado de la Academia Nacional de Bomberos de Chile (2018) *Guía de Autoinstrucción N°7 Técnicas de Búsqueda y Rescate en Incendio*

- Traslado por arrastre horizontal: Empleado en víctimas no valentes pero conscientes por lo que esta se sujetará al cuello del bombero que se desplaza gateando a una distancia segura de la zona térmica como se muestra en la Ilustración 12.



Ilustración 12: Traslado por arrastre horizontal
Tomado de la Academia Nacional de Bomberos de Chile (2018) *Guía de Autoinstrucción N°7 Técnicas de Búsqueda y Rescate en Incendio*

- Traslado por las extremidades: Técnica que requiere a dos bomberos que se realiza de pie cuando no haya una capa térmica cercana. El procedimiento del primero bombero es igual al traslado por arrastre inclinado, pero el segundo bombero sujetará y levantará a la víctima por debajo de las rodillas para su traslado como se muestra en la Ilustración 13.



Ilustración 13: Traslado por las extremidades
Tomado de la Academia Nacional de Bomberos de Chile (2018) *Guía de Autoinstrucción N°7 Técnicas de Búsqueda y Rescate en Incendio*

- Traslado en plataforma de asiento: Requiere de dos bomberos, en el que se coloca a la víctima de espaldas y se posicionará un bombero a cada lado. Levantarán a la víctima por debajo de las rodillas y de los hombros para trasladarla a un lugar seguro como se muestra en la Ilustración 14.



Ilustración 14: Traslado en plataforma de asiento
Tomado de la Academia Nacional de Bomberos de Chile (2018) *Guía de Autoinstrucción N°7 Técnicas de Búsqueda y Rescate en Incendio*

1.5. Estado del arte

En el presente subcapítulo se analiza y compara el estado del arte de distintos sistemas robóticos enfocados en la lucha contra incendios además del reconocimiento y rescate permitiendo determinar los requisitos regulatorios y plantear la idea del producto.

1.5.1. Productos comerciales

En este apartado se analizará distintos productos que se encuentran en el mercado clasificándolos y comparándolos en base a la labor que desempeña cada uno.

-Productos para reconocimiento y rescate

A continuación, se expondrán los productos en el mercado centrados en la labor de búsqueda y rescate de personas.

ANYmal

Robot fabricado por la empresa suiza, ETH Zürich, que puede desempeñar múltiples tareas como la búsqueda y rescate de personas. Es un robot cuadrúpedo como se puede ver en la Ilustración 15, donde las patas están hechas a base de fibra de carbono y con sensores de contacto en la planta de cada pata. Posee un marco de protección para el cuerpo que resiste grandes impactos además de un escáner láser para la localización y mapeo del área en conjunto a una cámara térmica de visión panorámica en el cabezal. Este producto es altamente personalizable con múltiples accesorios entre la que destaca la implementación de un brazo articulado para el desplazamiento de cargas (ETH Zürich, 2016).



Ilustración 15: Robot ANYmal
Tomado de ETH Zürich (2016) *Robotic Systems Lab: ANYmal*

TRACKREITAR - Rescate

El robot TRACKREITAR de la compañía Leotronics posee una configuración orientada al rescate de personas como se muestra en la Ilustración 16. Este robot emplea su inteligencia artificial para hallar una ruta idónea durante la evacuación pudiendo llevar una carga de 100 kg en su camilla incorporable, es decir, el peso de una persona promedio. Destaca por su alta personalización ya que cuenta con una versión de pinza para el rescate de personas (Leotronics, 2022).



Ilustración 16: Robot TRACKREITAR
Tomado de Leotronics (2022) *TRACKREITAR ROBOTS DE RESCATE*

ATLAS

Es un robot humanoide bípedo fabricado por la compañía Boston Dynamics como se muestra en la Ilustración 17. Sus mejoras con el tiempo han optimizado su diseño midiendo 1.8 m y pesa 89 kg. Es capaz de realizar saltos de 40 cm de forma continua indefinidamente y realizar acciones humanas como sería la apertura de puertas, entrar un edificio o retirar obstáculos. Además, cuenta con un reconocimiento de objetos y obstáculos mediante un hardware de visión (Boston Dynamics, 2017).



Ilustración 17: Robot ATLAS
Tomado de Boston Dynamics (2017) *ATLAS*

PIAP IBIS

Robot teleoperado de la empresa Lukasiewicz perteneciente a la serie PIAP que se centra en el reconocimiento y eliminación de artefactos explosivos, sin embargo, se puede adaptar para desempeñar tareas de rescate de personas. Destaca principalmente en su maniobrabilidad y movilidad gracias a su diseño de seis ruedas que ayuda a superar las irregularidades del terreno como se observa en la Ilustración 18. Presenta un manipulador de brazo extensible de seis grados de libertad que le permite manipular hasta 50 kg a una distancia mayor a 3 metros (Antyterroryzm, 2022).



Ilustración 18: Robot PIAP IBIS
Tomado de Antyterroryzm (2022) *IBIS: Robot do działań pirotechnicznych i rozpoznania*

Cuadro comparativo

A continuación, se comparan los productos para reconocimiento y rescate en distintos aspectos de su funcionamiento.

Tabla 2.

Tabla comparativa de productos para reconocimiento y rescate

Nombre	ANYmal	TRACKREITAR	ATLAS	PIAP IBIS
Tipo de desplazamiento	Cuadrúpedo	Rueda oruga	Bípedo	Rueda simple
Tamaño	Mediano	Mediano	Grande	Grande
Recolección de información exterior	Escáner láser, y cámara óptica y térmica	Longitudes de onda IR	-	4 cámaras
Método de carga	Brazo robótico pinza	Camilla - Pinza	2 Brazos robótico	Brazo robótico pinza
Capacidad de carga	Baja	Alta (100 kg)	Alta	Media (50 kg)
Velocidad	-	10 km/h	9 km/h	10 km/h
Peso	-	100 kg	89 kg	320 kg
Autonomía	Más de 2 horas	6-7 horas	Alta - personalizable	4 horas - personalizable

Nota. Elaboración propia

Se puede concluir que hay una gran diversidad en el tipo de desplazamiento de los productos. Además, para la visión se aprecia que se usan las cámaras térmicas para la detección de personas. Por último, destacar que se usan similares modos de transporte de las víctimas, todas empleando el brazo robótico ya sea emulando la mano humana o en su defecto en forma de pinza.

-Productos para lucha contra incendios

A continuación, se expondrán los productos en el mercado centrados en la labor de lucha contra incendios.

Colossus

Robot fabricado por la empresa Shark Robotics y es empleado actualmente en la Brigada de Bomberos de París donde su utilidad ha quedado demostrada durante el incendio de Notre Dame en 2019 como se observa en la Ilustración 19. Ha sido diseñado para ser teleoperado en varias operaciones de riesgo y con equipamiento intercambiable según las circunstancias. Destaca por estar compuesto de una batería ultra resistente para una autonomía de 12 horas, tener una capacidad de carga de 500 kg, resistente hasta una temperatura de 900°C y un desplazamiento de 5 km/h (Shark Robotics, 2020).



Ilustración 19: Robot Colossus

Tomado de Shark Robotics (2020) *Colossus: Multi-purpose fire fighting robot*

MVF-5

Vehículo móvil pesado desarrollado por la empresa DOK-ING para la lucha contra incendios. Es de un gran tamaño como se ve en la Ilustración 20 y pesando 16 toneladas. Su control es de manera remota y su diseño contempla para el movimiento de grandes cargas como pueden ser vehículos gracias a su pinza incorporada que permite una carga de hasta 2 toneladas y una fuerza de empuje

de hasta 10 toneladas. Además de un brazo de 3 articulaciones para la extinción remota de incendios junto a un sistema de rociadores para el auto enfriamiento y un sistema de video de 9 cámaras. Actualmente es utilizado por más de 40 países en el mundo (DOK-ING, 2020).



Ilustración 20: MVF-5

Tomado de DOK-ING (2020) *Emergency Responses Robotic System: MVF-5*

TRACKREITAR - Lucha contra incendios

Entre las versiones de la serie TRACKREITAR también existe una variante para la lucha contra incendios como se ve en la Ilustración 21. Esta incorpora un cañón de agua con una capacidad de 4800 litros/min y puede desplazarse a 10 km/h de forma autónoma gracias a su inteligencia artificial o en su defecto utilizar el panel de control. Puede soportar temperaturas de hasta 65°C por lo que se recomienda su uso para la extinción rápida de estos y en caso uno quede inoperativo si se trabaja en conjunto con otros, la red se adaptará para continuar con la labor de la forma más eficaz (Leotronics, 2022).



Ilustración 21: Robot TRACKREITAR FIREFIGHTING
Tomado de Leotronics (2022) *TRACKREITAR FIREFIGHTING*

LUF 300 HF

Fabricado por la empresa austriaca LUF con el objetivo de maximizar la eficiencia y flexibilidad durante grandes incendios como se muestra en la Ilustración 22. Es un vehículo pesado que tiene una tobera monitor ajustable de forma flexible con una bomba de presión instalada que permite suministrar al cañón 8000 litros/min a una presión de 6 bar. Por otro lado, sus ruedas tipo oruga le permiten un desplazamiento preciso con giros estables y evasión de obstáculos a una velocidad de 5 km/h (LUF, 2021).



Ilustración 22: Robot LUF 300 HF
Tomado de LUF (2021) LUF 300 HF - EINSATZGEBIET

Cuadro comparativo

A continuación, se comparan los productos para la lucha contra incendios en distintos aspectos de su funcionamiento.

Tabla 3.

Tabla comparativa de productos para la lucha contra incendios

Nombre	Colossus	MVF-5	TRACKREITAR	LUF 300 HF
Tipo de ruedas	Oruga	Oruga	Oruga	Oruga
Tamaño	Mediano	Grande	Mediano	Grande
Recolección de información exterior	Cámara térmica - Zoom x30	Sistema múltiple de cámaras	Longitudes de onda IR	-
Resistencia térmica	-	900°C	65°C	-
Potencia del cañón de agua	1000-3000 litros/min	-	4800 litros/min	8000 litros/min
Velocidad		11 km/h	10 km/h	5 km/h
Peso	500 kg	16000 kg	145 kg	3900 kg
Autonomía	12 horas	25 litros de combustible/ hora	6-7 horas	-

Nota. Elaboración propia

Se puede concluir que el uso de las ruedas oruga es común debido a la necesidad de moverse por un terreno con obstáculos. Los robots de control de incendio deben tener una gran resistencia térmica para operar con normalidad. Además, la cámara térmica es indispensable para la detección dentro de un incendio gracias a la captación de la radiación infrarroja (IR). Finalmente se nota la importancia de la autonomía en este tipo de robots para poder funcionar durante el siniestro.

1.5.2. Investigaciones

En este apartado se analizan distintas investigaciones clasificándolas y comparándolas en base a la labor que desempeña cada uno.

-Investigaciones para reconocimiento y rescate

A continuación, se expondrán las investigaciones que se han hecho enfocándose en el reconocimiento y rescate de personas.

Battlefield Extraction-Assist Robot (BEAR)

Proyecto desarrollado por Vecna Technologies y financiado por Telemedicine and Advanced Technology Research Center (TATRC) del Gobierno de Estados Unidos, busca reducir la exposición de los soldados a un ataque enemigo mientras este se encuentra rescatando a un compañero herido como se ilustra en la Ilustración 23. Este robot presenta una cámara de luz visible en un ojo y en el otro una cámara térmica, un cuello articulado que permite una vista panorámica del entorno, un torso hidráulico que le permite levantar hasta 500 libras (227 kg), dos brazos con seis grados de libertad con una superficie plana para la comodidad del traslado de víctimas, y un sistema híbrido oruga/patas que permite un movimiento versátil (Soldier Magazine, 2008).



Ilustración 23: Robot BEAR

Tomado de Vecna Technologies (2009) *Vecna BEAR Robot episode 2*

CENTAURO

Es un proyecto en conjunto de varias instituciones encabezado por la Universidad de Bonn en Alemania cuyo fin es la búsqueda y rescate de personas. Se busca el desarrollo de un robot teleoperado, pero de manera simbiótica a través de un traje de telepresencia, es decir, el robot replicará los movimientos que haga el operador humano. Puede subir escaleras, abrir puertas e incluso manipular herramientas. Consta de 4 patas para el desplazamiento como se aprecia en la Ilustración 24, está compuesto de aleaciones de aluminio y titanio, pesando 93 kg, y su cuerpo articulado le permite realizar movimientos con una gran precisión (CENTAURO, 2015).



Ilustración 24: Robot CENTAURO

Tomado de CENTAURO (2015) *CENTAURO – Robust Mobility and Dexterous Manipulation in Disaster Response by Fullbody Telepresence*

-Investigaciones para lucha contra incendios

A continuación, se expondrán las investigaciones que se han hecho enfocándose en la lucha contra incendios.

Shipboard Autonomous Firefighting Robot (SAFFIR)

Proyecto desarrollado por La Marina de los Estados Unidos y la Oficina de Investigación Naval (ONR) que tiene como objetivo el apagar incendios en buques estadounidenses. Tiene una estatura de 1.80 m y un peso de 65kg con una forma humanoide como se observa en la Ilustración 25, cuenta con sensores de visión estereoscópica, láser y detectores de luz infrarroja que permite la

visión a través del humo. Su comportamiento emula al del humano ya que puede caminar, abrir puertas y manejar una manguera de incendios. Este robot tiene como proyección el volverse autónomo y el volverse a prueba al contacto directo con el fuego (Revista Ejército, 2015).



Ilustración 25: Robot SAFFIR

Tomado de Revista Ejército (2015) *Sanidad militar: Un paseo por la historia*. Edición N°889, 117.

Patentes

A continuación, se explicarán brevemente patentes relacionadas a los temas de interés.

Sistema de extinción de incendios de doble extinción que utiliza emisores de alta velocidad y baja presión

Patente: WO2008057331A3

Consiste en un sistema que implementa el uso de un agente extintor líquido y otro gaseoso. A través del emisor formar una corriente de líquido-gas para combatir al fuego. Se propone un diseño de válvulas para la formación de dicha corriente como se ve en la Ilustración 26 (Relly et al., 2008).

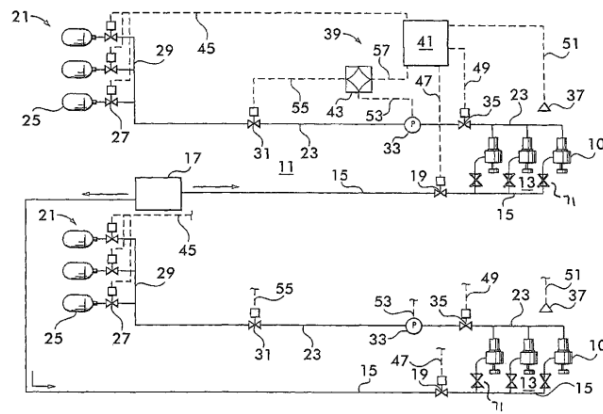


Ilustración 26: Sistema de válvulas para doble agente extintor
 Tomado de Relly et al. (2008). *Dual extinguishment fire suppression system using high velocity low pressure emitters.* (Patente WO2008057331A3).

Robot de búsqueda y rescate

Patente: CN103737573A

Robot de búsqueda y rescate que presenta un manipulador de seis grados de libertad expuesto en la zona frontal del vehículo como se ve en la Ilustración 27. Se controla mediante un terminal de control de PC. Cuenta con 2 cámaras para la mediación de la profundidad y poder realizar un correcto agarre de la persona (Zhisheng et al., 2014).

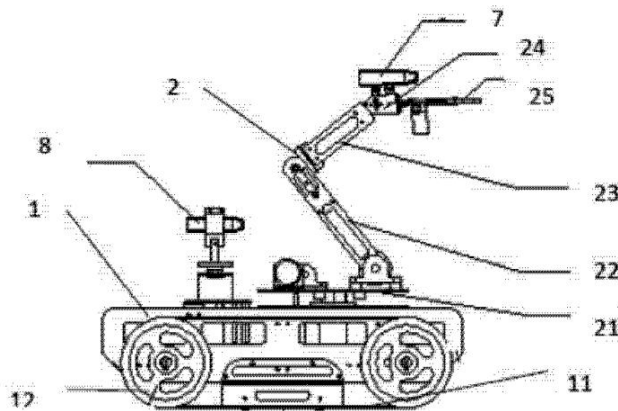


Ilustración 27: Search and rescue robot
 Tomado de Zhisheng et al. (2014). *Search and rescue robot.* (Patente CN103737573A)..

Camión de extinción de incendios tipo oruga todo terreno

Patente: CN204563392U

Camión de incendios multifuncional de tipo oruga como se muestra en la Ilustración 28 que es aplicable a altas temperaturas y desempeñar distintas tareas como ayudar al ingreso de una edificación en llamas o ser un bombero de línea siendo posible debido a su diseño que presenta un monitor de agua en su parte trasera (Liang C., 2015).

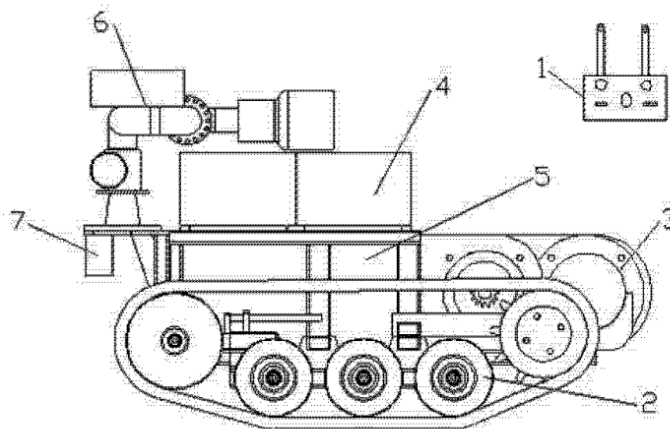


Ilustración 28: Full terrain crawler-type multifunctional fire-fighting truck
Tomado de Liang C. (2015). Full terrain crawler-type multifunctional fire-fighting truck. (Patente CN204563392U).

