



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

DESARROLLO DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL PARA BÚSQUEDA POSTERIOR A UN SISMO, Y MITIGACIÓN DE INCENDIOS DE BAJA ESCALA

LUIS MIGUEL SÁNCHEZ MUYULEMA

Trabajo de Titulación modalidad: Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH como requisito parcial para la obtención del grado de:

**MAGISTER EN SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN
INDUSTRIAL**

Riobamba - Ecuador

Julio 2017

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, titulado: “Desarrollo de una plataforma robótica móvil para la búsqueda posterior a un sismo, y mitigación de incendios de baja escala”, de responsabilidad del señor Luis Miguel Sánchez Muyulema, ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Ing. Wilson Zúñiga MsC.

PRESIDENTE

Ing. Félix Vladimir Bonilla Mgt.

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Henry Ernesto Vallejo MsC.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. Fausto Freire Carrera PhD.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Riobamba julio 2017

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Luis Miguel Sánchez Muyulema, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, y que el patrimonio intelectual generado por el mismo pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

LUIS MIGUEL SÁNCHEZ MUYULEMA

No. Cédula: 180427715-8

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Luis Miguel Sánchez Muyulema, declaro que el presente proyecto de investigación, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación de Maestría.

LUIS MIGUEL SÁNCHEZ MUYULEMA

No. Cédula: 180427715-8

DEDICATORIA

A mi mamita María, que me dio su última bendición antes de irse al cielo.

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme superar sus pruebas y alcanzar mis metas. A mis padres José y Rosario, por su apoyo incondicional. A mis hermanos Fabián y Rocío porque nunca faltaron sus palabras de aliento en el momento adecuado, gracias a ellos por no dejar que olvide mis sueños.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en la persona de Alberto Arellano A. por la confianza brindada en su momento y por la amistad que no se borra con la distancia ni el tiempo.

A mi tutor, Vladimir Bonilla por el tiempo, la paciencia y los conocimientos brindados sin reserva alguna. A Henry, Fausto, Marcelo y Guillermo por su aporte académico y moral, gracias.

Miguel

GLOSARIO

EMBA-EP: Empresa Municipal Bomberos Ambato Empresa Pública

SGR: Secretaría General de Riesgo

COE: Comité de Operaciones de Emergencia

USAR: Urban Search And Rescue Robot

CMU Carnegie Mellon University

TIT: Tokio Institute of Technology

ACM: Active Cord Mechanism

CRASAR: Center for Robot-Assisted & Rescue

UVS: Utility Vehicle for Search

PWM: Pulse- Width Modulation

NFPA 1001: Standard for Fire Fighter Professional Qualifications

AFFF: Aqueous Film Forming Foam

PQS: Polvo Químico Seco

RF: Radio Frecuencia

UIT-R P.1238-8: Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de sistemas de radiocomunicaciones en interiores y redes radioeléctricas de área local en la gama de frecuencias de 300MHz a 100GHz

WIMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access

PCM: Pulse Code Modulation

FHSS: Frequency-hopping spread spectrum

PPM: Pulse Position Modulation

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	XIII
SUMMARY	XIII
CAPÍTULO I	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Situación problemática	1
1.2. Formulación del problema	2
1.3. Preguntas Directrices.....	2
1.4. Justificación de la Investigación	2
1.5. Objetivos de la Investigación.....	3
1.5.1. <i>Objetivo General</i>	3
1.5.2. <i>Objetivos Específicos</i>	3
1.6. Hipótesis.....	4
CAPÍTULO II	
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Antecedentes del problema.....	5
2.2. Bases Teóricas	7
2.2.1. <i>Robots móviles</i>	7
2.2.2. <i>Sistemas de comunicación de robots móviles</i>	16
2.2.3. <i>Sistemas de control de robots móviles</i>	18
2.2.4. <i>Métodos de navegación</i>	20
2.2.5. <i>Estructuras</i>	22
2.2.6. <i>Equipamiento</i>	23
2.3. Selección de las plataformas móviles y componentes.....	23
CAPÍTULO III	
3. METODOLOGÍA	28
3.1. Modelo en V.....	28
3.1.1. <i>Análisis de requerimientos</i>	30
3.1.2. <i>Diagrama funcional</i>	31
3.1.3. <i>Diagrama de casos de uso</i>	33
3.2. Diseño Mecatrónico del Sistema	34
3.2.1. <i>Diseño mecánico</i>	34
3.2.1.1. <i>Modelo cinemático del robot móvil</i>	34
3.2.1.2. <i>Modelo dinámico del robot móvil</i>	35
3.2.1.3. <i>Modelo cinemático del brazo</i>	40