1.5.3. Requisitos regulatorios

En función al avance de la tecnología, las leyes y normas se adaptan a estos cambios por lo que se desarrollan nuevas regulaciones que se deberán tener en cuenta al momento del desarrollo de nuevas invenciones. Entre las normas destacadas se pueden mencionar las siguientes:

- Restricción de sustancias peligrosas (RoHS): Es una normativa que se estableció en la Unión Europea (2011) con el fin de controlar la cantidad de ciertas sustancias peligrosas. Para el año 2022, esta comprende el listado de 10 sustancias como el plomo, cadmio, entre otras.
- Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (WEEE): Norma formada a partir de la gran cantidad de residuos generados por estos aparatos se planteó restricciones en la fabricación y usos de estos aparatos a favor del medioambiente y por la escasez actual de materia prima, proliferando la reutilización y reciclaje de estos componentes (Unión Europea, 2012).

- ISO 50001: Normativa voluntaria que establece requisitos para gestionar y mejorar el consumo energético con el fin de reducir el consumo energético como forma de hacerle frente al cambio climático propuesta por la Oficina de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (Organización Internacional de Normalización, 2011).

Se puede concluir que se necesita desarrollar un sistema mecatrónico que no emplee alguna de las sustancias peligrosas listadas anteriormente. Además, usar componentes eléctricos y electrónicos comerciales para cuando alguno necesite ser reemplazado se pueda reutilizar otro proliferando la norma WEEE. Finalmente, diseñar un sistema que gestione eficientemente su consumo energético.

1.5.4. Idea del producto

Luego de la investigación realizada y el análisis respectivo se propone un sistema mecatrónico que satisfaga las siguientes condiciones:

- Una adecuada movilidad que permita el desplazarse a 10 km/h en un terreno irregular con presencia de escombros, evitar obstáculos, subir escaleras, entre otros.
- Un tiempo de autonomía suficiente que permita el desarrollo de sus funciones entre 6 a 7 horas.
- Capacidad de observar a través del humo y gases dentro de la edificación.
- Realizar el rescate de víctimas de forma segura.
- Un correcto funcionamiento al ser expuesto a altas temperaturas, superiores a los 300°C.
- Capacidad de extinguir fuego en casos de emergencia.

CAPÍTULO 2: DISEÑO CONCEPTUAL

En el presente capítulo se desarrollará la idea del producto en base a los requisitos del proyecto, el árbol de funciones y medios, y determinando su estructura y comportamiento general.

2.1. Requisitos del Proyecto

A continuación, se determinará los requisitos del proyecto en base al análisis realizado con anterioridad complementándolo con observaciones realizadas durante el Curso de Búsqueda y Rescate en Estructuras Incendiándose (BREI).

2.1.1. Requisitos y requerimiento de usuario

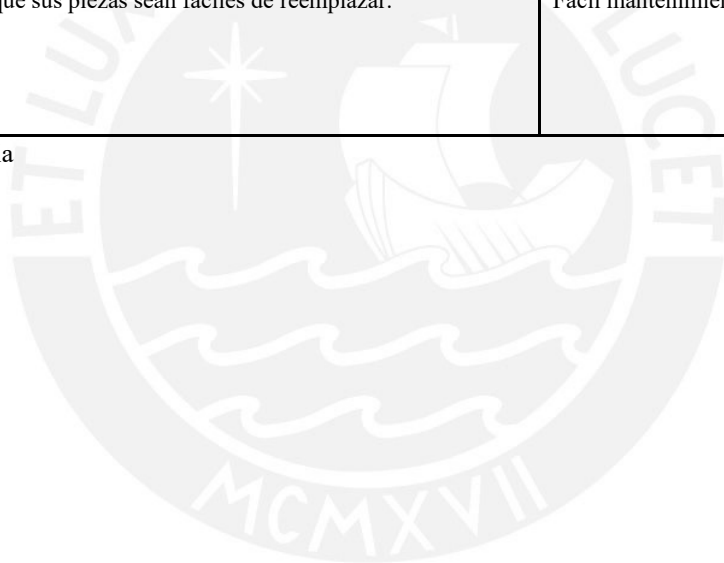
En la Tabla 4 se resumen los requerimientos y requisitos basándose en las necesidades del usuario expuestas en anterioridad.

Tabla 4.
Requisitos de usuario

CATEGORÍA	REQUERIMIENTOS DE USUARIO	REQUISITO DE USUARIO
Funcionalidad	Que el sistema pueda ver a través del humo a los bomberos, víctimas y el entorno.	Visualización a través del humo
	Que el operador pueda comunicarse con el sistema de manera estable durante toda la operación.	Comunicación remota estable
	Que el dispositivo sea capaz de realizar un traslado de las víctimas de forma segura.	Traslado de víctimas seguro
	Que pueda ser operado durante todo el tiempo que dure el incendio.	Uso prolongado
	Que en caso sea necesario el sistema pueda apagar fuegos ocultos dentro de la edificación	Extinción de fuegos ocultos
Ergonomía	Que el sistema no debe generar ruido que pueda ensordecir temporal o indefinidamente a los bomberos.	Bajo ruido
Seguridad	Que sea capaz de desplazarse en un terreno irregular, subir escaleras, evitar deslizamientos y colisiones con personas.	Evasión de obstáculos
		Movimiento sin derrapes
Transportabilidad	Que sea fácil de transportar hasta la localización del incendio	Dimensiones compactas

		Peso ligero
Robustez	Que el dispositivo sea capaz de seguir funcionando tras aguantar impactos debido a escombros	Ser robusto
		Ser resistente
Legalidad	Que no esté compuesto por algún material que pueda ser nocivo para la salud o al medio ambiente	Material no tóxico
Material	Que no sea afectado por el polvo del ambiente ni por el agua de las mangueras	Resistente al agua y polvo
	Que se capaz de operar expuesto a altas temperaturas	Resistente a altas temperaturas
Energía	Que gestione de manera eficiente su consumo energético	Alta eficiencia energética
Tiempo	Que sea capaz de realizar sus funciones de manera veloz	Rápida operación
Mantenimiento	Que al dispositivo se le pueda dar un fácil mantenimiento y que sus piezas sean fáciles de reemplazar.	Fácil mantenimiento

Nota: Elaboración propia



2.1.2. Matriz de requerimientos

Se emplea la matriz de requerimientos para obtener en base a los requisitos del usuario, los requisitos de diseño y su importancia para el proyecto. Asimismo, clasificándolos en aspecto técnico o económico, y asignando sus respectivos valores.

Tabla 5.
Requisitos de proyecto

Lista de requerimientos						
Requisitos de diseño	Demanda (D) o Deseo (W)	Peso absoluto (WA)	Peso relativo (WR)	Clasificación Técnica / Económica	Valores	Método de Verificación
Sistema de visualización del entorno	D	22	3	T	Alcance de visión de 10 metros	Datasheet del equipo
Recepción de sonidos del entorno	D	12	1	T	Captar sonidos de mínimo 3 metros alrededor	Inspección sonora
Emisión de audio	D	12	1	T	Emitir sonido a 3 metros de distancia	Inspección sonora
Trasmisión de información estable	D	20	2	T	Bluetooth, Wifi y datos móviles.	Datasheet del equipo
Sistema de traslado de cargas	D	19	2	T	Mínimo cargar 120 kg	Ficha técnica
Larga autonomía	D	12	1	T	3 horas	Datasheet del equipo
Almacenamiento de agente extintor	W	14	2	T	Mínimo poder almacenar 20 kg	Inspección visual
Sistema de extinción	W	14	2	T	Distancia efectiva de 10 metros	Inspección visual
Limitar niveles de ruido	W	10	1	T	Menor a 40 dB	Inspección sonora
Sistema anticolisión	W	15	2	T	Detección de obstáculos hasta 20 cm	Datasheet del equipo
Tracción óptima	D	22	3	T	Velocidad máxima de 3 km/h	Datasheet del equipo
Diseño compacto	W	16	2	T	Dimensiones máximas de 0.5m x 0.5m x 0.5m	Medición directa
Materiales ligeros	W	15	2	T	Máximo peso total de 400 kg	Medición directa
Materiales robustos	D	31	4	T	Emplear materiales de alta tenacidad	Datasheet del material
Componentes resistentes a polvo y agua	D	31	4	T	Mínimo grado de protección IP55	Datasheet de los componentes
Componentes resistentes a altas temperaturas	D	35	4	T	Operación óptima a temperaturas hasta a 100°C	Datasheet de los componentes
Consumo eficiente de la energía	W	16	2	T/E	Nivel de consumo C o superior	Ficha técnica
Uso de componentes comerciales	W	16	2	T/E	Mínimo usar 60% de componentes accesibles a nivel nacional	Selección de componentes

Nota: Elaboración propia

2.2. Síntesis de estructura y comportamiento general

A continuación, se desarrolló en base a la metodología los siguientes esquemas que permiten diseñar y comprender de manera detallada todas las funciones y conexiones del sistema de manera preliminar. Para más información ir al Anexo B.

2.2.1. Requerimientos de software

Se define los parámetros para el movimiento del robot para el correcto funcionamiento en el área. Primero se definen los parámetros para el movimiento de la columna giratoria y la visión a través de la cámara térmica como se ve en la Tabla 6.

Tabla 6.

Parámetros de operación para el sistema de visión

Modo de visión	Velocidad de giro	Rango de visión
Estándar	36°/s	10 m

Nota: Elaboración propia

Luego tenemos los parámetros sobre el tipo de advertencia que se dará al momento de la detección de obstáculos.

Tabla 7.

Parámetros de operación para detección de obstáculos

Estado	Distancia	Color Led
Lejos	Mayor a 0.5m	Verde
Intermedio	Entre 0.3m y 0.5m	Amarillo
Cercano	Menor a 0.3m	Rojo

Nota: Elaboración propia

Finalmente se definen los parámetros para conocer el estado del robot debido al funcionamiento interno por parte de sus componentes y por el tiempo restante de su autonomía.

Tabla 8.

Parámetros de operación para revisión de temperatura interna en los componentes

Estado	Temperatura	Color
Normal	Menor a 60°C	Verde
Peligro	Mayor a 60°C	Amarillo

Nota: Elaboración propia

Tabla 9.

Parámetros de operación para estado de la batería

Nivel de carga	Porcentaje restante	Color
Alta	Mayor al 40%	Verde
Media	Entre 20% y 40%	Amarillo
Baja	Menor al 20%	Rojo

Nota: Elaboración propia

CAPÍTULO 3: CÁLCULOS Y SIMULACIONES

En el presente capítulo se desarrollarán los cálculos y simulaciones del diseño CAD del robot.

3.1. Análisis Estructural y Dimensional

Se plantea un diseño modular dividido principalmente en tres módulos las cuales serán, la armadura cuyo objetivo será ralentizar el flujo de calor, evitar la entrada de polvo y agua proveniente del ambiente, además de almacenar el agua; la silla de rescate en donde se asegurará a las víctimas y la parte superior del almacén de agua; y la estructura interna la cual contendrá los componentes internos del sistema y soportará las cargas.

3.1.1. Armadura

En base a estimaciones en el Capítulo 2. Diseño Conceptual se estableció que el tamaño de la base para maniobrar sin inconvenientes debe de ser aproximadamente de 0.5m x 0.5m.

La armadura se subdivide en dos partes, la primera protegiendo los laterales y la parte inferior del robot como se ve en la Ilustración 29, mientras que la otra protege la parte superior, además de tener el almacén de agua para una capacidad de 20 litros, Ilustración 30.

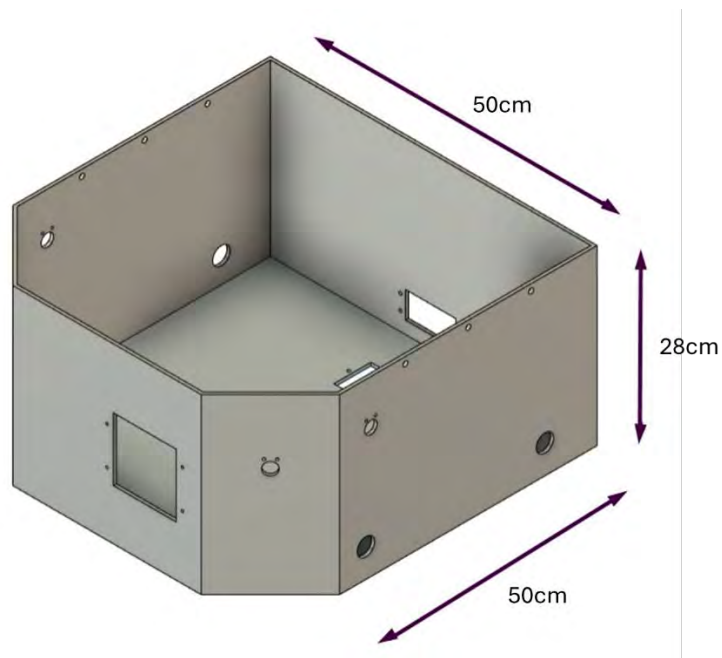


Ilustración 29: Armadura parte inferior
Nota: Elaboración propia

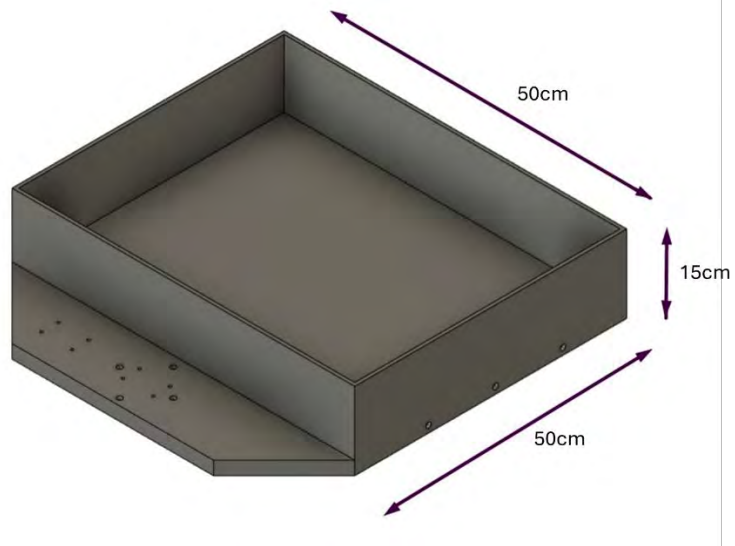


Ilustración 30: Armadura parte superior
Nota: Elaboración propia

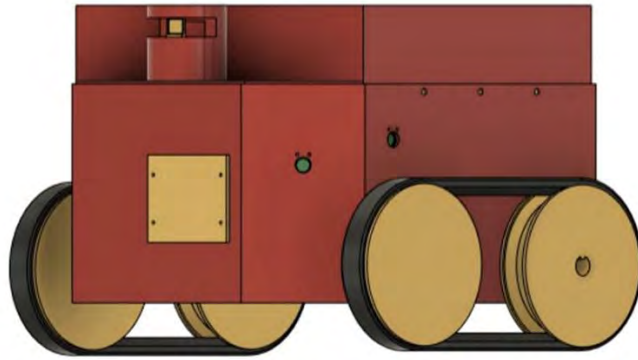


Ilustración 31: Unión Armadura parte Inferior y Superior
Nota: Elaboración propia

Las uniones entre módulos son por medio de pernería de tamaño M8 de acero aleado que cumplan con la normativa ASTM A193 B7 o equivalente, asegurando la resistencia de la pernería hasta una presión de 862 MPa y temperaturas de 450°C

Cálculos de Flujo de Calor y Tiempo de Operación

Para la resolución de los cálculos se presentarán tres escenarios en el que se evaluará la cantidad de tiempo en la que el robot es capaz de mantenerse en operación. La primera será antes de que se llegue a una temperatura de 55°C y las otras dos serán en situaciones extremas donde se llevará al límite los componentes hasta una temperatura de 80°C.

Para optimizar el proceso del cálculo se mantendrá constante en cada escenario el flujo de calor calculado inicialmente, es decir, el escenario donde tiene su mayor valor. Para ello se propondrá los siguientes escenarios: Primero se pasará del estado inicial con temperatura ambiente de 25°C a un ambiente de 60°C, temperatura crítica porque es cuando las personas sin ninguna protección térmica pueden sobrevivir por 10 minutos; segundo un escenario donde se pase de 40°C a 100°C debido a una exposición al fuego; y por último un escenario extremo donde se pase de 40°C a

400°C, temperatura máxima que llega un incendio que llega a comprometer la estructura y viabilidad del edificio. Se sintetizan los casos en la Tabla 10.

Tabla 10.

Cálculo de la inversa del factor de conductividad térmica conjunta

	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura interna del sistema (°C)	Temperatura interna al final (°C)
Caso 1	60	25	55
Caso 2	100	40	55
Caso 3	400	40	80

Nota: Elaboración propia

El material empleado seleccionado anteriormente es el Inconel 601 el cual presenta las siguientes características mecánicas como se ve en la Ilustración 32.

Propiedades mecánicas y físicas	21°C	538°C	649°C	760°C	871°C	982°C	1093°C
Resistencia máxima a la tracción /kMPa	689.5	620.5	413.7	234.4	124.1	-	-
0,2 % límite elástico/MPa	372.3	331	282.7	179.2	103.4	-	-
Fluencia mínima 0,0001 % por hora, MPa	-	-	-	28.3	13.8	5.2	3
10.000 h Resistencia a la rotura, MPa	-	-	-	42.7	17.9	8.3	4.3
Coefficiente de Expansión Térmica $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$		15.3	16	16.6	17.1	17.6	18.3
Conductividad Térmica /kcal/(hr.m.°C)	9.7	17.3	18.9	20.4	22	23.5	25.1
Módulo de elasticidad/ 10^5 MPa	2.06	1.75	1.66	1.55	1.42	1.27	1.12

Ilustración 32: Cuadro de Propiedades del Inconel 601
Tomado de NeoNickel (2014) Inconel 601

Empleando la Ley de Fourier descrita a continuación para obtener el flujo de calor

$$\Phi = dQ/dt = \Delta T/R$$

Donde:

Φ : Flujo de calor (W)

ΔT : Gradiente de temperatura (°C)

R: Inversa del factor de conductividad térmica conjunta (°C/W)

Para el cálculo de R se debe de tener en cuenta factores como la convección del aire a determinada temperatura y la conductividad térmica de cada material que se encuentre en el camino del flujo de calor. Por ende el factor R se obtiene de la siguiente forma:

$$R = \frac{1}{hA} + \frac{d1}{K1 A1} + \frac{d2}{K2 A2} + \dots + \frac{dn}{Kn An}$$

Donde:

R: Inversa del factor de conductividad térmica conjunta (°C/W)

h: Coeficiente de convección del fluido exterior (W/m²°C)

K: Coeficiente de conductividad térmica (W/m°C)

A: Área de contacto (m²)

d: Espesor (m)

Se considera un coeficiente de convección de 25W/m²°C utilizado para aire supercalentado para el cálculo de R.

Para el cálculo del tiempo, también se emplea el cálculo del gradiente de calor empleado para cambiar la temperatura del volumen de aire dentro del robot:

$$\Delta Q = \delta V C \Delta T$$

Donde:

ΔQ : Gradiente de calor (J)

δ : Densidad del aire (kg/m³)

V : Volumen del aire (m³)

C : Calor específico del aire (J/kg K)

ΔT : Gradiente de temperatura (K)

Se deriva en función del tiempo para obtener el flujo de calor en función de la variación de la temperatura en función del tiempo. Consideraremos por efecto de la factibilidad del cálculo la densidad, volumen y calor específicos constantes en el tiempo.

$$dQ/dt = \delta V C dT/dt$$

Los valores para el calor específico del aire y su densidad los cuales varían en función de la temperatura tal por lo que se usarán como referencia los valores en la Ilustración 33.

TABLA A-9I

Propiedades del aire a 1 atm de presión

Temp. T, °F	Densidad ρ , lbm/ft ³	Calor específico C_p Btu/lbm · R	Conductividad térmica k, Btu/h · ft · R	Difusividad térmica α , ft ² /s	Viscosidad dinámica μ , lbm/ft · s	Viscosidad cinemática ν , ft ² /s	Número de Prandtl Pr
-300	0.24844	0.5072	0.00508	1.119×10^{-5}	4.039×10^{-6}	1.625×10^{-5}	1.4501
-200	0.15276	0.2247	0.00778	6.294×10^{-5}	6.772×10^{-6}	4.433×10^{-5}	0.7042
-100	0.11029	0.2360	0.01037	1.106×10^{-4}	9.042×10^{-6}	8.197×10^{-5}	0.7404
-50	0.09683	0.2389	0.01164	1.397×10^{-4}	1.006×10^{-5}	1.039×10^{-4}	0.7439
0	0.08630	0.2401	0.01288	1.726×10^{-4}	1.102×10^{-5}	1.278×10^{-4}	0.7403
10	0.08446	0.2402	0.01312	1.797×10^{-4}	1.121×10^{-5}	1.328×10^{-4}	0.7391
20	0.08270	0.2403	0.01336	1.868×10^{-4}	1.140×10^{-5}	1.379×10^{-4}	0.7378
30	0.08101	0.2403	0.01361	1.942×10^{-4}	1.158×10^{-5}	1.430×10^{-4}	0.7365
40	0.07939	0.2404	0.01385	2.016×10^{-4}	1.176×10^{-5}	1.482×10^{-4}	0.7350
50	0.07783	0.2404	0.01409	2.092×10^{-4}	1.194×10^{-5}	1.535×10^{-4}	0.7336
60	0.07633	0.2404	0.01433	2.169×10^{-4}	1.212×10^{-5}	1.588×10^{-4}	0.7321
70	0.07489	0.2404	0.01457	2.248×10^{-4}	1.230×10^{-5}	1.643×10^{-4}	0.7306
80	0.07350	0.2404	0.01481	2.328×10^{-4}	1.247×10^{-5}	1.697×10^{-4}	0.7290
90	0.07217	0.2404	0.01505	2.409×10^{-4}	1.265×10^{-5}	1.753×10^{-4}	0.7275
100	0.07088	0.2405	0.01529	2.491×10^{-4}	1.281×10^{-5}	1.809×10^{-4}	0.7260
110	0.06963	0.2405	0.01552	2.575×10^{-4}	1.299×10^{-5}	1.866×10^{-4}	0.7245
120	0.06843	0.2405	0.01576	2.660×10^{-4}	1.316×10^{-5}	1.923×10^{-4}	0.7230
130	0.06727	0.2405	0.01599	2.746×10^{-4}	1.332×10^{-5}	1.981×10^{-4}	0.7216
140	0.06615	0.2406	0.01623	2.833×10^{-4}	1.349×10^{-5}	2.040×10^{-4}	0.7202
150	0.06507	0.2406	0.01646	2.921×10^{-4}	1.365×10^{-5}	2.099×10^{-4}	0.7188
160	0.06402	0.2406	0.01669	3.010×10^{-4}	1.382×10^{-5}	2.159×10^{-4}	0.7174
170	0.06300	0.2407	0.01692	3.100×10^{-4}	1.398×10^{-5}	2.220×10^{-4}	0.7161
180	0.06201	0.2408	0.01715	3.191×10^{-4}	1.414×10^{-5}	2.281×10^{-4}	0.7148
190	0.06106	0.2408	0.01738	3.284×10^{-4}	1.430×10^{-5}	2.343×10^{-4}	0.7136
200	0.06013	0.2409	0.01761	3.377×10^{-4}	1.446×10^{-5}	2.406×10^{-4}	0.7124
250	0.05590	0.2415	0.01874	3.857×10^{-4}	1.524×10^{-5}	2.727×10^{-4}	0.7071
300	0.05222	0.2423	0.01985	4.358×10^{-4}	1.599×10^{-5}	3.063×10^{-4}	0.7028
350	0.04899	0.2433	0.02094	4.879×10^{-4}	1.672×10^{-5}	3.413×10^{-4}	0.6995
400	0.04614	0.2445	0.02200	5.419×10^{-4}	1.743×10^{-5}	3.777×10^{-4}	0.6971

Ilustración 33: Cuadro de Propiedades del aire

Tomado de ÇENGEL, Yunus A. y John M. CIMBALA. (2006) "Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones", 1ª edición, McGraw-Hill, 2006. Tabla A-9.

En función de ello se pasa a igualar y despejar la ecuación

$$(T_{\infty} - T) / R = \delta V C dT / dt$$

$$dt = \frac{R \delta V C}{(T_{\infty} - T)} dT$$

$$\int_0^t dt = \int_{T_i}^{T_f} \frac{R \delta V C}{(T_{\infty} - T)} dT$$

Finalmente, para el cálculo del tiempo, se usará la siguiente fórmula considerando para factibilidad del cálculo que la densidad, volumen y calor específicos son constantes en función de la temperatura:

$$t = R \delta V C [\ln(T_{\infty} - T)] \Big|_{T_f}^{T_i}$$

Donde:

t : Tiempo que tardará el fluido interior en pasar de la temperatura T_i a T_f (s)

R : Inversa del factor de conductividad térmica conjunta ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)

δ : Densidad del fluido (kg/m^3)

V : Volumen del fluido (m^3)

C : Calor específico del aire ($\text{J}/\text{kg } ^{\circ}\text{C}$)

T_{∞} : Temperatura del fluido exterior ($^{\circ}\text{C}$)

T_i : Temperatura inicial del fluido interior ($^{\circ}\text{C}$)

T_f : Temperatura final del fluido interior ($^{\circ}\text{C}$)

Se obtienen los siguientes valores de R en la Tabla 11.

Tabla 11.

Cálculo de la inversa del factor de conductividad térmica conjunta

h	A	$K1$	$d1$	R1
25	0.635	20.12	0.005	0.0634

Nota: Elaboración propia

Debido a que el valor de R es bajo se agrega una capa extra de material pirorretardante para aumentar la exposición a las altas temperaturas, debajo de la capa de Inconel 601, se calcula en la

Tabla 12.

Tabla 12.

Cálculo de la inversa del factor de conductividad térmica conjunta

R1	A	$K2$	$d2$	R2
0.0634	0.635	0.01	0.01	1.638

Nota: Elaboración propia

Se calcula el valor conjunto de las constantes en la Tabla 13.

Tabla 13.

Cálculo de la inversa del factor de conductividad térmica conjunta

R2	δ	V	C	Constante
1.638	1.059	0.06	1007	104.81

Nota: Elaboración propia

Finalmente se calcula el tiempo en el que se llega a la temperatura esperada en cada uno de los casos en la Tabla 14.

Tabla 14.

Resolución de los casos

	Constante	T_{∞}	Ti	Tf	Tiempo
Caso 1	104.81	60	25	55	203.95
Caso 2	104.81	100	25	60	65.89
Caso 3	104.81	400	40	80	12.34

Nota: Elaboración propia

En base a los resultados se concluye que la temperatura interna del sistema pasará de 25°C a 55°C siendo expuesta a un ambiente de 60°C en 3.4 minutos. También que se pasa de una temperatura interna de 25°C a 60°C, temperatura en la cual los componentes podrían empezar a fallar en 1.10 minutos a exposición continua a una temperatura de 100°C. Finalmente en 12.34 segundos se pasa de 40°C a 80°C siendo expuesto a un ambiente de 400°C siendo un caso crítico que se debe evitar. Por lo que, es necesario un sistema de enfriamiento para poder operar con mayor seguridad.

Debido a que no es viable la implementación de un intercambiador de calor por el espacio restrictivo. Se propone el uso de células que empleen el efecto Peltier. Este fenómeno explica que si existe un diferencial de temperatura habrá un diferencial de potencial y viceversa, es decir, en el sistema, el lado a mayor temperatura se posiciona al exterior, mientras que el otro al interior para refrigerar. En la industria el uso de células Peltier se da principalmente para el enfriamiento en situaciones donde no sea posible implementar un intercambiador de calor, además de ser ecoamigable.

Se emplea el componente TEC1-12730 el cual resiste hasta los 83°C y tiene una forma de placa con dimensiones de 62mm x 62mm x 4.8mm como se puede observar en la Ilustración 34.



Ilustración 34: TEC1-12730
Tomado de DigiKey (2019) - TEC1-12730

La célula peltier se trabaja configurándose mediante la alimentación a cierto voltaje y corriente como se puede observar en la Ilustración 35. Se configura la celda a un voltaje de 3.3V y 6A para poder generar un gradiente de 20°C, obteniendo un flujo de calor de aproximadamente de 25W.

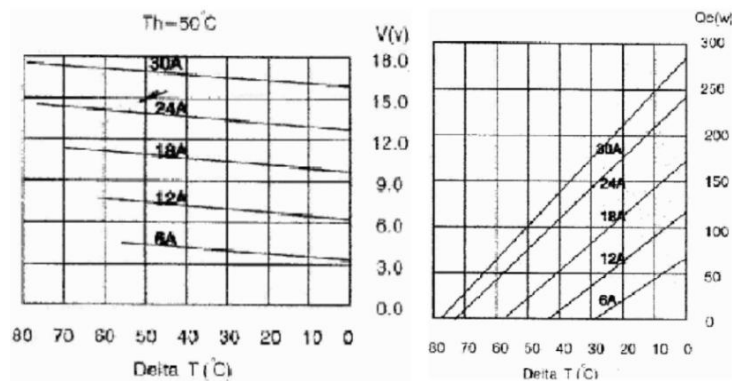


Ilustración 35: Curva de funcionamiento TEC1-12730
Tomado de DigiKey (2019) - TEC1-12730

Se vuelve a realizar el cálculo modificando la fórmula de la Ley de Fourier de la siguiente forma

$$\Phi = dQ/dt = \Delta T/R - \Phi_{cel}$$

Donde:

Φ : Flujo de calor (W)

ΔT : Gradiente de temperatura (°C)

R: Inversa del factor de conductividad térmica conjunta (°C/W)

Φ_{cel} : Flujo de calor de la célula Peltier (W)

Por lo que al final podemos resolver nuevamente y obtener la siguiente fórmula de tiempo de calentamiento en el interior del sistema.

$$t = R \delta V C [\ln(T_{\infty} - T - R \Phi_{cel})] \Big|_{T_f}^{T_i}$$

Donde:

t: Tiempo que tardará el fluido interior en pasar de la temperatura T_i a T_f (s)

R: Inversa del factor de conductividad térmica conjunta (°C/W)

δ : Densidad del fluido(kg/m³)

V: Volumen del fluido (m³)

C: Calor específico del aire (J/kg °C)

T_{∞} : Temperatura del fluido exterior (°C)

T_i : Temperatura inicial del fluido interior (°C)

T_f : Temperatura final del fluido interior (°C)

Φ_{cel} : Flujo de calor de la célula Peltier (W)

En la Tabla 15 se resuelve nuevamente los casos propuestos anteriormente para evaluar la viabilidad de la implementación de sistema de enfriamiento.

Tabla 15.

Resolución de los casos con enfriamiento

	Constante	T_{∞}	Ti	Tf	Tiempo
Caso 1	104.81	60	25	55	Indefinido
Caso 2	104.81	100	25	60	Indefinido
Caso 3	104.81	400	40	80	14.04

Nota: Elaboración propia

Se concluye que se puede operar de manera indefinida en los primeros casos, pero para el tercer caso se debe de evitar exponer innecesariamente a temperaturas extremas ya que el sistema de refrigeración no podrá soportarlo.

Simulaciones Térmicas

Se realiza la simulación como se ilustra en la Ilustración 36 para determinar la temperatura en la que se encontrará operando el sistema si es expuesto a una temperatura de 60°C, como lo será en su mayor parte del tiempo.

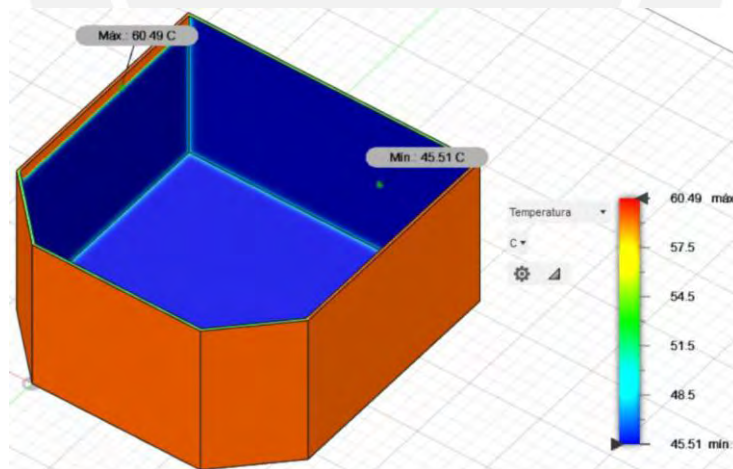


Ilustración 36: Simulación Térmica Caso 1
Nota: Elaboración propia

Se concluye que la temperatura en el interior del sistema es de 45.51°C manteniéndose por debajo del valor esperado de temperatura límite planteado para el uso prolongado de las funciones.

3.1.2. Silla de rescate

En la Ilustración 37, se muestra la silla de rescate en la cual se posicionará la víctima, la silla deberá ser equipada con cojines ignífugos, correas de seguridad y una manta hecha de fibra Nomex con el objetivo de tener un traslado más seguro.

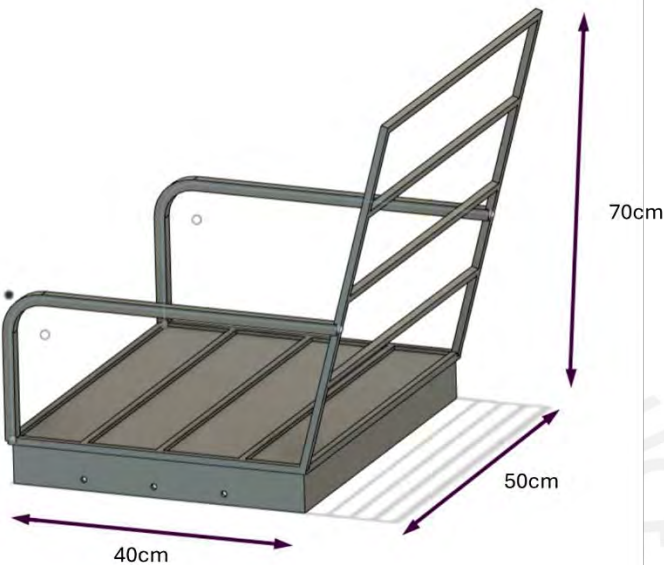


Ilustración 37: Silla de Rescate
Nota: Elaboración propia



Ilustración 38: Unión Módulos
Nota: Elaboración propia

Simulaciones Mecánicas

La silla de rescate sostendrá el peso de la persona la cual distribuiremos a lo largo de la silla por lo que se hará la simulación correspondiente suponiendo que se esté cargando una persona de 120 kg. Las simulaciones se observan en las Ilustración 39, Ilustración 40 e Ilustración 41.

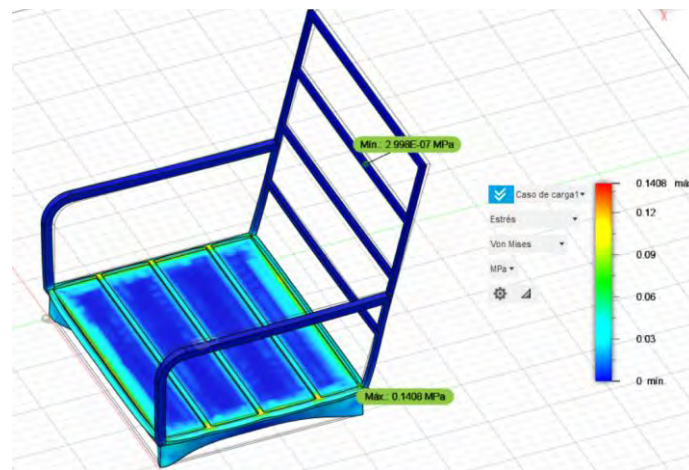


Ilustración 39: Esfuerzo de Von Mises en Silla de Rescate
Nota: Elaboración propia

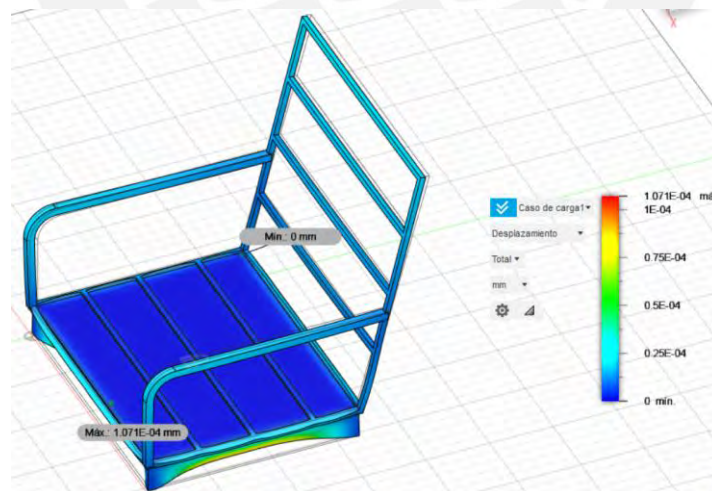


Ilustración 40: Desplazamientos en Silla de Rescate
Nota: Elaboración propia

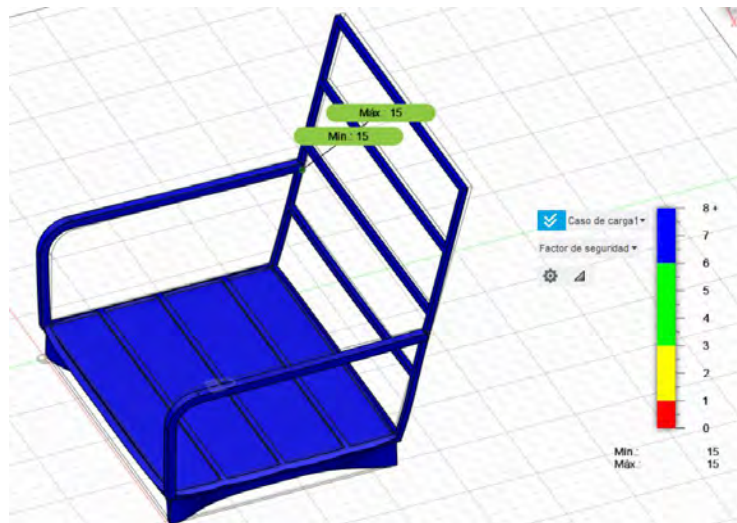


Ilustración 41: Factor de Seguridad en Silla de Rescate
Nota: Elaboración propia

En conclusión, el cuerpo si permite presenta un factor de seguridad de 15 que se encuentra por encima de lo recomendado. Además de que la deformación máxima presentada es casi nula.