3.2.1.4.	<i>Modelo dinámico del brazo</i>	42
3.2.1.5.	<i>Diseño del sistema de mitigación de incendios</i>	47
3.2.2.	<i>Diseño eléctrico-electrónico</i>	49
3.2.2.1.	<i>Diseño de la interfaz de control</i>	50
3.2.2.2.	<i>Diseño del sistema de transmisión del video</i>	54
3.2.2.3.	<i>Diseño del sistema de control y monitoreo</i>	56
3.2.2.4.	<i>Diseño del sistema de alimentación</i>	57
3.3.	Planificación de Pruebas	58
CAPÍTULO IV		
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
4.1.	Resultados de desplazamiento del robot en terreno irregular.	60
4.2.	Resultados de carga adicional soportada por el robot	63
4.3.	Resultados mitigación de incendios de baja escala	64
4.4.	Pruebas de temperatura soportadas por el robot	67
4.5.	Pruebas de acceso del robot a la casa de humos	68
4.6.	Funcionamiento de transmisión de video desde el robot a la interfaz de control	69
4.7.	Demostración de la hipótesis	70
	PROPUESTA	73
	CONCLUSIONES	74
	RECOMENDACIONES	76
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Características de redes alámbricas e inalámbricas.....	16
Tabla 2-2: Rendimiento de los medios de transmisión.	17
Tabla 3-2: Comparación tecnologías de comunicación inalámbrica.	17
Tabla 4-2: Comparación características modelos de Arduino.	20
Tabla 5-2: Descripción de los elementos de un sistema de tele-operación.....	22
Tabla 6-2: Selección del tipo de tracción del robot.....	24
Tabla 7-2: Selección de la forma del robot.....	24
Tabla 8-2: Selección del rango de velocidad del robot.	25
Tabla 9-2: Selección del rango de peso del robot.	25
Tabla 10-2: Selección del equipamiento del robot.....	26
Tabla 11-2: Selección de la tecnología de comunicación del robot.....	26
Tabla 12-2: Selección de la interfaz de navegación del robot.	26
Tabla 1-3: Requerimientos de diseño de la plataforma robótica móvil.	31
Tabla 2-3: Tipos de incendios según NFPA 1001.	48
Tabla 3-3: Tipos de extintores para las distintas clases de incendio según NFPA 1001.	48
Tabla 4-3: Características de la emisora y receptor utilizados para el control del robot.	52
Tabla 5-3: Coeficiente pérdida de potencia N, para cálculo de pérdida de transmisión en interiores.....	53
Tabla 6-3: Factor de pérdida de penetración en el suelo, L_f (dB), siendo n el número de pisos penetrados, para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores ($n \geq 1$).....	53
Tabla 7-3: Características técnicas de la cámara WiFi BD-DP604.	55
Tabla 8-3: Características técnicas de la cámara GoPro HERO 3.	56
Tabla 1-4: Mediciones de tiempo y cálculo de velocidad del robot.....	60
Tabla 2-4: Porcentajes de disminución de velocidad respecto a la superficie de desplazamiento.	61
Tabla 3-4: Evaluación de funcionamiento del robot para superar una rampa de 25deg con respecto al porcentaje de carga de la batería del robot.....	62
Tabla 4-4: Evaluación de funcionamiento del robot con peso extra, pruebas con 60 y 65 Kg. .	64
Tabla 5-4: Evaluación de mitigación de incendios en la casa de humos y en paila de fuego. ...	66
Tabla 6-4: Análisis de tiempos de retardo en la transmisión de video durante la mitigación de incendios en el interior de la casa de humos y en el exterior.	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2. Robot de intervención.	8
Figura 2-2. Robot Packbot.	9
Figura 3-2. Robot Marsupial BORG USAR.	10
Figura 4-2. Robot micro-VGTV.	10
Figura 5-2. Robot de búsqueda modular.	11
Figura 6-2. Robot Kohga.	11
Figura 7-2. Robots desarrollados por Inktun.	12
Figura 8-2. Robot VGTV-EXTREME.	12
Figura 9-2. Robot ASENDRO EOD.	13
Figura 10-2. Robot LUF60.	14
Figura 11-2. Robot Flamebot.	15
Figura 12-2. Robot VARAN.	15
Figura 13-2. Driver controlador de velocidad de motores DC.	18
Figura 14-2. Elementos básicos de un sistema de tele-operación.	21
Figura 1-3. Modelo en V para el robot móvil.	28
Figura 2-3. Diagrama funcional del robot para búsqueda posterior a sismos y mitigación de incendios a baja escala.	32
Figura 3-3. Diagrama de casos de uso para el robot de búsqueda y mitigación de incendios. ..	33
Figura 4-3. Robot móvil.	34
Figura 5-3. Parámetros del modelo dinámico.	35
Figura 6-3. Vistas del diseño en SolidWork de la plataforma móvil.	39
Figura 7-3. Plataforma móvil en proceso de construcción.	40
Figura 8-3. Manipulador de 4 Grados de Libertad.	40
Figura 9-3. Ubicación de las masas puntuales en el manipulador de 4 grados de libertad.	42
Figura 10-3. Cinemática de la plataforma robótica móvil en Simulink.	45
Figura 11-3. Importación del modelo CAD a Simulink.	45
Figura 12-3. Simulación del control RF integrando el modelo CAD y la cinemática.	46
Figura 13-3. Modelo CAD importado a Simulink para la simulación.	46
Figura 14-3. Trayectorias simuladas del robot móvil.	47
Figura 15-3. DCL Sistema de carga.	49
Figura 16-3. Esquema general tele-operación con interfaz directa.	51
Figura 17-3. Cámara WiFi BD-DP604.	55
Figura 18-3. Cámara GoPro HERO 3.	55
Figura 19-3. Placa PCB del sistema de control y monitoreo del robot.	56

Figura 20-3. Diagrama PCB de la placa del sistema de control y monitoreo del robot.	57
Figura 1-4. Pruebas de velocidad del robot móvil (6 metros de recorrido).	61
Figura 2-4. Robot desplazándose sobre tierra + lastre.	61
Figura 3-4. Robot desplazándose sobre tierra + vegetación.	62
Figura 4-4. Robot mientras sube la rampa.	63
Figura 5-4. Prueba de peso adicional sobre el robot con una persona de 65 Kg.	63
Figura 6-4. Prueba de peso adicional sobre el robot con un bombero de 60 Kg.	64
Figura 7-4. Prueba de mitigación de incendio de baja escala en paila de fuego.	65
Figura 8-4. Prueba de mitigación de incendio de baja escala en la casa de humos.	65
Figura 9-4. Visibilidad durante la mitigación del incendio de baja escala.	66
Figura 10-4. Escenario posterior a la mitigación del incendio de baja escala.	66
Figura 11-4. Muestras de temperatura del incendio y soportadas por el robot.	67
Figura 12-4. Imágenes del ingreso del robot a la casa de humos.	68
Figura 13-4. Imágenes tomadas por la cámara GO Pro.	69
Figura 14-4. Contraste hipótesis velocidad del robot móvil.	70
Figura 15-4. Contraste hipótesis temperatura soportada por el robot móvil.	71
Figura 16-4. Contraste hipótesis tiempo mitigación de incendio de baja escala.	72

RESUMEN

Se desarrolló una plataforma robótica móvil para búsqueda posterior a un sismo, y mitigación de incendios de baja escala. Cumple con los requerimientos sugeridos por la empresa pública EMBA-EP para ser usado en la zona 3 del Ecuador. Utilizando la metodología de modelo en V, se desarrollaron los sistemas; mecánico, eléctrico-electrónico y la interfaz de control inalámbrica para la operación del robot. En el sistema mecánico se diseñó e implementó una plataforma móvil con medidas adecuadas que permitan al robot ingresar en hogares junto a un brazo robótico para cumplir con tareas de mitigación de incendios de baja escala. En el sistema eléctrico-electrónico se diseñaron las placas electrónicas que permitirán realizar los movimientos de la plataforma y del brazo robótico. Se implementó una interfaz de control directa que controla los actuadores en tiempo real. El sistema de supervisión y monitoreo se implementó mediante dos cámaras sobre el robot que transmiten el video a monitores externos o dispositivos móviles. Se realizaron pruebas de campo en el centro de capacitación y entrenamiento de la empresa pública EMBA-EP para validar el funcionamiento de la plataforma y los resultados fueron satisfactorios, las pruebas realizadas fueron certificadas por dicha empresa. En conclusión, la plataforma robótica móvil es capaz mitigar incendios de baja escala, superar objetos mayores al 45% de su altura. El sistema de tracción le permite desplazarse en distintas superficies sin reducir de manera significativa su velocidad e incluso deslizarse a través de rampas con una inclinación entre 15deg a 30deg. Se recomienda implementar contenedores de kits de primeros auxilios resistentes, que puedan ser entregados a víctimas.

Palabras clave: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <ROBÓTICA>, < ARDUINO (SOFTWARE – HARDWARE)>, <RADIOFRECUENCIA>, <COMUNICACIÓN WIFI>, <MATLAB (SOFTWARE)>

ABSTRACT

A mobile robotic platform was developed for further earthquake search ,and mitigation of small-scale fires .It accomplishes the requirements suggested by the public enterprise EMBA-EP to be used in zone 3of Ecuador .By using the methodology of the V model, the mechanical, electric-electronic and the wireless controlling interphase for the robot operation were developed. In the mechanical system, it was designed and implemented a mobile platform with the adequate measures to allow the robot access homes together with a robotic arm in order to do fulfill tasks of mitigation of small–scale fires. In the electric-electronic system ,the electronic boards were designed which will allow to perform the movements of the platform and the robotic arm A direct controlling interphase was implemented with the actuators in real time .The supervision and monitoring system was implemented by means of two cameras on the robot which transmit the video to external monitors or mobile devices .There were performed field tests in the training center at public enterprise EMBA-EP to validate the functioning of the platform which results were satisfactory, the tests performed were certified by the enterprise .In short ,the mobile robotic platform can mitigate small-scale fires ,exceed objects 45% taller .The traction system allows it to move in different surfaces without reducing its speed significantly, it can even slide through 15deg.to 30deg .inclined ramps. It is recommended to implement resistant first-aid kit containers to be delivered to victims.

Key words: < ENGINEERING TECHNOLOGY AND SCIENCE >, < ROBOTICS >, < ARDUINO (SOFTWARE – HARDWARE)>, <RADIOFREQUENCY>, <WIFI COMMUNICATION>, <MATLAB (SOTFWARE)>

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Situación Problemática

Los desastres naturales son poco predecibles, más aún si se trata de un incendio o sismo. Si no se cuenta con una respuesta inmediata para la asistencia a las personas, el número de víctimas aumenta, una tardía reacción, provoca, además la pérdida de bienes materiales. Las tareas de búsqueda, asistencia y evacuación son limitadas por varios factores. El difícil acceso al medio, el peligro que representa para los rescatistas e incluso las condiciones climatológicas pueden demorar estas tareas.

En la mayoría de casos se deben realizar tareas de asistencia al instante mismo del desastre natural o de un incendio, lo cual es muy difícil para un equipo humano. Las altas temperaturas y las condiciones del terreno dificultan las tareas de búsqueda y muchas veces no permiten el acceso directo a los lugares del desastre que necesitan ser evacuados o atendidos con insumos, medicamentos y comunicaciones.