3.1.3. Parte Interna

Se analizará el esqueleto de aluminio que se ilustra en la Ilustración 42 para comprobar si puede soportar el peso de una persona de 120 kg y el peso mismo de la parte superior de la armadura.

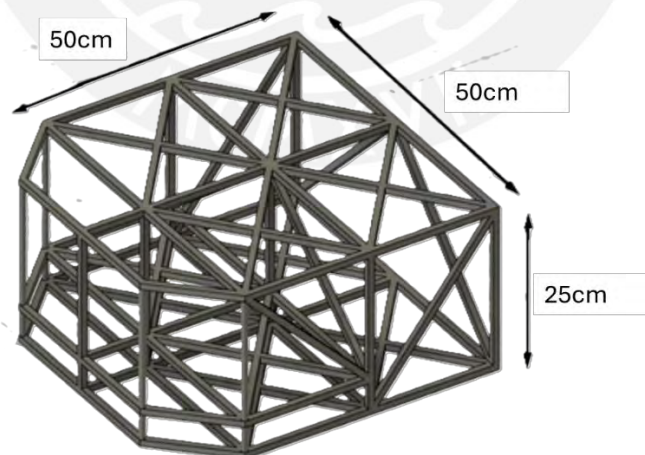


Ilustración 42: Esqueleto del sistema
Nota: Elaboración propia

Simulaciones Mecánicas

Se analizará la estructura interna sin los pisos ya que no soportan ninguna carga excepto el de los componentes mismos. Se estimará que el esqueleto soporte una carga de 180 kg sobre su superficie. Las simulaciones se muestran en las Ilustración 43, Ilustración 44 e Ilustración 45.

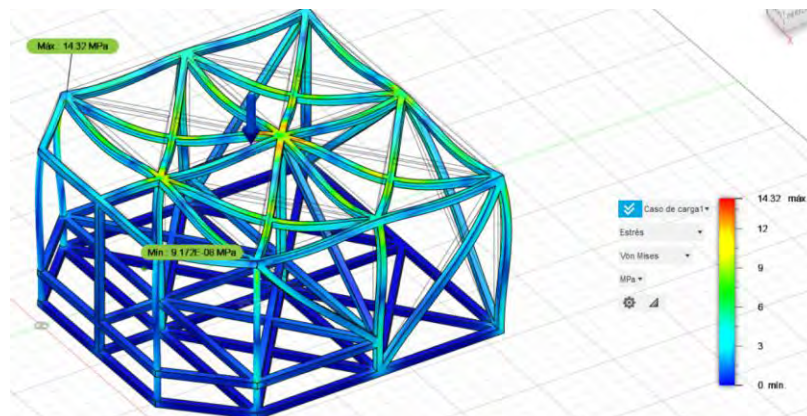


Ilustración 43: Esfuerzo de Von Mises en Esqueleto del sistema
Nota: Elaboración propia

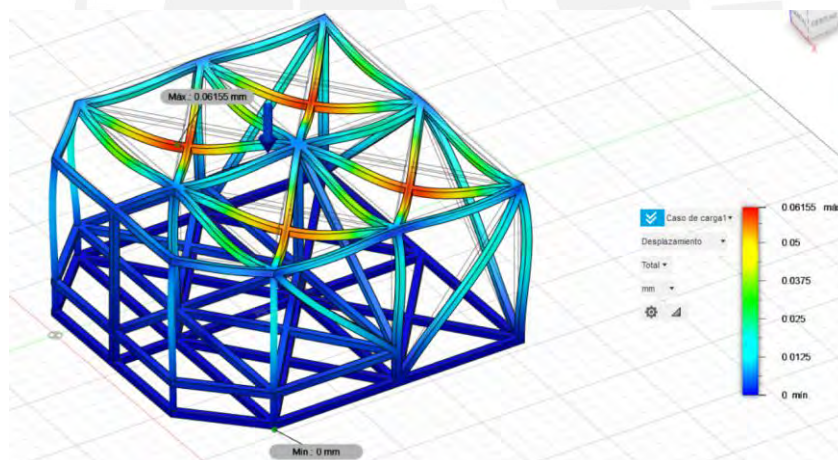


Ilustración 44: Desplazamientos en Esqueleto del sistema
Nota: Elaboración propia

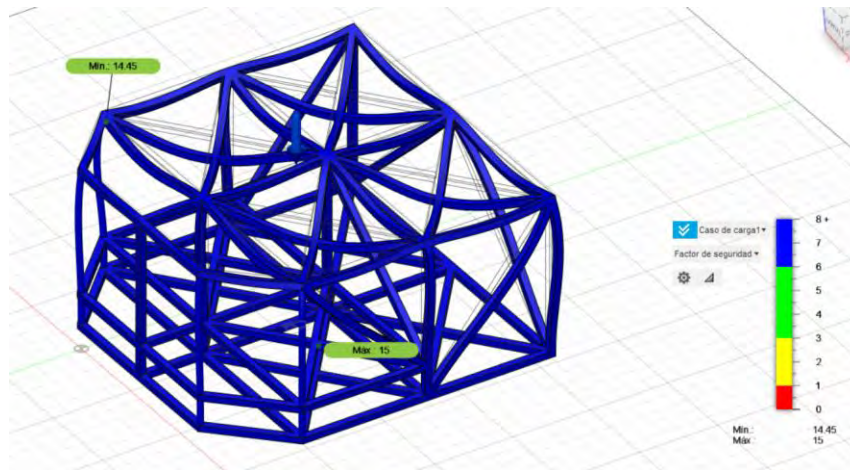


Ilustración 45: Factor de Seguridad en Esqueleto del sistema
Nota: Elaboración propia

En conclusión, el esqueleto tiene un factor de seguridad alto de 14.5 que está por encima de lo recomendado, es decir, un factor de seguridad de 10 según la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA), en Estados Unidos, para estructuras y equipos que se involucren directamente con carga viva. La deformación máxima presentada es de 0.06 la cual se encuentra en un rango aceptable y el esfuerzo máximo encontrado es de 14.32 MPa que se encuentra debajo del límite elástico del aluminio el cual es 250 MPa.

3.2. Locomoción

3.2.1. Diseño de las ruedas tipo oruga

En base a los requerimientos establecidos, se determinan las siguientes condiciones para el diseño de unas ruedas tipo oruga. Se trabajará con la premisa de que tanto el peso del sistema junto a la víctima suma 250 kg, se desarrolla en un terreno irregular y tendrá una velocidad máxima de 0.83m/s.

Se estima el diámetro de la rueda motriz de 20 cm y una rueda tensora del mismo diámetro debido al tamaño de un escalón según la Norma Técnica de Edificación E.080 que establece que la altura máxima de un escalón es de 19cm con una profundidad mínima de 28 cm por lo que en base a ello se obtiene que la altura de la correa dentada debe de ser de 4 mm. La configuración de las ruedas oruga se puede observar en la Ilustración 46.



Ilustración 46: Rueda tipo oruga
 Nota: Elaboración propia

Como se observa en Ilustración 47, la rueda motriz está ubicada en función del eje del motor, transmitiendo directamente el movimiento, mientras que la rueda tensora cuenta con un tope en el extremo de su eje situado en la parte interior del sistema, lo que permite mantener la tensión adecuada y asegurar el correcto funcionamiento del mecanismo. Ambos ejes de las ruedas se encuentran posicionadas sobre chumaceras en la parte interna

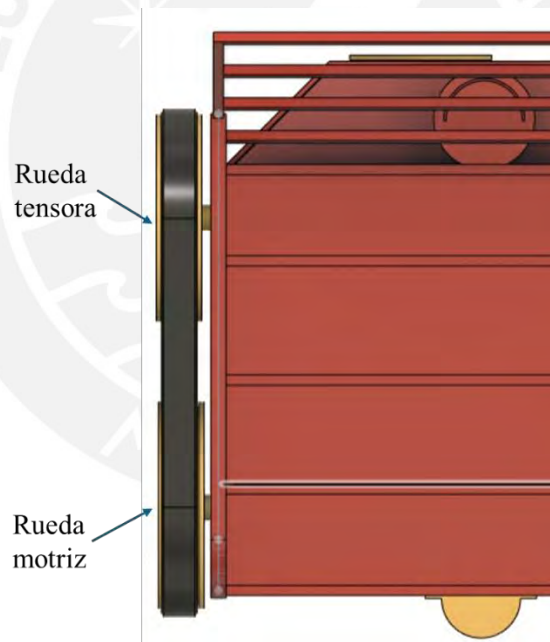
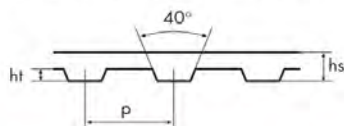


Ilustración 47: Ubicación Rueda Tipo Oruga
 Nota: Elaboración propia

Adicionalmente para una resistencia para altas temperaturas las ruedas dentadas serán de poliuretano. Asimismo, se propone el uso de correas de forma trapezoidal para proporcionar un mayor agarre y tracción para subir la escalera. Por lo que, en base al catálogo de TEXROPE se puede estimar que la altura de trapecio es de 2.3 mm como se ve en la Ilustración 48.

Características físicas



	XL	L	H	XH
Paso p (mm)	5,08	9,53	12,70	22,225
Altura de diente ht (mm)	1,27	1,91	2,29	6,35
Altura nominal hs (mm)	2,3	3,6	4,3	11,4
Masa lineal (g/m) para 1 mm de anchura	2,4	3,2	3,9	11,3
Diámetro mínimo de enrollamiento en número de dientes	10	10	14	18
Diámetro primitivo mínimo (mm)	16,17	30,32	56,6	127,34

Ilustración 48: Características Físicas, correa dentada trapezoidal
Tomado de *TEXROPE (2019) Catálogo Industrial*

Para calcular el ancho de la correa se aplicará la siguiente fórmula.

$$e = P / (Padm \cdot Lcont)$$

Donde:

e: Ancho de la rueda (mm)

P: Carga sobre la rueda (N)

Padm: Presión admisible (N/mm²)

Lcont: Longitud de contacto (mm)

En la Tabla 16 presentada a continuación se realiza el cálculo del ancho de la rueda oruga. Se considerará el caso más extremo donde se tenga 3 puntos de apoyo donde la longitud de contacto sea la distancia trapezoidal de los dientes y la situación será en una escalera de madera cargando una persona. Adicionalmente, según la Norma EN ISO 12100:2010, establece un factor de seguridad de 1,4 para los elementos de transmisión de fuerza

Tabla 16.

Cálculo de la inversa del factor de conductividad térmica conjunta

P	Padm	Lcont	e	e (con FS=1.4)
1225	24.4	4.6	10.9	15.26

Nota: Elaboración propia

En resumen, se emplearán unas ruedas tipo oruga estándar de una longitud de 60 cm de largo con 20 cm de alto junto a una correa dentada trapezoidal de 4.3 mm hecha de poliuretano.

3.2.2. Cálculo de Motor

Primero se definirá los estados de operación para el sistema debido a que por temas de seguridad la velocidad del sistema no deberá ser demasiada cuando se cargue a una persona, especialmente al momento de subir y bajar escaleras. La síntesis del funcionamiento de las velocidades se puede observar en la Tabla 17. Habrá 4 casos en combinación de si se está subiendo una pendiente o si se está trasladando alguna víctima. Para ello se emplearán las velocidades máximas postuladas durante el Capítulo 2.

Tabla 17.

Velocidad de Operación para distintos casos

	Con Carga	Subiendo Pendiente	Velocidad máxima
Caso 1	Sí	Sí	1 km/h
Caso 2	Sí	No	5 km/h
Caso 3	No	Sí	2 km/h
Caso 4	No	No	10 km/h

Nota: Elaboración propia

Se determinará el valor de la potencia requerida para el motor evaluando cada uno de los casos estipulados anteriormente. La determinación del peso total será de 130 kg cuando no se lleve carga y de 250 kg cuando sí se lleve a la víctima.

Para determinar la fuerza del motor, se debe determinar la fuerza de tracción necesaria para mover al sistema. Para ello se aplicará la siguiente fórmula en base al DCL realizado en la Ilustración 49.

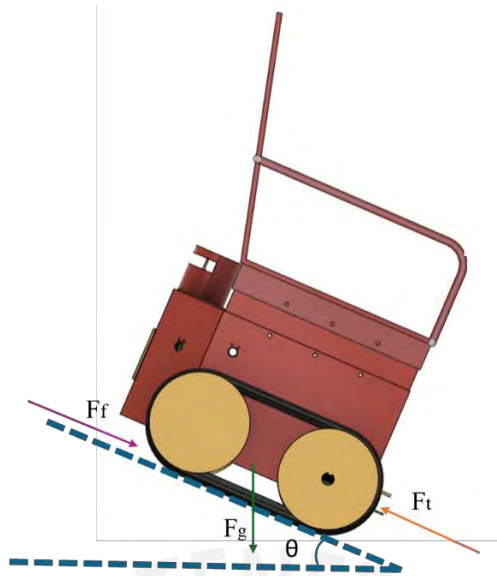


Ilustración 49: Diagrama de cuerpo libre del sistema subiendo una pendiente
 Nota: *Elaboración propia*

El estado donde se requiere una mayor fuerza de tracción (F_t) por parte del motor realizada durante la subida de una pendiente de ángulo θ debido al peso (F_g) y la fuerza de fricción (F_f). Se estimará un coeficiente de fricción de 0.7 y una pendiente de la escalera en base a la Norma Técnica de Edificación E.080 que establece que la pendiente máxima de una escalera es del 45%. Para el cálculo de la fuerza de tracción en cada caso se emplea la siguiente relación.

$$F_t = F_g \cdot \mu \cdot \cos(\theta) + F_g \cdot \text{sen}(\theta)$$

Donde:

F_t : Fuerza de tracción (N)

F_g : Peso (N)

μ : Coeficiente de fricción

θ : Ángulo de inclinación ($^\circ$)

En la Tabla 18 se puede observar en síntesis el cálculo para cada caso propuesto.

Tabla 18.

Cálculo de la Fuerza de Tracción

	<i>Fg</i>	μ	θ	<i>Ft</i>
Caso 1	2450	0.7	45	2949.1
Caso 2	2450	0.7	0	1715
Caso 3	1275	0.7	45	1532.7
Caso 4	1275	0.7	0	892.5

Nota: Elaboración propia

Teniendo en cuenta que las ruedas tienen un diámetro de 20cm se puede determinar el torque necesario para el motor empleando la siguiente fórmula.

$$Ft = 2 Tm / r$$

Donde:

Ft: Fuerza de tracción de los dos motores (N)

Tm: Torque generado por un motor (N.m)

r: Radio de la rueda (m)

En la Tabla 19 se puede observar el cálculo para determinar el torque necesario para el movimiento del robot.

Tabla 19.

Cálculo del Torque del motor

	<i>Ft</i>	<i>r</i>	<i>Tm</i>
Caso 1	2949.1	0.1	147.46
Caso 2	1715	0.1	85.75
Caso 3	1532.7	0.1	76.64
Caso 4	892.5	0.1	44.63

Nota: Elaboración propia

Por otro lado, se debe definir la velocidad del motor en base a lo determinado anteriormente para cada caso por lo que la velocidad se dividirá entre el radio de la rueda para obtener la velocidad angular. En síntesis, se obtendrán los siguientes valores como se observa en la Tabla 20.

Tabla 20.

Cálculo de la velocidad del motor

	Velocidad (m/s)	Radio (m)	n (rad/s)	n (rpm)
Caso 1	0.28	0.1	2.8	26.74
Caso 2	1.39	0.1	13.9	132.74
Caso 3	0.56	0.1	5.6	53.48
Caso 4	2.78	0.1	27.8	265.47

Nota: Elaboración propia

A continuación, en la Tabla 21 se realiza una comparativa de propuestas de motores.

Tabla 21.

Cuadro Comparativo de Motores

	MPP24	DRN80S4	VSF 63 B5	RE40 + GP 42 C
Relación de Transmisión	30:1	30:1	30:1	30:1
Voltaje de Funcionamiento	24 VDC	230/400 VAC	230/400 VAC	24 VCC
Velocidad sin carga	123 rpm	130 rpm	120 rpm	120 rpm
Par S2 (15 min)	70 Nm	75 Nm	60 Nm	60 Nm
Corriente S2 (15 min)	30 A	5.5 A (AC)	5.2 A (AC)	22 A
Par S1 (Continuo)	26 Nm	40 Nm	40 Nm	25 Nm
Corriente S1 (Continuo)	12A	3.5 A (AC)	3.8 A (AC)	12A
Temperatura máxima	155 °C	80 °C	80 °C	120 °C
Número de polos	4 polos	4 polos	4 polos	4 polos
Masa del motor	8.35 kg	16 kg	14 kg	6.5 kg
Dimensiones (L x A x H)	180 x 120 x 110 mm aprox.	260 x 210 x 210 mm aprox.	230 x 180 x 180 mm aprox.	190 x 110 x 110 mm aprox.
Aplicaciones típicas	Robots móviles, AGVs, automatización	Industria pesada, transporte, maquinaria	Industria general, automatización	Robótica, instrumentación, automatización

Nota: Elaboración propia

Se selecciona el motor MPP24 porque nos brinda el servicio de incorporar una caja reductora personalizable, su tamaño reducido y su tolerancia a las altas temperaturas. Por lo que, en base al modelo estándar podemos determinar el tipo de caja reductora necesaria.