Generalmente, el personal de evacuación y rescate necesita transportar equipo de considerable peso para cumplir con su tarea, o a su vez es necesario levantar y remover escombros para lograr rescatar a las víctimas que se encuentran atrapadas posterior a un desastre natural. Pese a la incansable preparación de los elementos que cumplen con esta noble labor, existen situaciones en las cuales se les dificulta cumplir con su deber inmediatamente. Limitando así la supervivencia de las víctimas de un desastre natural, pues el personal es limitado y de la misma manera sus fuerzas se disminuyen con cada acción de rescate que ejecutan. Tomando en cuenta que, mientras más tiempo tarden el saldo de víctimas mortales se incrementará.

La falta de desarrollo de plataformas robóticas móviles en el Ecuador, y específicamente en la zona 3 (Cotopaxi, Chimborazo, Pastaza y Tungurahua), impiden poseer una herramienta tecnológica como un robot dedicado a la asistencia, búsqueda y/o rescate de personas en un desastre natural. Es necesario buscar el financiamiento de los organismos que cumplen estas funciones como la SGR (Secretaría de Gestión de Riesgos) o COE (Comité de Operaciones de Emergencia) cantonal y provincial para generar más investigaciones en esta área.

Los robots móviles presentan soluciones alternativas para diversos problemas cotidianos de la humanidad. Sería de gran contribución integrar este tipo de robots en las tareas de búsqueda y asistencia humana, debido a que tendría acceso a lugares peligrosos para los rescatistas. Se presentaría como un conveniente modo de salvaguardar la vida del personal de rescate, disminuir el tiempo de búsqueda y la asistencia a las personas. Y definitivamente, la posibilidad de mitigar incendios de baja escala sería un gran aporte para el cuerpo de bomberos de la ciudad de Ambato.

1.2. Formulación del Problema

¿Se puede implementar una plataforma robótica para ayuda en tareas de búsqueda posterior a un sismo y mitigar incendios de baja escala, precautelando la integridad de los grupos de rescate?

1.3. Preguntas Directrices

¿Se puede crear una plataforma robótica móvil, robot más su central de control y monitoreo, que se adapte a determinadas superficies que se puedan presentar después de un sismo en la zona 3 del Ecuador?

¿Cuáles deben ser las características del robot móvil que le permitan desplazarse en las superficies irregulares?

¿Se puede implementar un sistema robusto de transmisión de datos para el monitoreo y control de un robot móvil durante la búsqueda de humanos después de un sismo?

¿Se puede implementar un sistema de mitigación de fuego de baja escala sobre el robot móvil?

1.4. Justificación de la Investigación

El presente proyecto de investigación plantea como objetivo principal el desarrollo de una plataforma robótica móvil, que permita precautelar la integridad de los rescatistas apoyándolos en sus labores de búsqueda y asistencia. Para dotar de una alternativa tecnológica a los equipos dedicados a estas tareas inmediatamente después de un eventual sismo. La política 3.11 del objetivo 3 del Plan Nacional del Buen Vivir (2013 – 2017) reza: “Garantizar la preservación y protección integral del patrimonio cultural y natural de la ciudadanía ante las amenazas y riesgos de origen natural o antrópico”. Con la implementación del actual proyecto de investigación se pretende aportar a este objetivo, dando inicio a más investigaciones para perfeccionar el prototipo para la búsqueda de personas y la mitigación de incendios.

Mediante la implementación de este prototipo se presenta una alternativa para la búsqueda de personas y la mitigación de incendios a baja escala, prestando un nivel de seguridad al personal

dedicado a estas operaciones. De este modo, se aporta al cumplimiento de objetivo 3 del Plan Nacional del Buen Vivir (2013 – 2017), mejorando de cierto modo la calidad de vida de las poblaciones que son afectadas por sismos o incendios. Del mismo modo, al poseer una plataforma robótica móvil con la capacidad de navegación en terrenos irregulares, es posible disminuir el tiempo de búsqueda y optimizar los recursos necesarios para esta tarea. Se puede realizar una mitigación de incendios de baja escala dentro o fuera de un hogar, con menor riesgo para el equipo de rescate.

Finalmente, con la implementación de una estación de control y monitoreo robusta, se asegura que la plataforma sea totalmente remota. Y se la pueda utilizar en distintos lugares donde sea necesario su contingente, de esta manera, también se contribuirá directamente con el eje de Seguridad Ciudadana de la zona 3 del país (Cotopaxi, Chimborazo, Pastaza y Tungurahua) de la matriz de tensiones y problemas del Plan Nacional del Buen Vivir (2013 – 2017), al presentar una alternativa tecnológica potencialmente viable para la prevención y mitigación de riesgos de origen natural y antrópico. Con la reducción de tiempo de búsqueda y la disponibilidad de un brazo robótico que permita realizar los movimientos necesarios para controlar la manguera del sistema de mitigación de incendios de baja escala. Destacando, además que el desarrollo de este tipo de plataformas robóticas generará más investigaciones similares y posteriormente se las encontrará inmersas en esta y muchas más áreas, resolviendo problemas de interés.

El desarrollo de este prototipo se realiza prestando fundamental atención a los principios de la robótica. Una máquina o robot deben ser seguros para proteger la integridad de un operador. Una máquina o robot debe a más de cumplir con su tarea, ser lo suficientemente intuitiva para el operador al momento de utilizarla y para configurarla de acuerdo a la necesidad del mismo. Y por último la auto-conservación, una máquina o robot debe ser construida de tal manera que se reduzca su propia degradación, siempre y cuando esto no afecte al operador como tal.

1.5. Objetivos de la Investigación

1.5.1. Objetivo General

Desarrollar una plataforma robótica móvil con accesorios necesarios para realizar una búsqueda de personas posterior a ocurrido un sismo, y mitigación de incendios de baja escala.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Analizar y seleccionar los diferentes sistemas de tracción que permitan la movilidad del robot en áreas con escombros.

- Diseñar e implementar una plataforma móvil que permita el acceso a las zonas afectadas por sismos.
- Diseñar e implementar un sistema de mitigación de incendios de baja escala.
- Implementar un sistema de transmisión de datos para el monitoreo y control del robot móvil.
- Validar el funcionamiento de los sistemas de transmisión de datos, control y de locomoción de la plataforma robótica móvil.

1.6. Hipótesis

Es posible implementar un robot móvil que disponga de un sistema de tracción para desplazarse en superficies irregulares, que cumpla con tareas de búsqueda de personas posterior a un sismo y mitigar incendios de baja escala.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

En distintos países se han desarrollado varios trabajos de investigación para el perfeccionamiento de plataformas robóticas con la finalidad de asistir a los humanos en tareas que conllevan una ardua labor. Una de estas tareas es la búsqueda de personas posterior a un sismo, o la mitigación de un incendio de baja escala para proceder a un rescate de víctimas. Se han construido diversos tipos de robots, entre los que destacan los autónomos y tele-operados, los cuales pueden desplazarse en terrenos irregulares y con obstáculos, pero no disponen de una herramienta para mitigar fuego. Mientras tanto existen otros robots que son capaces de mitigar fuego, pero son demasiado grandes o pesados como para realizar una búsqueda de víctimas en interiores de edificaciones.

Liedke, J., et al. (2013) sugieren que, el uso de robots modulares USAR (Urban Search And Rescue Robot) presentan ventajas como: versatilidad, robustez y relativo bajo costo. La mayoría de los robots desarrollados han sido pensados para trabajar en entornos urbanos, tal es así que, Liljebäck, P., et al. (2012) planteó como solución viable en aplicaciones USAR a robots tipo serpiente, los mismos que tienen la capacidad de reptar y trepar cierta altura como si fuera una serpiente real. Mientras se desarrollaban es tipo de robots modulares, paralelamente en el CMU (Carnegie Mellon University) se estudiaba la posibilidad de construir robots modulares utilizando la morfología y movimientos similares a la trompa de un elefante. Murphy, R., et al. (2016) desarrollaron un robot basado en este concepto, lo montaron sobre una base móvil y con la ayuda de una cámara posicionada como efector final consiguieron inspeccionar grietas y tuberías sin mayor dificultad. Wright, C., et al. (2012) también plantearon que los robots tipo serpiente son una excelente propuesta para aplicaciones USAR, porque su cuerpo puede adaptarse al entorno según sea la aplicación.

Japón, uno de los países más abatidos por catástrofes naturales ha puesto interés en los desarrollos de robots para aplicaciones USAR. A partir de la década de los 70, Hirose, S., & Fukushima, E. F., se encuentran elaborando múltiples diseños de robots modulares, con la colaboración de un grupo de investigadores del TIT (Tokio Institute of Technology), Wright, C., et al. (2012).

También se empezó a dar interés a los robots con sistema de locomoción tipo oruga y con ruedas, entre los robots más representativos creados están: Souryu, Genbu, Kohga, Gunryu y Helios VIII.

Kwon, Y., et al. (2012) continúan con trabajos basados en modelos de robots modulares tipo serpiente ACM (Active Cord Mechanism). Los prototipos ACM-R3 y R4 se pueden deslizar fácilmente entre los obstáculos y sobre ellos, gracias a que su cuerpo se encuentra cubierto completamente con ruedas pasivas cuyo diámetro supera la altura de los eslabones del robot.

Dorigo, M., et al (2013), plantean que el uso de robots modulares similares conectados en serie es directamente beneficioso para superar obstáculos. También mediante el desarrollo de JL – I en el Instituto de Robótica de la Universidad de Beihang, se demuestra la posibilidad de subir escaleras y retomar su posición inicial en caso de volcarse.

Con la finalidad de mejorar la eficiencia de los robots modulares, en el Instituto de Automática de Shenyang en China, se desarrolló Amoeba – I. Este robot modular utiliza para su desplazamiento orugas independientes. Sus creadores aseguran que la mayor ventaja de Amoeba – I es la capacidad de configurarse de nueve maneras diferentes, lo cual, le permite acceder a distintos entornos acoplándose según sea la necesidad Chen, I., (2015).

Debido a que la mayoría de robots se han creado para ambientes urbanos de países desarrollados, para operaciones USAR, es común la utilización de robots tipo serpiente: ápodos y ápodos-propulsados. La diferencia entre los dos es su método de locomoción, mientras los ápodos utilizan movimientos similares a una serpiente real, los ápodos-propulsados utilizan ruedas u orugas para poder desplazarse. Mientras los primeros son más parecidos a sus homólogos biológicos, los segundos poseen mejor movilidad y agarre para poder trepar obstáculos. Uno de los prototipos de robot ápodo – propulsado más avanzado es Omnithread desarrollado en la universidad de Michigan. Li, Z., et al (2013) aseguran que su diseño se puede desplazar incluso si el robot vuelca, gracias a las orugas que posee en todas las caras de los cinco segmentos del robot modular.