Los motores tienen la propiedad de trabajar en 2 modos (S1 y S2). Para una caja reductora de 30:1, el modo S1 permite el trabajo de modo continuo con un torque máximo de 25.83 Nm. Mientras que el modo S2 permite un torque de 70.31 Nm por un intervalo de tiempo de 15 minutos según recomendación del fabricante. Por lo que se diseña el sistema con motores que, de manera continua, estado S1, cumpla con el torque solicitado en el Caso 4 porque es el estado de operación en el que el sistema funcionará la mayor parte del tiempo. Mientras que en el estado S2, se debe cumplir con el torque solicitado en el Caso 1 para poder evacuar a la víctima de manera inmediatamente dentro de los próximos 10 minutos por temas de salud y bienestar de la persona. Se utilizarán los datos de referencia de la caja reductora con relación 30:1 para determinar la relación necesaria para el sistema. La relación de la reducción es directamente proporcional al torque ejercido por lo que al aumentar la relación de la caja reductora se podrá conseguir un mayor torque de salida.

Primero determinamos la relación necesaria para cumplir con el Caso 1:

$$147.46 = 70.31 n1/30$$

$$n1 = 62.92$$

Determinamos la relación necesaria para cumplir con el Caso 4:

$$44.63 = 25.83 n4/30$$

$$n4 = 51.84$$

Se redondea la relación más crítica para obtener una caja reductora con relación de 65:1 por lo que tendremos un torque de manera continua de 55.97 Nm y de 152.34 Nm por 15 minutos. A continuación, en base a las gráficas brindadas por el fabricante como se observa en la Ilustración 50 se puede determinar la velocidad máxima del motor para cada torque.

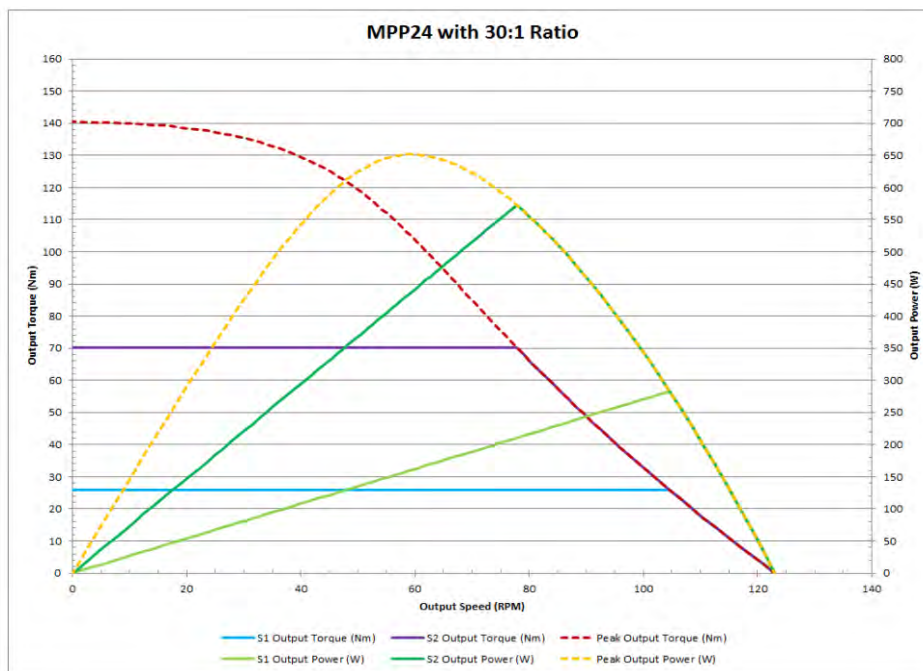


Ilustración 50: Curva de funcionamiento Motorreductor MPP24 - Caja Reductora 30:1
Tomado de ElectroCraft (2019) Motorreductor de Ángulo Recto MPP24

Podemos obtener la velocidad del motor para la relación 30:1 en cada caso y realizando la conversión para la relación 65:1 considerando una eficiencia del 95%, y así obtener las velocidades estimadas de funcionamiento. En la Tabla 22 se observa en síntesis el cálculo realizado.

Tabla 22.

Cálculo de la velocidad del motorreductor

Relación	30:1		65:1	
	n (rpm)	n (rpm)	n (m/s)	n (km/h)
Caso 1	78	34.2	0.361	1.30
Caso 4	105	46.1	0.489	1.75

Nota: Elaboración propia

En conclusión, se emplea un motorreductor MPP24 con caja reductora con relación 65:1 y dimensiones aproximadas de 92mm x 137mm x 245mm, compatible con el espacio disponible para los motores dentro del sistema.

3.3. Módulo de Sensado

Para el reconocimiento del entorno se propone emplear escáner LIDAR 2D para una detección del entorno complementando la medición realizada por la cámara térmica, adicionalmente se emplean sensores de proximidad para los puntos ciegos a lo largo del robot. Cabe resaltar que el objetivo de este módulo es el monitoreo del entorno, teniendo en cuenta medidas de seguridad y planes de contingencia en caso ocurra algún mal funcionamiento debido a la exposición a las altas temperaturas.

3.3.1. Escáner LIDAR 2D

Su principal función será el mapear las zonas donde el campo de visión de la cámara térmica no pueda ver debido a la obstrucción por parte de la silla de rescate. En la Tabla 23, se realiza la comparación entre las alternativas.

Tabla 23.

Cuadro Comparativo de Lidar

Característica	LDS-01	Hokuyo UST-10LX	YDLIDAR X4
Tipo	Escáner láser 2D, 360°	Escáner láser 2D, 270°	Escáner láser 2D, 360°
Voltaje de Suministro	5 VDC \pm 5%	12 VDC / 24 VDC	5 VDC
Fuente de Luz	Diodo láser semiconductor (785 nm)	Diodo láser semiconductor (905 nm)	Diodo láser semiconductor
Consumo de Corriente	\leq 400 mA (pico 1 A)	\leq 150 mA (450 mA arranque)	500 mA

Distancia de Detección	120 mm – 3,500 mm	60 mm – 10,000 mm	12 mm – 10,000 mm
Tasa de Muestreo / Frecuencia	1.8 kHz	40 Hz	5 kHz
Precisión de Medición	±15 mm (corta distancia), ±5% (larga)	±40 mm	±2%
Resolución Angular	1°	0.25°	1°
Dimensiones (Ancho x Profundidad x Alto)	69.5 x 95.5 x 39.5 mm	50 x 50 x 70 mm	70 x 95.5 x 40 mm
Peso	125 g	130 g	325 g
Temperatura de Operación	0 °C a 40°C	-10°C a 60°C	-10°C a 50°C
Interfaz	USB, UART	Ethernet 100BASE-TX	USB, UART

Nota: Elaboración propia

De los sensores LiDAR en el mercado, el YDLIDAR X4 es uno de los que tiene un rango de temperatura de operación más amplio, operando entre temperaturas de -10 °C a 50 °C. Este rango de temperatura le permite operar al sensor con normalidad durante el rescate, además de ser resistente al agua y al polvo. Igualmente, su rango de detección es entre 1.2cm a 10m teniendo un rango adecuado para la detección de obstáculos para recorridos largos como los pasillos en condominios, además de contar con una alta tasa de muestreo. En la Ilustración 51 se puede observar el escáner propuesto. Este elemento en conjunto es compatible con Arduino, Raspberry Pi y otros microcontroladores, tiene el estándar IEC60825-1 Clase 1 que demuestra su uso seguro para cualquier condición normal de uso.



Ilustración 51: YDLIDAR X4
Tomado de YDLIDAR (2022) YDLIDAR X4

3.3.2. Sensores Ultrasónicos

En general los sensores ultrasónicos son delicados hacia las altas temperaturas afectando gravemente su precisión y tiempo de vida en general. Sin embargo, existen sensores ultrasónicos especializados enfocados en altas temperaturas empleados principalmente por la industria metalúrgica y automotriz. A continuación, en la Tabla 24, se hace la comparativa entre algunos sensores ultrasónicos presentes en el mercado.

Tabla 24.
Cuadro Comparativo Sensores Ultrasónicos

Característica	Autonics UTR-M18E	UB500-18GM75-I-V15	Wenglor US18-2
Rango de Detección	30 – 500 mm	30 – 500 mm	20 – 600 mm
Frecuencia del Transductor	300 kHz	380 kHz	300 kHz
Retraso de Respuesta	30 ms	50 ms	50 ms
Tensión de Trabajo	10 – 30 V DC	10 – 30 V DC (rizado 10%)	10 – 30 V DC
Corriente en Vacío	40 mA	45 mA	50 mA
Temperatura de Trabajo	-25 °C a 70 °C	-25 °C a 70 °C	-30 °C a 60 °C

Tipo de Conexión	Conector macho M12x1, 4 polos	Conector macho M12x1, 5 polos	Conector macho M12x1, 4 polos
Grado de Protección	IP67	IP67	IP67
Dimensiones (Diámetro x Largo)	Ø 18 mm x 70 mm	Ø 18 mm x 75 mm	Ø 18 mm x 60 mm
Aplicaciones Típicas	Control industrial, detección de objetos	Detección de objetos, control de posición	Control de presencia, nivel, posición

Nota: Elaboración propia

Entre los hallados en el mercado se empleará el Sensor ultrasónico de temperatura alta de Pepperl+Fuchs, más específicamente el UB500-18GM75-I-V15 que nos permitirá una operación entre temperaturas de -25 °C a 70 °C. Su rango de detección es entre 30 a 500 mm adecuado para la detección cercana de obstáculos en los puntos ciegos. Además, cuenta con una protección IP67 apropiada para ambientes extremos. Su tamaño compacto de 18 mm de diámetro con 85 mm de largo permite su integración con el resto de los componentes. En la Ilustración 52 se puede observar el sensor.



Ilustración 52: Sensor Ultrasónico UB500-18GM75-I-V15
Tomado de Pepperl+Fuchs (2023) UB500-18GM75-I-V15

La distribución alrededor del sistema cubriendo los puntos ciegos contará con 6 de estos sensores. En la parte delantera se ubicará 2 de ellos los paneles adyacentes al central, y los otros 4 repartidos

en equitativamente en cada uno de los laterales del robot. En la Ilustración 53 se puede observar la distribución desde un punto de vista superior.

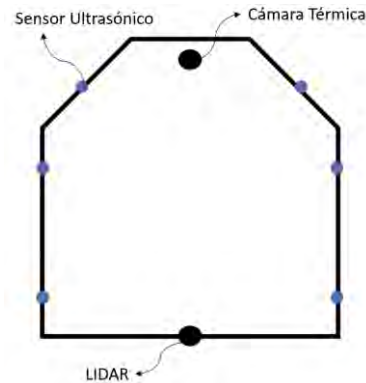


Ilustración 53: Arreglo de sensores ultrasónicos
Nota: Elaboración propia

Finalmente, para realizar su conexión con un microcontrolador, se puede obtener los registros de distancia del sensor por medio de su salida analógica de 4-20 mA, variando en función de la distancia medida. Para poder leer la señal por medio de un microcontrolador, se necesita un módulo de acondicionamiento de señal que convierte la salida de corriente en una señal de voltaje para que esta pueda ser leída. Por otro lado, la alimentación de estos sensores no será por medio del microcontrolador, sino que será por medio de una fuente de 12VDC.

3.4. Módulo de visión

Ante la necesidad de poder visualizar el entorno a través del humo se propone el uso de una cámara térmica acoplada a una columna giratoria que le dé un grado de libertad. A continuación, se describe su diseño.

3.4.1. Cámara Térmica

En la industria, para la detección de objetos a altas temperaturas, se suelen utilizar cámaras termográficas o cámaras de visión infrarroja. Estos dispositivos pueden detectar y medir la

radiación infrarroja emitida por los objetos y pueden proporcionar imágenes que muestran la temperatura sobre la superficie del objeto. En general las cámaras térmicas tienen un alto grado de resistencia a las altas temperaturas por lo que se seleccionará una que cumpla tanto los requerimientos de temperatura y buscando la mejor calidad de video posible. En la **Tabla 25**, se realiza la comparativa de las cámaras térmicas.

Tabla 25.

Cuadro Comparativo de Cámaras Térmicas

Característica	MLX90640	Seek Thermal Compact	Hikvision DS-2TP31B-3AUF
Definición	32 x 24 píxeles IR	206 x 156 píxeles IR	160 x 120 píxeles IR
Número de pines	4 pines	USB-C (conector único)	Múltiples (Ethernet, alimentación)
Tensión de Trabajo	3.0 – 3.6 V (3.3 V típico, 5 V tolerado)	5 V USB	12 VDC / PoE
Consumo de Corriente	15 – 25 mA	500 mA	500 mA
Temperatura de Trabajo	-40 °C a 85 °C	0 °C a 50 °C	-10 °C a 55 °C
Dimensiones	Ø 9.28 x 11.25 mm	40 x 20 x 10 mm	120 x 90 x 70 mm
Campo de Visión (FOV)	110° x 75°	36° x 27°	25° x 19°
Interfaz	I2C (hasta 1 MHz), con breakout board USB/I2C	USB	Ethernet / SDK
Frecuencia de actualización	0.5 – 64 Hz	15 Hz	30 Hz
Precisión de temperatura	±1 °C (típico), ±2 °C (0–100 °C rango)	±5 °C	±0.5 °C
Aplicaciones típicas	Proyectos DIY, domótica, control industrial	Termografía móvil para smartphones	Seguridad, inspección industrial

Nota: Elaboración propia

Se escogió la cámara térmica MLX90640 que tiene un rango de temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ y puede proporcionar una resolución de imagen de hasta 32×24 píxeles. Su transmisión de video se puede realizar a través de un microcontrolador como Arduino o mediante conexión de video analógica. Además de que existen varios modelos de placas que incorporan la cámara, asumimos unas dimensiones $26\text{mm} \times 18\text{mm} \times 16\text{mm}$. En la Ilustración 54 se puede observar la cámara térmica.



Ilustración 54: Cámara térmica MLX90640
Tomado de Melexis (2023) MLX90640

La cámara térmica se montará en la parte superior de la columna acoplándose a un soporte. Se pueden agregar soportes adicionales o adaptadores para poder garantizar que la cámara se fije de manera segura y brindar una mayor protección en la parte superior de la columna.

3.4.2. Columna giratoria

Para el diseño de la columna giratoria se contemplan dos partes. La base donde se ubicará el servomotor respectivo y la parte superior donde se posicionará la cámara térmica. Como se puede ver en la Ilustración 55.

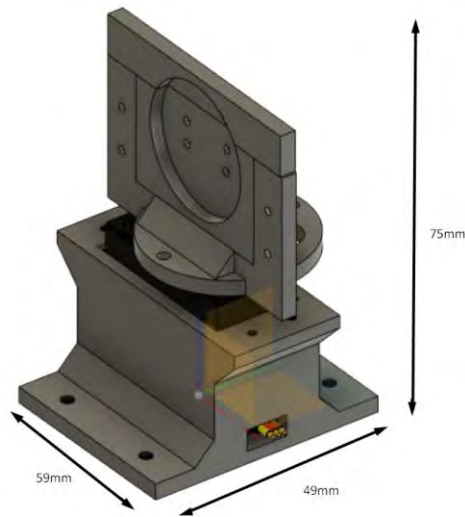


Ilustración 55: Columna giratoria del módulo de visión

Nota: Elaboración propia

El torque necesario es mínimo por lo cual se busca un servomotor que cumpla principalmente con el requerimiento del espacio. Por ello se seleccionará al MG995 cuyo rango de temperatura es aceptable al ser entre 0 a 55°C. En la Tabla 26 se puede observar sus especificaciones.

Tabla 26.

Especificaciones Técnicas: MG995

Esfuerzo de Torsión	9.6 kg.cm / 4.8V	10.5 kg.cm / 6V
Velocidad	0.15s/60° / 4.8V	0.13s/60° / 4.8V
Peso	58g	
Temperatura de Operación	-30°C a 60°C	
Tamaño	40 x 20 x 37.5 mm	
Tipo de motor	Motor DC	
Rodamiento de bolas	BB doble	

Tomado de Melexis (2023) MG995

Para el desarrollo de la impresión 3D de la base y la parte superior se sugiere el uso PEEK que es un material de impresión 3D cuya temperatura de transición vítrea es de 143°C y de fusión de 343°C haciéndola ideal para trabajos en altas temperaturas.

Adicionalmente para proteger a la cámara y al servomotor del entorno se piensa cubrir a través de un recubrimiento formado del mismo material de impresión que las otras piezas de un espesor de 2cm y en empleando policarbonato como material transparente para que permita la visión de la cámara térmica. Dicha protección se puede observar en la Ilustración 56. Adicionalmente, se contempla el uso de una protección del cableado mediante termoplásticos contraíbles que brinda un grado mayor de protección ante las altas temperaturas.

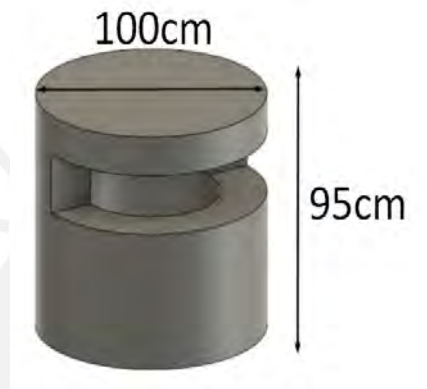


Ilustración 56: Cilindro protector
Nota: Elaboración propia

3.5. Módulo de sonido

El sistema contempla la recepción y emisión de audio ubicado en una zona de alta exposición, por lo que en este apartado se priorizará la resistencia a la alta temperatura. En la Tabla 27 y Tabla 28, se realiza la comparación de los componentes.

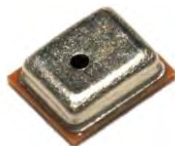
Tabla 27.