Yang, K., et al (2014) afirman que un robot apodo propulsado, posee la capacidad de trepar, de acuerdo a los desarrollos que mantienen en robots para aplicaciones USAR. Aunque en contraste los robots ápodos y ápodos propulsados, no tienen la flexibilidad y la robustez para enfrentarse a entornos rurales y con escombros de gran envergadura para su tamaño. Eventualmente un sismo presentaría obstáculos que no podrían ser superados por robots de esta morfología, por lo que es necesario un estudio de alternativas de locomoción más adecuadas para su desplazamiento.

Surge aquí la necesidad de diseñar una plataforma móvil con las prestaciones necesarias para enfrentarse a los tipos de terreno de la zona 3 (Cotopaxi, Chimborazo, Pastaza y Tungurahua),

para la que se delimitó la investigación. Permitiendo la disminución de riesgo para el personal de rescate. Y paralelamente promover nuevas investigaciones ya sea en esta área o en otras en las cuales un robot móvil sea de gran utilidad.

A partir del análisis del estudio del arte, se presenta como propuesta más adecuada la utilización de orugas para el sistema de locomoción de la plataforma a desarrollarse, un robot tipo serpiente no tendría la capacidad de deslizar en un terreno con obstáculos grandes y un robot con ruedas tiene varias limitaciones al momento de evadir obstáculos con un determinado tamaño o ángulo de inclinación. Es imperante además el uso de un robot tipo oruga con amortiguadores especiales que le permita sortear obstáculos tanto en zonas urbanas como rurales, por la geografía de la zona en la que se desempeñará la plataforma. Como característica adicional, para realizar la búsqueda se debe poseer un sistema de transmisión de video con la calidad adecuada para cumplir con dicha operación. Finalmente, como complemento a la plataforma se prevé que disponga de un mecanismo para la mitigación de fuego a baja escala, en caso de ser necesaria esta actividad, dotando al equipo de rescate una herramienta que reduzca el riesgo de una posible explosión de un cilindro de gas, por ejemplo.

2.2. Bases Teóricas

Para el presente proyecto se ejecutó un análisis técnico y metodológico de proyectos desarrollados en otros países, se realizó una introducción a los robots de búsqueda, rescate y bomberos, por ser los más similares. Se efectuó un análisis de las ventajas de los robots existentes y sus principales funciones, con el fin de seleccionar la plataforma más adecuada para la que se desarrollará. Se revisará brevemente sus sistemas de control, comunicación, estructura y equipamiento. Finalmente se seleccionó estos elementos de acuerdo a los requerimientos planteados en el proyecto de investigación, como tipo de comunicación, tanto para el control de movimientos, como para la transmisión de video y fundamentalmente su tipo de estructura.

2.2.1. Robots móviles

Es indiscutible que la robótica se encuentra en apogeo en diversas áreas, sobre todo realizando actividades en las cuales un ser humano se encuentre en peligro. Indistintamente de la finalidad que tenga el robot, se busca la seguridad para la humanidad. Así se da la necesidad de automatizar procesos o actividades que cumplan con este objetivo. Existen diversos robots que ayudan de manera importante al desarrollo industrial con mayor seguridad. Los robots pueden ser autónomos o controlados remotamente por un operador. Acorde a sus capacidades y su finalidad los robots se los puede separar en dos grandes grupos: fijos y móviles. Según Huitzil, I., et al. (2014) la

robótica móvil consiste en el estudio de sistemas capaces de movimiento y acción, que se crean por la necesidad de automatizar procesos no estacionarios.

A diferencia de los robots fijos, que se encuentran estacionarios cumpliendo su tarea, los robots móviles constan de un sistema de locomoción. Mediante este sistema los robots pueden aportar en tareas de búsqueda, exploración, mitigación de incendios, supervisión de líneas de alta tensión y cualquier otra acción que implique alto riesgo para un humano.

Tanto la estructura, el equipamiento y el sistema de locomoción se debe adaptar para cada tarea exclusiva y al entorno en el cuál se tiene que desenvolver. Por ejemplo, si el entorno es un terreno boscoso habrá que decidir si el robot móvil se podrá desplazar libremente con llantas o con orugas, analizando sus ventajas y desventajas a la hora de cumplir con su tarea. Del mismo modo el sistema de comunicación influirá mucho en el alcance o área que cubrirá el robot en una búsqueda. En cuanto a los sensores que posea el robot interviene el factor primordial que es, la magnitud física a medir y la capacidad de procesamiento de dicha información. Sin olvidar el rango de funcionamiento del sensor y el nivel de inmunidad a interferencias provocadas por el medio en el que se encuentra.

Un ejemplo de este tipo de plataformas robóticas es un robot de intervención, que generalmente es un vehículo controlado remotamente, con o sin cable. Del mismo modo se encuentran modelos tele-operados, los mismos que incorporan una o varias cámaras para su posicionamiento o localización. Los elementos que puede llevar sobre si dependen de la actividad o tarea asignada, por ejemplo: pinzas, sierras, sensores infrarrojos para distancias y demás elementos que le permitan cumplir su misión. En la figura 1-2 se puede observar uno de los robots de intervención que utiliza el ejército estadounidense para la desactivación o manejo de material explosivo.



Figura 1-2. Robot de intervención.

Fuente: (Barrientos, 2002).

La finalidad de estos proyectos de investigación se enmarca en la búsqueda de prototipos ideales para desenvolverse en entornos de alta peligrosidad para un ser humano. Se revisará las principales características de algunos proyectos de investigación académicos e industriales en la actualidad.

En el CRASAR de la Universidad del Sur de Florida, se ha desarrollado la plataforma robótica Packbot con la finalidad de ayudar a los grupos de rescate. Murphy, R., et al (2016) desarrollaron este robot para explorar en lugares que son de difícil acceso y lograr ubicar a las víctimas de algún incidente. El robot ha sido utilizado en eventos de gran importancia, como principal objetivo tuvo la tarea de búsqueda y rescate en el atentado del 11 de septiembre en el World Trade Center. Como se puede observar en la figura 2-2 (a), este robot es muy compacto, lo cual le permite acceder fácilmente entre escombros. En la figura 2-2 (b), se muestra el robot con sus brazos auxiliares extendidos, los que le ayuda para superar escombros de una altura considerable o a su vez le dan la posibilidad de ascender escaleras en el caso de ser necesario.



Figura 2-2. Robot Packbot.

Fuente: (Bermudez, G., Novoa, K. S., & Infante, W., 2004).

El robot Packbot fue creado por iRobot, uno de los grupos de investigación que reciben financiamiento del gobierno estadounidense, a través de la alianza entre el Departamento de Defensa de los Estados Unidos con distintas universidades para el desarrollo de este tipo de robots. Packbot está dotado de sensores IR para la detección de personas mediante su calor y dispone de cámaras especiales que permiten movilizarse en entornos estrechos y oscuros. Su sistema de tracción está basado en dos orugas con motores diferenciales para poder sortear obstáculos relativamente mayores a su altura. Niemeyer, G., et al. (2016) sostiene que iRobot construyó la estructura de Packbot en aluminio pensando en la rapidez que debe tener un robot de búsqueda para su fácil movilidad.

Otro proyecto desarrollo en la Universidad del Sur de Florida, son los robots marsupiales, cuya principal característica es la facilidad que tiene para moverse en zonas con muchos escombros. Este sistema marsupial consiste en un robot central o también llamado “madre” y varios robots

de menores dimensiones que son liberados por el primero. Drenner, A., et al (2013) sostiene que los robots pequeños, no superan las dimensiones de una caja de zapatos y se encargan de captar y transmitir la información de las zonas exploradas inaccesibles para los rescatistas.

Estos robots son de vital importancia para obtener información de las víctimas para posteriormente proceder a su rescate sin tener que poner en peligro a los rescatistas y del mismo modo optimizar recursos y reducir el tiempo de búsqueda. En la figura 3-2 se puede observar un ejemplo de robot marsupial, en este caso el robot “madre” tiene un sistema de tracción basado en ruedas y es de mayor tamaño para superar obstáculos grandes.



Figura 3-2. Robot Marsupial BORG USAR.
Fuente: (Murphy, R. R., 2000).

Además, tiene la capacidad de llevar sobre sí mismo un robot de mucho menor tamaño que será el encargado de explorar en zonas menos accesibles. El mini-robot explorador utiliza orugas similares a Packbot para su tracción y dispone de cámaras para la transmisión de video hacia el robot madre, de esta manera se puede obtener información de las víctimas. Los micro-robots también suelen ser utilizados para transmisión de video desde el interior de cañerías en el caso de que este sea el único acceso posible para el rescate de una víctima. En la figura 4-2 se puede ver el robot micro-VGTV, que a diferencia de otros robots tipo marsupial tiene un cable para la transmisión de datos que nunca se desconecta de él.



Figura 4-2. Robot micro-VGTV.
Fuente: (Bermudez, G., Novoa, K. S., & Infante, W., 2004).

Permanece enviando información al robot “madre” por este medio, como si fuera un cordón umbilical. Este método se lo utiliza para garantizar la transmisión. En la Universidad de Kobe en Japón se desarrollan robots de exploración denominados UVS. Son pequeños robots modulares, su principal ventaja es que se pueden acoplar para formar un robot de mayor tamaño, como se puede observar en la figura 5-2. El largo del robot o el número de módulos conectados entre sí dependerán de los obstáculos que se desee superar.



Figura 5-2. Robot de búsqueda modular.
Fuente: (Bermudez, G., Novoa, K. S., & Infante, W., 2004).

Este robot es utilizado para la búsqueda posterior a desastres sísmicos, como terremotos por su ventaja de adaptabilidad en entornos hostiles, mediante su sistema de tracción basado en orugas. En la Universidad de Tokio se desarrolla el robot “Kohga”, como se puede observar en la figura 6-2, es similar a los UVS en su sistema de tracción, pero con diferente estructura.



Figura 6-2. Robot Kohga.
Fuente: (Bermudez, G., Novoa, K. S., & Infante, W., 2004).

Cada grupo de investigación desarrolla estructuras distintas para acoplarse al entorno donde se realizará la búsqueda. Otro grupo que realiza investigación sobre robots de búsqueda y rescate en la universidad del Sur de Florida es Inuktun, que a diferencia de los proyectos antes mencionados posee la valiosa cualidad de poder realizar búsquedas urbanas en ambientes mojados o inundados.

Lo que les da una ventaja notable sobre sus similares, presentando una herramienta para realizar rescate en este tipo de ambientes, que como es indiscutible otros robots no lograrían pues su funcionamiento sería afectado por el contacto con el agua. En la figura 7-2 se pueden observar ejemplos de los robots desarrollados por este grupo de investigación.