Cuadro Comparativo Micrófono

Característica	MP34DT01	SPW2430	ADMP401
Tipo	MEMS, omnidireccional	MEMS, omnidireccional, top port	MEMS, omnidireccional
Rango de frecuencia	100 Hz – 10 kHz	100 Hz – 10 kHz	100 Hz – 10 kHz
Voltaje de entrada	1.6 – 3.6 V DC	1.5 – 3.6 V DC	1.5 – 3.6 V DC
Corriente de suministro	120 μ A	75 – 110 μ A	120 μ A
Sensibilidad / Rango de audición	65 dB SNR	59 dB SNR	62 dB SNR
Temperatura de trabajo	-40 °C a 85 °C	-40 °C a 100 °C	-40 °C a 85 °C
Dimensiones (L x W x H)	3.5 x 3.0 x 1.0 mm	3.1 x 2.5 x 1.0 mm	3.5 x 2.65 x 1.1 mm
Número de pines	4 pines	4 pines	4 pines
Tipo de salida	Digital (PDM)	Analógica	Analógica
Aplicaciones típicas	Auriculares, dispositivos portátiles	Smartphones, grabación, IoT	Smartphones, grabación, IoT

Nota: Elaboración propia

Para la recepción del sonido se emplea un micrófono SPW2430 que incluye su tarjeta propia, que es resistente a temperaturas entre -40°C a 100°C, y de dimensiones 2.5mm x 3.1mm x 1mm. Como se observa en la Ilustración 57 .



*Ilustración 57: SPW2430
Tomado de KNOWLES (2014) SPW2430*

Tabla 28.

Cuadro Comparativo Altavoz

Característica	CMT-12-SMT-TR (Knowles)	Same Sky CMT- 7525-03-SMT-TR	Zumbador Piezoeléctrico Genérico 12mm
Tipo	Piezoeléctrico	Piezoeléctrico	Piezoeléctrico
Voltaje de Entrada	5 VDC	12 VDC	3 – 12 VDC
Corriente de Suministro	5 mA	No especificado	5 – 10 mA
Rango de Audición	85 dB	85 dB	80 – 90 dB
Temperatura de Funcionamiento	-40 °C a 100 °C	No especificado	-20 °C a 85 °C
Dimensiones (Diámetro x Alto)	12 mm x 9.5 mm	12 mm x 9.5 mm	12 mm x 9.5 mm

Nota: Elaboración propia

Por otro lado, para la emisión del sonido se emplea el altavoz CMT-12-SMT-TR cuya resistencia va desde los -40°C a 120°C y dimensiones de 12mm x 12mm x 3mm.



*Ilustración 58: CMT-12-SMT-TR
Tomado de KNOWLES (2014) CMT-12-SMT-TR*

Estos componentes son resguardados en el cilindro protector junto a la cámara térmica en la parte delantera del vehículo.

3.6. Interconexión entre los módulos

El Arduino Uno será el microcontrolador por emplear, se utilizarán 2 de ellos para las diversas tareas que no tengan la necesidad de tener un alto nivel de procesamiento como puede ser el control de los motores.

Por otro lado, se emplea la Raspberry Pi4 como la computadora embebida, encargada de transmitir la teleoperación del sistema, así como la comunicación mediante audio y vídeo.

A continuación, en la Ilustración 59 se muestra el esquema de interconexión entre los sistemas de manera general.

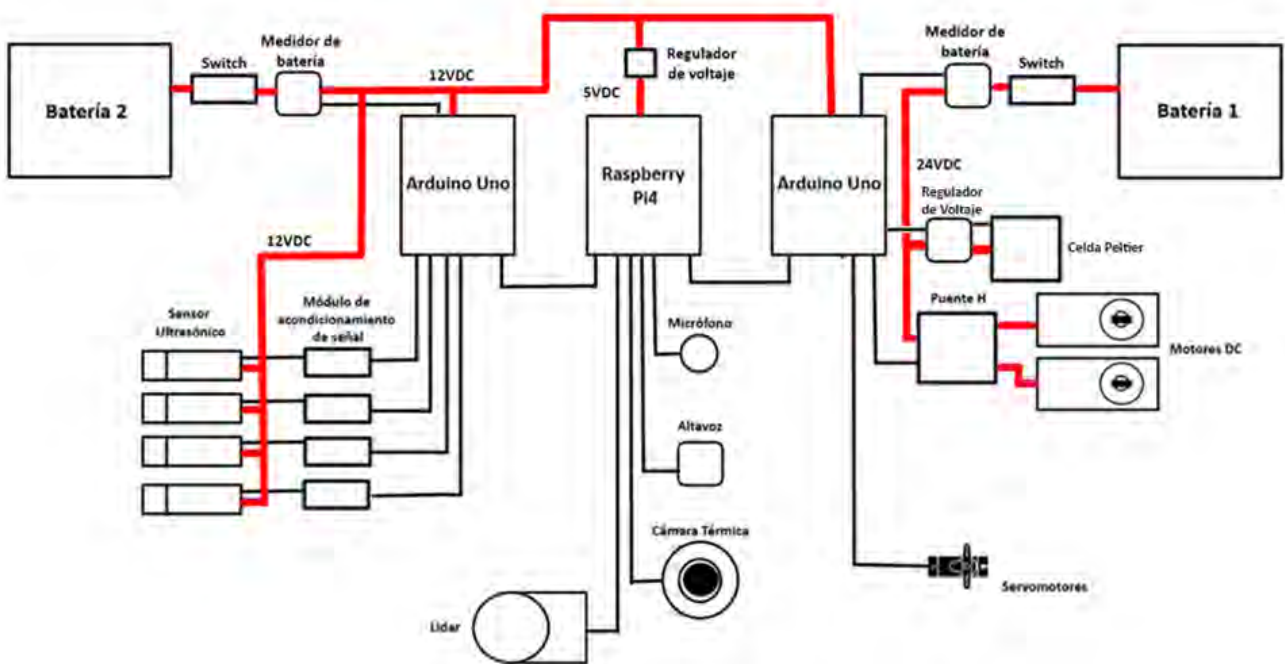


Ilustración 59: Diagrama de Interconexión
Nota: Elaboración Propia

3.7. Sistema de alimentación

Una vez seleccionado los componentes, se desarrolla la evaluación del consumo energético de estos durante la operación. Se propone una alimentación separada para los distintos módulos con el fin de controlarla de mejor manera.

Primero se agrupa el “Módulos de locomoción”, “Sistema de Enfriamiento” y el “Módulo de extinción” debido a que ambos son módulos indispensables en todo momento, pero se debe tener en cuenta que el “Módulo de extinción” no estará operando en todo momento ya que existe un suministro de agua limitado. En la

Tabla 29 se puede ver el cálculo energético para la primera batería.

Tabla 29.
Cálculo de la Batería 1

Descripción	Frecuencia de uso	Corriente (A)	Voltaje (V)	Cantidad	Potencia unitaria (W)	Potencia (W)
Motor	100%	-	24	2	260	520
Celda Peltier	100%	6	3.3	1	19.8	19.8
POTENCIA TOTAL (W)						540.5

Nota: Elaboración propia

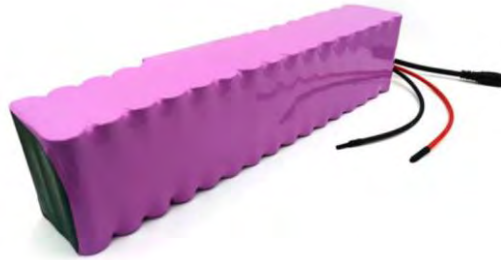
Se calcula la capacidad de la batería en función del voltaje máximo requerido en este caso 24V y una autonomía de 1 hora aproximadamente para la búsqueda antes de requerir un cambio.

$$\text{Capacidad} = (521 \text{ W} * 1 \text{ h}) / (80\% * 24 \text{ V}) = 28.1 \text{ Ah}$$

Por lo tanto, para la primera batería se requiere que sea de 24V y 28Ah por lo menos.

Se escogió la batería 6S8P que tiene una capacidad de 24V y 28Ah, una protección BMS que equilibra la carga entre las celdas, y con dimensiones compactas de 300mmx70mmx70mm

permitiéndole encajar dentro del sistema sin ningún problema. En la Ilustración 60 se puede observar la batería.



*Ilustración 60: Banco de Baterías 6S8P
Tomado de Walmart (2023) 6S8P*

El resto de los módulos serán agrupados en este grupo teniendo en cuenta que el “Módulo de visión” es prioritario y deberá funcionar en todo momento. Por ello se tendrá un control del suministro energético en función de la energía restante. En otras palabras, se enumeran a continuación la lista de prioridades:

- Módulo de visión (habilitado durante el 100% de la operación)
- Módulo de sonido (habilitado durante el 80% de la operación)
- Módulo de sensado - Lidar (habilitado durante el 80% de la operación)
- Módulo de sensado - Ultrasónicos (habilitado durante el 100% de la operación)

En la Tabla 30 se puede ver el cálculo energético para la segunda batería.

Tabla 30.

Cálculo de la Batería 2

Descripción	Frecuencia de uso	Corriente (A)	Voltaje (V)	Cantidad	Potencia unitaria (W)	Potencia (W)
Arduino	100%	0.5	12	2	6	12
Raspberry	100%	2.5	5	1	12.5	12.5
Cámara térmica	100%	0.2	5	1	1	1
Servomotores	15%	0.9	6	1	5.4	0.81
Lidar	80%	0.5	5	1	2	1.6
Sensores Ultrasónicos	100%	0.01	12	4	0.12	0.48
Micrófono	80%	0.01	3.3	1	0.03	0.03
Altavoz	30%	0.05	5	1	0.25	0.08
POTENCIA TOTAL (W)						28.53

Nota: Elaboración propia

Se calcula la capacidad de la batería en función del voltaje máximo requerido en este caso 12 V y una autonomía de 1 hora para la búsqueda antes de requerir un cambio.

$$Capacidad = (28.53 \text{ W} * 1 \text{ h}) / (80\% * 12 \text{ V}) = 2.97 \text{ Ah}$$

Por lo tanto, para la primera batería se requiere que sea de 12V y 3Ah por lo menos.

Se escogió la batería RT 1232 de la marca Ritar con sucursal en Perú que tiene una capacidad de 12V y 3.2Ah, cuenta con dimensiones de 134mmx67mmx66mm permitiéndole encajar dentro del sistema. En la Ilustración 61 se puede observar la batería.



*Ilustración 61: RT 1232
Tomado de Ritar Power Perú (2023) RT 1232*

3.8. Diagrama Esquemático General

A continuación, en la Ilustración 62 se presenta un esquema integral del sistema mecatrónico del proyecto, que abarca todos los componentes involucrados y sus respectivas interacciones en las partes mecánica, electrónica y de control.

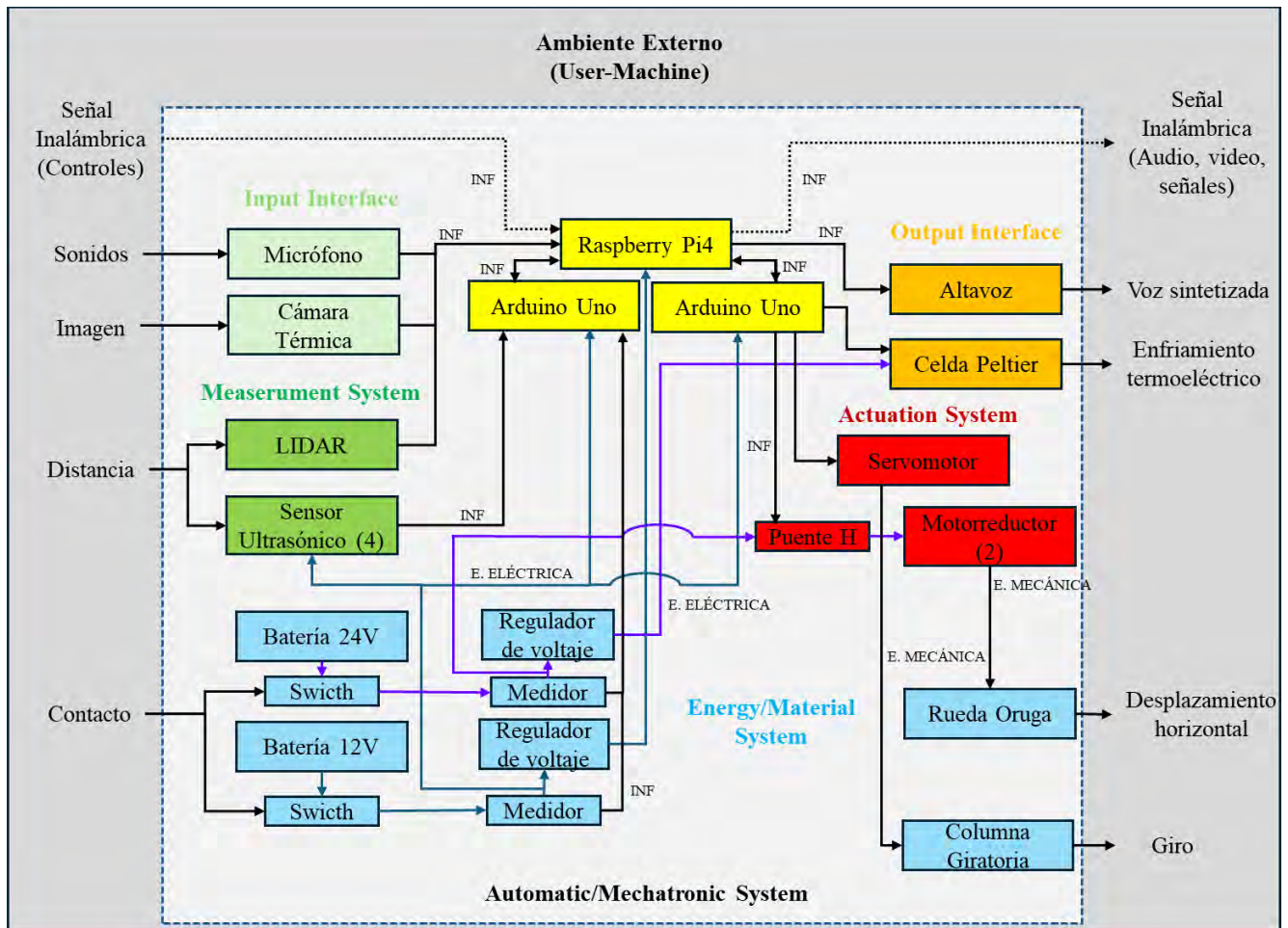


Ilustración 62. Diagrama Esquemático del Sistema Mecatrónico
Nota: Elaboración propia

La estrategia de control se basa en dividir las señales entre dos Arduino Uno y una Raspberry Pi 4, cada uno con responsabilidades específicas. La Raspberry Pi 4 se encarga de manejar los elementos que requieren un alto procesamiento, como el micrófono, el altavoz, la cámara térmica y el LIDAR. La comunicación con el usuario se realiza mediante WiFi, donde la Raspberry Pi 4

hostea una página web que transmite las señales recolectadas y recibe comandos del usuario. Esta página web muestra la información recopilada desde el primer Arduino Uno y desde la propia Raspberry Pi 4, además de también enviar comandos hacia el Raspberry Pi4 que los transmitirá al segundo Arduino Uno.

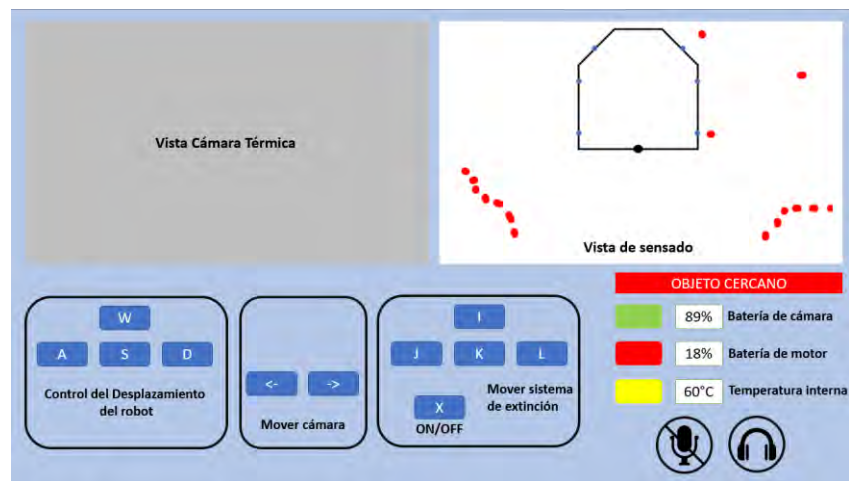
Los dos Arduino Uno se dividen el resto de los componentes según si son de medición o de actuación. El primer Arduino transmite a la Raspberry Pi 4 las señales de los sensores ultrasónicos para la detección de obstáculos cercanos y los medidores de las dos baterías. Esta información es de carácter informativo y se muestra al usuario a través de la interfaz web, sin influir en los condicionales de operación. Por otro lado, el segundo Arduino recibe los comandos de movimiento desde la Raspberry Pi 4. Estos comandos controlan el ángulo de visión de la cámara térmica mediante una columna giratoria accionada por un servomotor, y también gestionan el movimiento del sistema de locomoción a través del espacio mediante los motorreductores que controlan el giro y desplazamiento de las ruedas oruga. Esta división de funciones permite una distribución eficiente de las responsabilidades.

3.9. Interfaz de comunicación

La comunicación de los Arduino con la Raspberry se hará de forma local, mientras que su comunicación con el exterior se realizará por medio del módulo Wi-fi incorporado por la misma Raspberry.

La interfaz propuesta debe contener la información necesaria para la correcta toma de decisiones por parte del operario que se incorporará para ser operada a distancia por medio de una computadora portátil.

Es necesario tener en todo momento las imágenes enviadas de la cámara térmica en la pantalla junto a un esquema del robot y su interacción con el entorno en la parte superior de la pantalla. Se pondrá una leyenda en la parte inferior de los comandos para el manejo del sistema, y se debe de tener visible el estado del sistema en todo momento monitoreando el estado de la batería por medio de sus medidores, así como la temperatura interna del sistema por medio del sensor ya instalado en el Arduino Uno. En la Ilustración 63 se puede apreciar un bosquejo de la distribución para la interfaz propuesta.



*Ilustración 63: Interfaz de página web
Nota: Elaboración propia*

3.10. Diagramas de flujo de Control

En este apartado se menciona el control y la trasmisión de datos entre microcontroladores, computadora embebida y la nube en base a la interfaz propuesta.

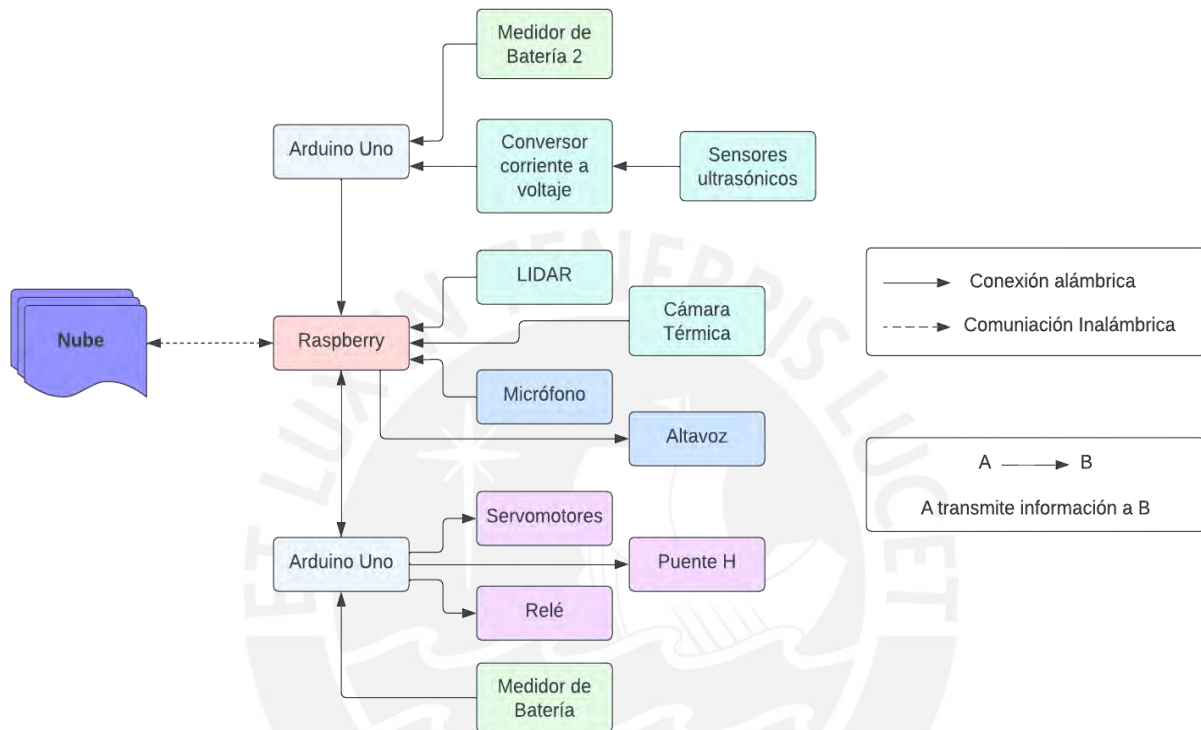


Ilustración 64: Diagrama de control entre equipos
Nota: Elaboración propia

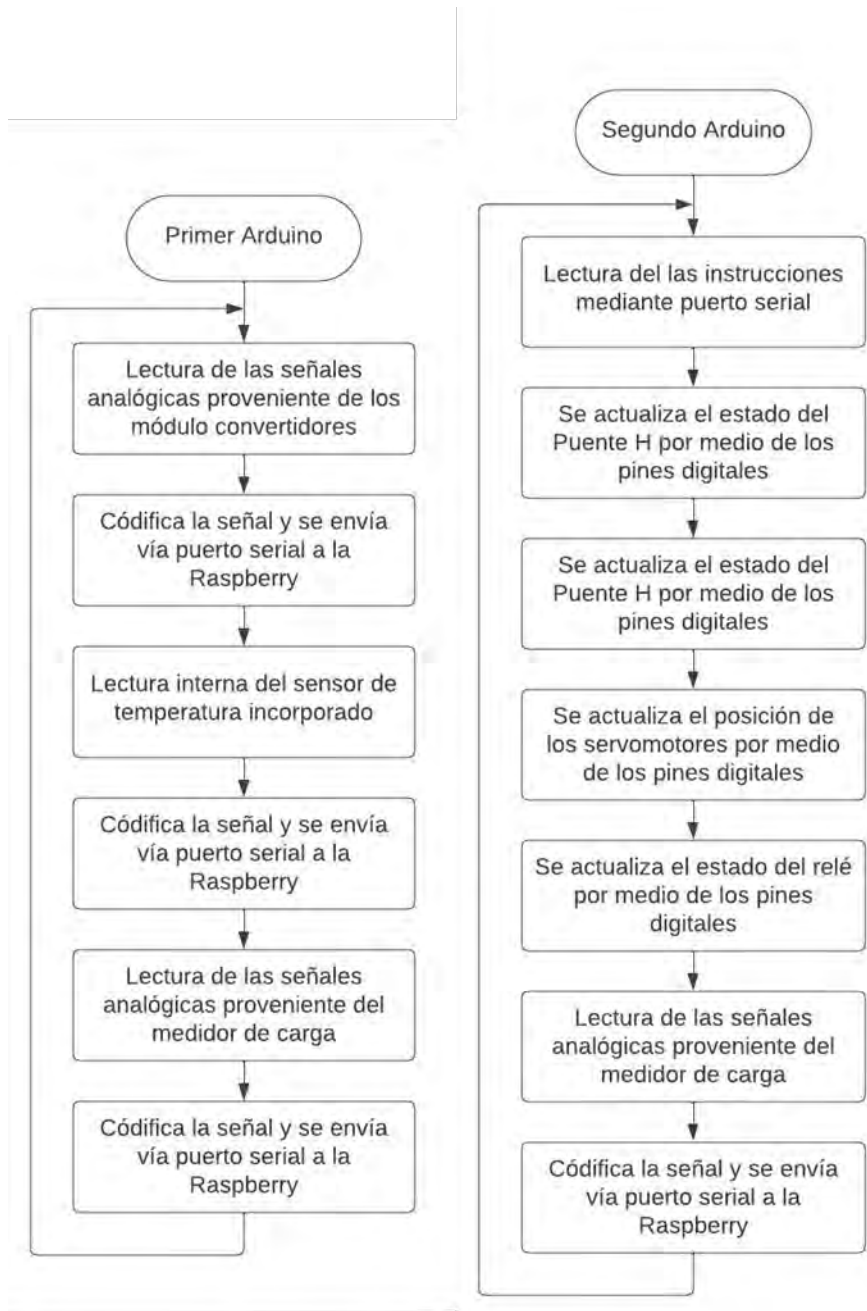
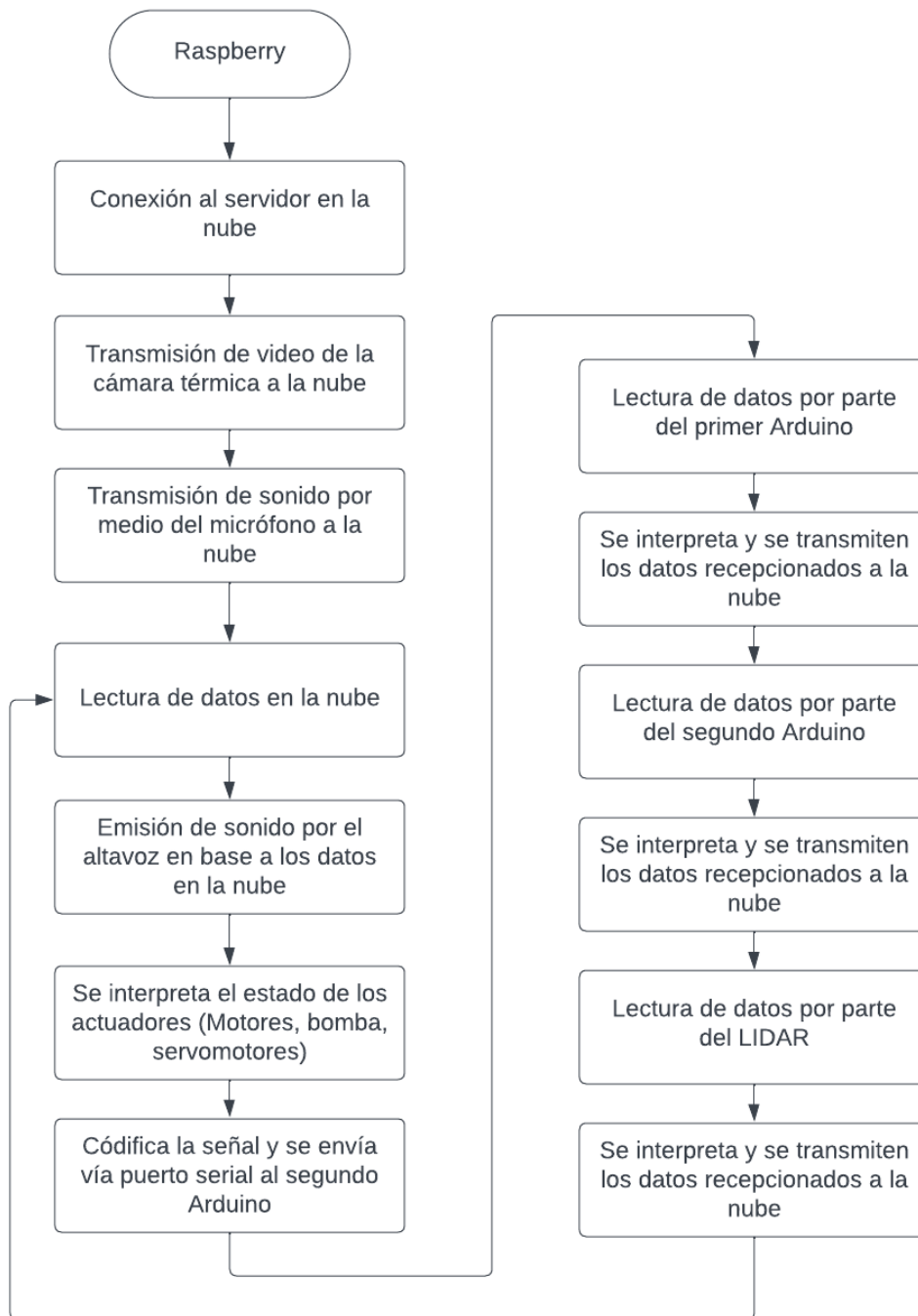


Ilustración 65: Diagrama de flujo primer y segundo Arduino
 Nota: Elaboración propia



*Ilustración 66: Diagrama de flujo Raspberry
Nota: Elaboración propia*

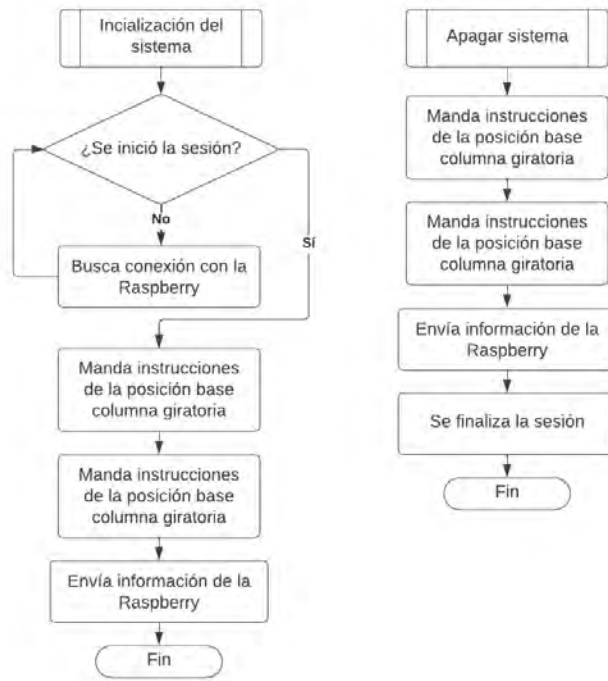


Ilustración 68: Diagrama de flujo Nube y funciones
 Nota: Elaboración propia

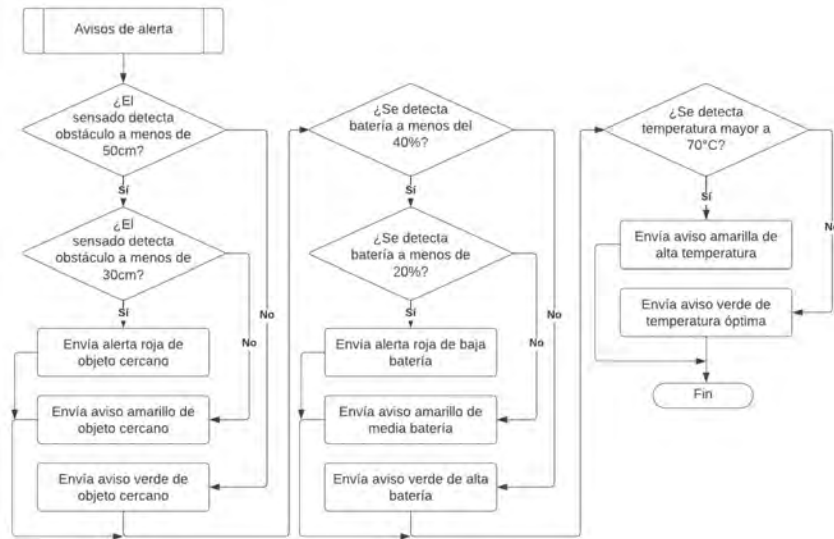


Ilustración 69: Diagrama de flujo Nube y funciones
 Nota: Elaboración propia

3.11. Comunicación remota

La comunicación entre los Arduino Uno y la Raspberry Pi4 será a través del puerto serial. De esta manera, se podrá enviar las instrucciones desde la Raspberry a los Arduino, y los Arduino podrán mandar información de los sensores a la Raspberry, siendo una comunicación tipo “Master-Slave”.

El primer Arduino Uno leerá e informará el estado de los sensores ultrasónicos a la Raspberry para que el operario pueda tomar las medidas respectivas, es decir, de ninguna forma restringe los movimientos del robot independientemente de su estado. Además de que enviará la información del estado de la batería de 12VDC.

El segundo Arduino Uno recibe las instrucciones del operario sobre los movimientos para los motores a través de puente H, el ON/OFF de la bomba hidráulica, y el movimiento de los servomotores ubicados tanto en la columna giratoria de la cámara como en la articulación móvil del módulo de extinción.

Para el desarrollo del código para la Raspberry Pi4 se tendrá que definir los puertos seriales para la comunicación con cada uno de los microcontroladores y los componentes correspondientes. Asimismo, la comunicación con la nube para la teleoperación se divide en dos, primero para la transmisión del audio y video será empleando alguna plataforma virtual de videollamadas cuyo enlace se ubicará en una página, en esta ocasión se usa la plataforma Zoom. Por otro lado, la Raspberry lee las instrucciones de la nube en la página web para luego ejecutarlas. La configuración de la Raspberry antes del inicio de la operación se podrá realizar a través de una computadora portátil mediante el puerto HDMI.

Finalmente, la página web correspondiente se realizó por medio de una plataforma de desarrollo de aplicaciones web, en este caso Firebase. Para el desarrollo de la página web se divide en tres partes, la primera será para darle la estructura de la página del contenido a tener, la segunda dándole el diseño y estética de esta, y la tercera encargada de la funcionalidad y conectividad. En la Ilustración 70 se puede ver la interfaz de la página web.



*Ilustración 70: Interfaz de página web
Nota: Elaboración propia*

3.12. Simulación del sensado de los Ultrasónicos

El sensor ultrasónico UB500-18GM75-I-V15 no se puede conectar directamente al puerto analógico del Arduino ya que este bota una señal de 4 a 20mA en función de la distancia del objeto detectado dentro de un rango de 30 a 500mm. Por lo cual se optó por seleccionar un convertidor de corriente a voltaje, más específicamente el componente HW-685 que tiene la capacidad de convertir una corriente de 4 a 20mA a un voltaje de 2.5, 3.3, 5 o 10V dependiendo de la configuración de los jumpers establecida.

La configuración del HW-685 será a 5V, además según especificaciones se le debe suministrar una alimentación mayor a la configurada por al menos 3V, así que se optará a conectarla directamente al suministro de la batería de 12V. Asimismo, la conexión con el Arduino será como se muestra en la Ilustración 71.

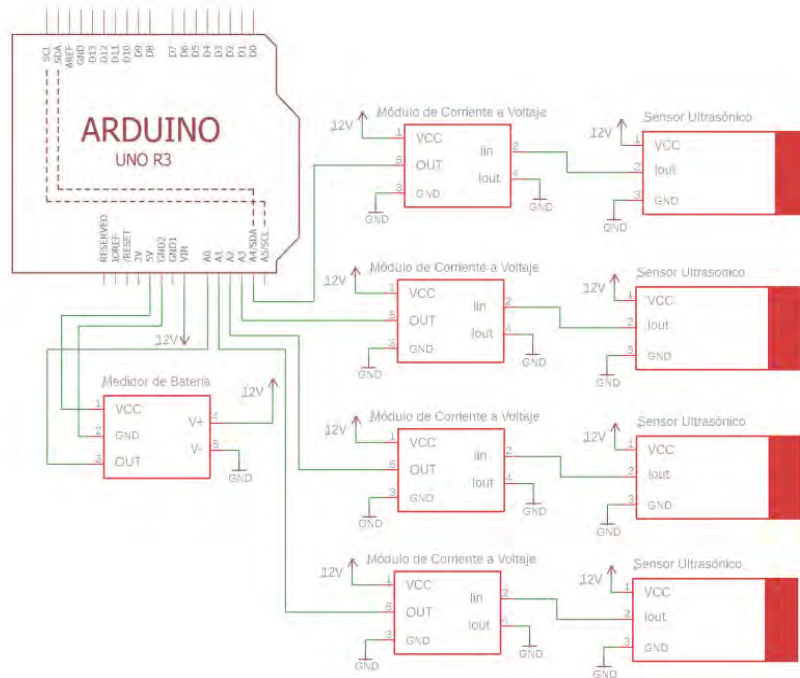


Ilustración 71: Diagrama esquemático Primer Arduino
Nota: Elaboración propia

Para la simulación de la señal de entrada al Arduino a través de su puerto analógico se usó Simulink por medio de la siguiente configuración mostrada en la Ilustración 72.

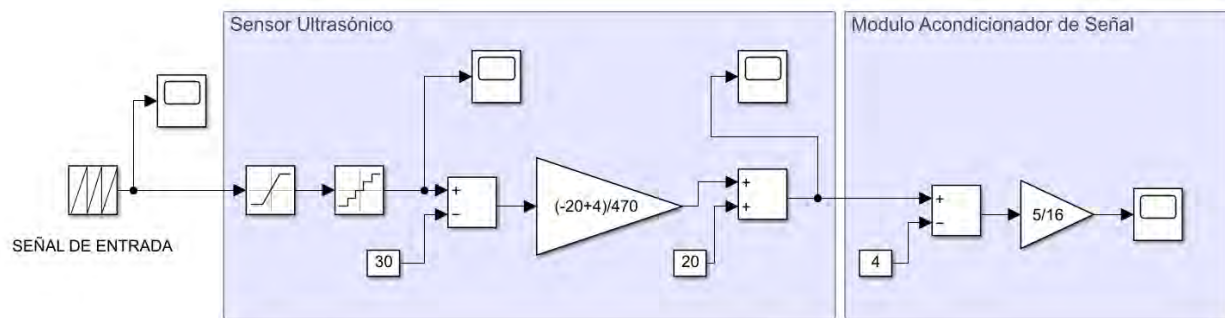


Ilustración 72: Diagrama de bloques - Transmisión de señal de sensado - Sensor Ultrasónico
 Nota: Elaboración propia

En la Ilustración 73 observamos la señal de entrada que ha sido simulada para ver la detección del sensor para distintas distancias, se estableció para la simulación un rango de entrada de entre 30 a 700mm en un periodo de un segundo.

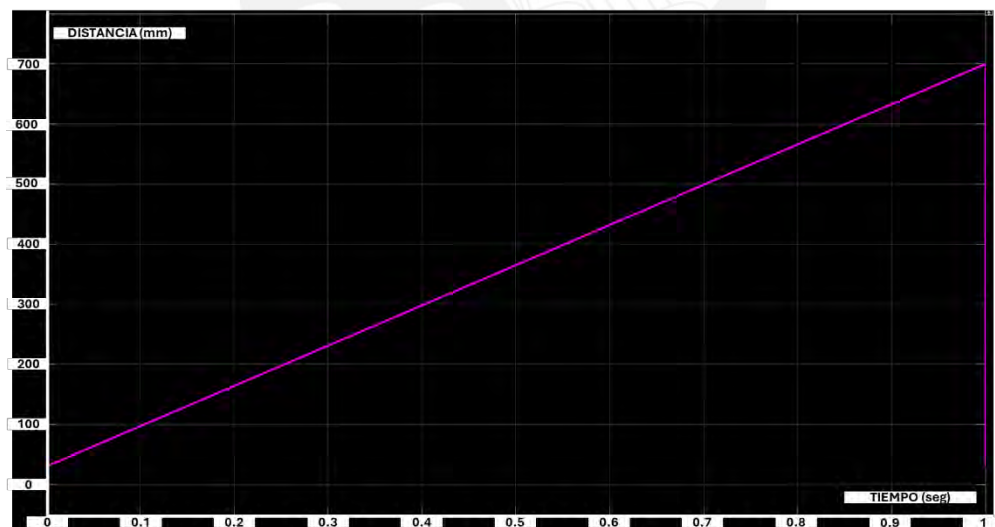
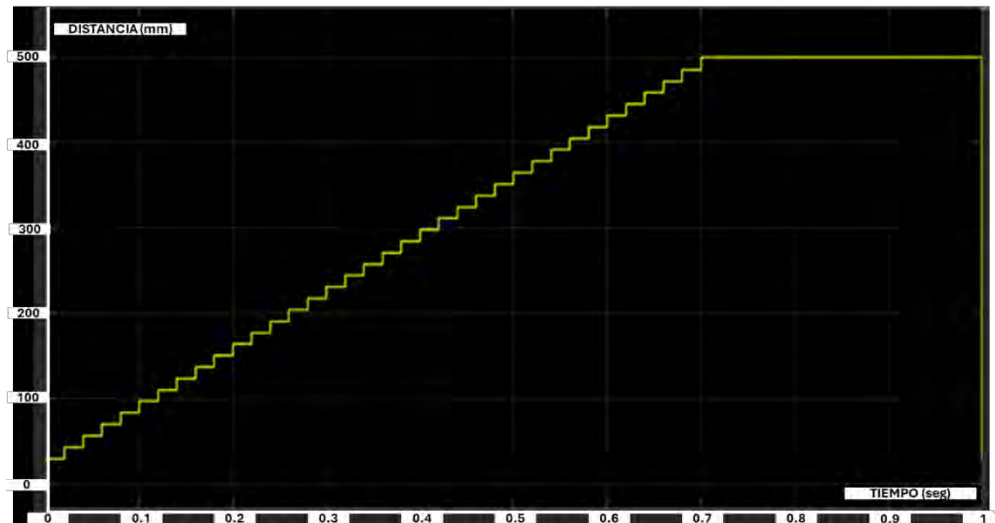


Ilustración 73: Distancia real de objeto detectado
 Nota: Elaboración propia

Después esta distancia es detectada por el sensor ultrasónico solamente dentro de su rango de entre 30 a 500 mm por lo que señales más allá de ese rango se determinan como el rango máximo. Asimismo, el sensor ultrasónico UB500-18GM75-I-V15 tiene una frecuencia de muestreo de 380 Hz. En la Ilustración 74 se puede observar el recorte del rango de la entrada, así como el muestreo realizado por el instrumento.



*Ilustración 74: Señal de entrada por el Sensor Ultrasónico
Nota: Elaboración propia*

Después de la detección del objeto el propio instrumento manda una señal en forma de corriente entre 4 a 20mA en función de la distancia la cual es inversamente proporcional. En otras palabras, mandará 4mA cuando detecte una señal a 500mm y 20mA cuando detecte a 30mm. En la Ilustración 75 se puede observar

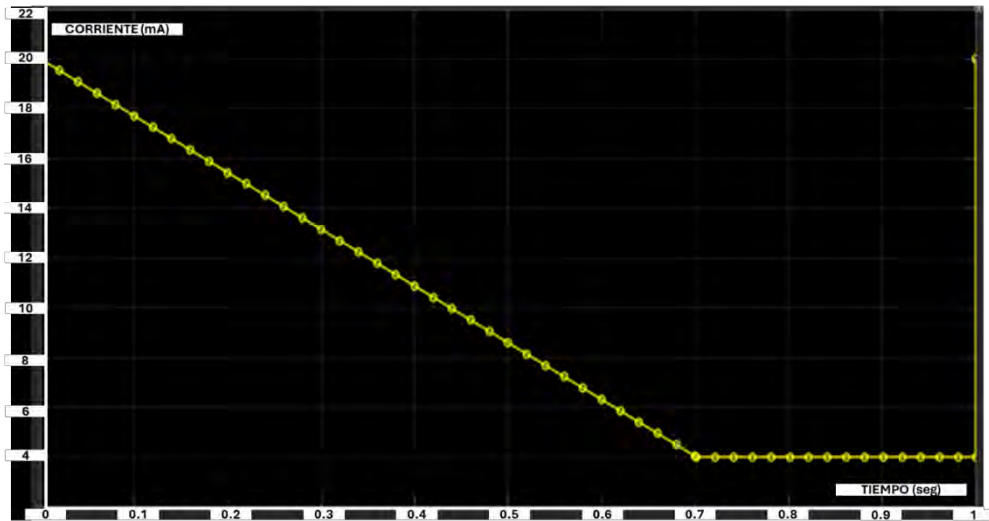


Ilustración 75: Señal de salida del Sensor Ultrasónico
Nota: Elaboración propia

Finalmente, esta señal de salida del sensor ultrasónico entrará al HW-685 para que la adecue a una señal de 0 a 5V y pueda entrar al pin analógico del Arduino sin dañarlo. En la Ilustración 76 se puede observar la señal de salida del HW-685 que irá al Arduino.

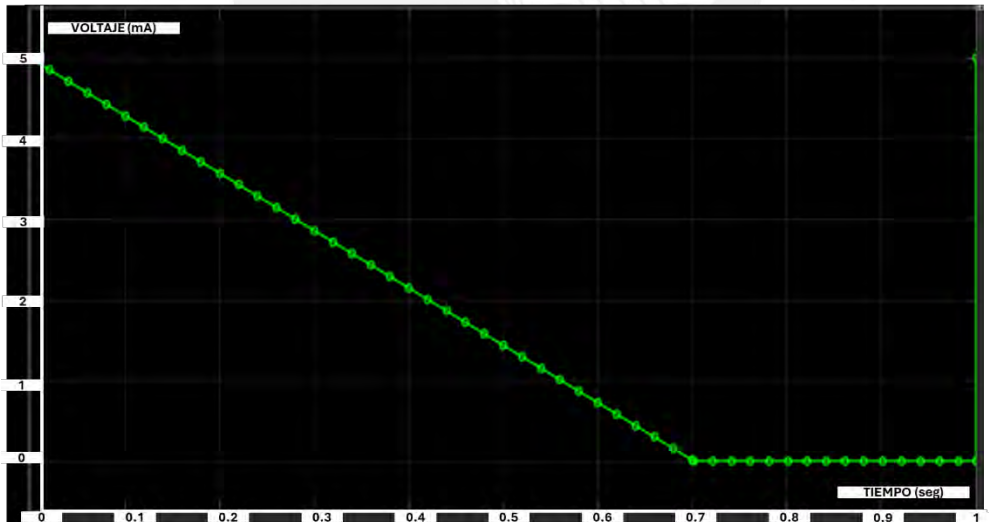


Ilustración 76: Señal de salida del Adecuador de señal
Nota: Elaboración propia

CAPÍTULO 4: PLANOS Y COSTOS

Los planos de fabricación para la estructura mecánica, soportes y protección de componentes son listadas en la Tabla 31.

Tabla 31.

Lista de planos

N°	Nombre del Plano	Módulo
1	Capa Exterior	Estructura mecánica
2	Cubierta Superior	Estructura mecánica
3	Silla	Estructura mecánica
4	Estructura Interna	Estructura mecánica
5	Plataforma Superior 1	Estructura mecánica
6	Plataforma Superior 2	Estructura mecánica
7	Plataforma Inferior	Estructura mecánica
8	Cubierta Delantera	Estructura mecánica
9	Rueda Motriz	Sistema de Locomoción
10	Rueda Tensora	Sistema de Locomoción
11	Base Servomotor	Módulo de Visión
12	Articulación Cámara	Módulo de Visión
13	Protección Cámara	Módulo de Visión
14	Base Arduino	Sistema de Control
15	Tapa Arduino	Sistema de Control
16	Base Raspberry	Sistema de Control
17	Tapa Raspberry	Sistema de Control
18	Soporte Batería 12V	Alimentación
19	Soporte Batería 24V	Alimentación
20	Protección Celda Peltier	Sistema de Enfriamiento
21	Soporte Lidar 1	Módulo de Sensado
22	Soporte Lidar 2	Módulo de Sensado
23	Soporte Medidor de Batería	Alimentación
24	Soporte de Motor	Sistema de Locomoción
25	Soporte Regulador de Voltaje	Alimentación
26	Soporte Relé	Alimentación
27	Soporte Switch	Alimentación
28	Soporte Ultrasónica 1	Módulo de Sensado
29	Soporte Ultrasónico 2	Módulo de Sensado
30	Soporte Acondicionador de Señal	Módulo de Sensado

Nota: Elaboración propia

A continuación, se realiza el listado de los costos de la adquisición de la materia prima para el desarrollo del proyecto.

Tabla 32.

Cotización del proyecto

Descripción	Precio Unitario (S/)	Cantidad	Precio Total (S/)
Inconel 601	-	-	9620.5
Aluminio (10mm x 10mm - Bruto)	-	-	851.8
Fibra Nomex (m ²)	61.8	4	247.2
Correa dentada	59.85	2	119.7
Cables	-	-	50
Termocontraible	-	-	75
PEEK (kg)	2186.5	2	4372
Arduino Uno	60	2	120
Raspberry Pi4	218.5	1	218.5
Medidor de batería	4.8	2	9.6
Puente H	20	1	20
Relé	47	1	47
Switches	14	2	28
Regulador de voltaje	25	2	50
Batería 24V 28Ah	792.7	1	792.7
Batería 12V 3Ah	60	1	60
Cámara térmica	280.3	1	280.3
Servomotores	30	3	90
Lidar	713.4	1	713.4
Sensores Ultrasónicos	822.2	4	3288.8
Módulo corriente-voltaje	12	4	48
Micrófono	18.2	1	18.2
Altavoz	3.75	1	3.75
TOTAL (S/)			21124.45

Nota: Elaboración propia

Al precio total obtenido se le aumentará un 30% a los productos que no se encuentren en el mercado local por aspectos sin considerar cómo es el envío, inflación o manufactura. Por lo que se obtuvo que el precio del robot es de S/26,898.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se concluye que que la implementación de un robot para rescate en incendios permitirá un aumento en la capacidad del tiempo de operación de los bomberos por cada reserva de oxígeno hasta en 2.5 veces debido a la reducción de la carga laboral y por ende un menor consumo de oxígeno. Adicionalmente, se recomienda analizar la viabilidad de que el robot pueda llevar parcialmente instrumentos necesarios para la operación en vez de los bomberos.

- Se concluye que el sistema mejoraría el proceso de rescate de las víctimas al realizarlo de una manera más eficiente, ágil y segura, reduciendo el tiempo de exposición de todos los involucrados hasta un 30%, considerando que un bombero trasladando una persona en un ambiente con poca visibilidad se mueve a una velocidad entre 0.5 a 1 km/h. Asimismo, se recomienda una extensión de la interfaz propuesta anteriormente que integre de manera digital el control de los tiempos y reserva de oxígeno de los bomberos.

- Se recomienda el uso de un sistema refrigerante para una duración óptima de operación a temperaturas altas. En este caso, se concluye que el uso de la célula Peltier permite extender el tiempo de operación y mantener la temperatura interna del sistema por debajo de los 60 °C hasta el agotamiento total de la batería, aproximadamente 19.1 veces más tiempo en comparación con el caso sin sistema refrigerante.

- Se concluye que el sistema planteado es altamente adaptable, pese a las restricciones de espacio, en lo que respecta a componentes electrónicos debido a todas las protecciones empleadas y el acondicionamiento del ambiente interno se puede intercambiar más del 70% de los componentes electrónicos por otros modelos. No obstante, se recomienda emplear componentes con una tolerancia térmica mayor a 60°C por temas de seguridad.

REFERENCIAS

- Cuerpo General de Bomberos del Perú (s.f.). *Estadísticas de Emergencia a Nivel Nacional*. Obtenido de http://www.bomberosperu.gob.pe/portal/net_estadistica.aspx
- CENEPRED (2020). *Escenario de riesgo por incendio urbano del Cercado de Lima*. Gobierno del Perú
- Briones Orellana, T. S. (2016). *Innovación en materiales resistentes al fuego para su aplicación en uniformes de bomberos* (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay).
- Cámara Peruana de la Construcción (CAPECO). (2020). *Estudio del Mercado de Edificaciones en Lima Metropolitana*. (Nro. 25).
- Segunda Compañía de Bomberos de Santiago (s.f.) *Riesgos para la salud de los bomberos*. Obtenido de <https://segundinos.cl/web/riesgo-para-la-salud-de-los-bomberos/#:~:text=Los%20bomberos%20est%C3%A1n%20en%20mayor,ri%C3%B1%C3%B3n%20de%20Hodgkin%20y%20linfoma>.
- Ministerio del Interior. (8 de diciembre del 2016). Decreto Legislativo N°1260. Por la cual fortalece el Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú como parte del Sistema Nacional de Seguridad Ciudadana y regula la Intendencia Nacional de Bomberos del Perú. Diario Oficial El Peruano 13890.
- Ministerio de Economía y Finanzas. (15 de marzo del 2018). Decreto Supremo No. 060-2018-EF. Por la cual Autorizan Crédito Suplementario en el Presupuesto del Sector Público para el Año Fiscal 2018 a favor del pliego Intendencia Nacional de Bomberos del Perú. Diario Oficial El Peruano 14539.
- Ministerio de Economía y Finanzas. (30 de junio del 2022). Decreto Supremo N° 145-2022-EF. Por la cual Autorizan Transferencia de Partidas a favor de la Intendencia Nacional de Bomberos del Perú - INBP en el Presupuesto del Sector Público para el Año Fiscal 2022. Diario Oficial El Peruano 16687.
- Defensoría del Pueblo. (3 de agosto del 2018). Nota de Prensa N°279/OCII/DP/2018. Gobierno del Perú
- Cuerpo General de Bomberos del Perú - Dirección General del Centro de Instrucción (2017). *Curso Búsqueda y Rescate en Estructuras Incendiándose - BREI*
- Academia Nacional de Bomberos de Chile (2018) *Guía de Autoinstrucción N°7 Técnicas de Búsqueda y Rescate en Incendios*
- ETH Zürich (2016) *Robotic Systems Lab: ANYmal*. Recuperado de <https://rsl.ethz.ch/robots-media/anymal.html>

Leotronics (2022) *TRACKREITAR ROBOTS DE RESCATE*. Recuperado de <https://leotronics.eu/es/robots-de-oruga-trackreitar/rescate-de-trackreitar>

Boston Dynamics (2017) *ATLAS*. Recuperado de <https://www.bostondynamics.com/atlas>

Antyterroryzm (2022) *IBIS: Robot do działań pirotechnicznych i rozpoznania*

Shark Robotics (2020) *Colossus: Multi-purpose fire fighting robot*

DOK-ING (2020) *Emergency Responses Robotic System: MVF-5*

Leotronics (2022) *TRACKREITAR FIREFIGHTING*. Recuperado de <https://leotronics.eu/es/robots-de-oruga-trackreitar/trackreitar-lucha-contra-el-fuego>

LUF (2021) LUF 300 HF - EINSATZGEBIET. Recuperado de <https://www.luf60.at/de/loeschunter-stuetzung/luf-300-hf/>

Soldier Magazine. (2008). *Allied android to brave battle for coalition casualties*. Edición Septiembre 2008, 49-51.

CENTAURO (2015) Project H2020 *CENTAURO*. Recuperado de <https://www.centauro-project.eu/>

Revista Ejército. (2015). *Sanidad militar: Un paseo por la historia*. Edición N°889, 116-117.

Relly et al. (2008). *Dual extinguishment fire suppression system using high velocity low pressure emitters*. (Patente WO2008057331A3).

Zhisheng et al. (2014). *Search and rescue robot*. (Patente CN103737573A).

Liang C. (2015). *Full terrain crawler-type multifunctional fire-fighting truck*. (Patente CN204563392U).

Unión Europea. (2011). *Restricción de sustancias peligrosas*. (RoHS).

Unión Europea. (2012). *Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos*. (WEEE).

Organización Internacional de Normalización. (2011). *Sistema de Gestión Energética*. (ISO 50001).