Figura 7-2. Robots desarrollados por Inktun.
Fuente: (Casper, J., Micire, M., & Li Gang, R., 2004).

Estos robots poseen orugas como sistema de tracción, que a su vez se pueden replegar para convertirse en vehículos sumergibles. Las cámaras y demás dispositivos se encuentran herméticamente sellados para que no sufran averías. Poseen además un sistema de iluminación que les permite navegar en aguas turbias.

Si se considera ventajoso trabajar en ambientes húmedos o inundados más aún es poder realizar tareas de inspección a una profundidad de 30 metros bajo el agua. Como lo puede realizar el robot VGTV-XTREME, figura 8-2.



Figura 8-2. Robot VGTV-XTREME.
Fuente: (Casper, J., Micire, M., and Gang, R., 2004).

Este robot puede realizar búsquedas en canalizaciones, instalaciones subterráneas, pantanos, etc. Su sistema de locomoción le permite realizar inspecciones en espacios muy reducidos, como en los conductos de calefacción, por lo cual, ha sido utilizado hasta en situaciones de ayuda a rehenes.

Su locomoción se basa en un sistema oruga en forma de triángulo, que le permite superar obstáculos con gran versatilidad. Su pequeño tamaño le permite moverse con ligereza, alcanzando velocidades de hasta 4,5 m/min. Posee una cámara a color y opcional se le puede añadir otra B/N que le permite realizar búsquedas y localización de víctimas. Debido a que en determinados casos debe ingresar a lugares con fuego de por medio, está fabricado para que pueda soportar hasta 50°C sin que su funcionamiento sea afectado.

Los robots dedicados a la búsqueda son de vital importancia, para reducir el porcentaje de mortalidad en determinadas situaciones, pero también es muy importante que los robots de este tipo puedan automatizar otro tipo de tareas peligrosas para los humanos. Bajo este concepto se concibe a ASENDRO EOD, un robot que, a más de realizar operaciones de búsqueda o reconocimiento, permite la desactivación de explosivos. Mientras el robot cumple con su tarea el operador se mantiene a una distancia prudente en caso de ocurrir una catástrofe.

Como se puede observar en la figura 9-2, el robot ASENDRO EOD posee un brazo robótico de 5 grados de libertad, el cual puede ser sincronizado con el brazo del operador o a su vez con la cabeza del mismo. El sistema de visión es muy importante para poder determinar las distancias a las cuales se encuentra el dispositivo explosivo, por lo cual, este robot tiene un sistema tridimensional. Un casco incorporado con unas gafas especiales para el operador permite realizar dicha observación.



Figura 9-2. Robot ASENDRO EOD.

Fuente: (Argudo, G. S., & Arpi, A. D., 2012).

Su sistema de locomoción basado en orugas le permite desplazarse sobre superficies rígidas y blandas, además una característica importante de este robot es que tiene la capacidad de trepar gradas o rampas con una inclinación de hasta 40°. Con la ayuda de sus brazos auxiliares con orugas puede superar obstáculos de 15 a 20 cm de altura. El alcance de su control remoto también lo hace interesante, porque puede alcanzar un radio de acción de hasta 2 Km. Como en este caso

particular, si no se puede desactivar el explosivo inmediatamente se debe realizar una evacuación del objeto, este robot está dotado de motores que le permiten alcanzar una velocidad de 10 Km/h. Otra actividad peligrosa para la humanidad es apagar los incendios, más aún si estos están en lugares de poco acceso como: galpones industriales, fábricas con materiales inflamables, instalaciones subterráneas, entre otros. En estos casos para los bomberos el ingreso para la mitigación del fuego es casi imposible, y en el intento de mitigación a través de mangueras tradicionales es un desperdicio de recursos. En el afán de encontrar una solución para este problema se creó LUF 60, como se puede observar en la figura 10-2. Este robot posee grandes dimensiones con un motor a diésel que permite movilizar un tanque de agua para la mitigación de incendios.



Figura 10-2. Robot LUF60.
Fuente: (Argudo, G. S., & Arpi, A. D., 2012).

Sus dimensiones son muy similares a las de un automóvil, con la diferencia que su altura llega a los 2 metros, por el cañón de agua que posee. La presión del chorro de agua está entre 15 y 25 bares, y es soportada por su gran peso (2000 Kg.), haciéndolo uno de los robots más grandes construidos para este tipo de tareas. Sin embargo, la construcción de un robot con estas características sería muy costoso, por lo cual, se pretende seleccionar las mejores características de estos robots para acoplarse al entorno de funcionamiento.

Un prototipo creado en Colombia para búsqueda en entornos urbanos es el robot Flamebot, su desplazamiento se realiza a través de dos motores en configuración diferencial. La estructura de este robot está compuesta por aluminio de 2cm de espesor y un recubrimiento de acero inoxidable para mayor protección de su circuito de control, porque la conducción de calor puede afectar el funcionamiento de los semiconductores. También se pretendía proteger sus llantas, para que no se produjera una explosión de las mismas por efecto del calor. Los sensores de emisión IR y UV que se implantó en el robot fueron protegidos por aluminio de mayor espesor en una cúpula que se puede distinguir en la figura 11-2.



Figura 11-2. Robot Flamebot.
Fuente: (Bermudez, G., & Sierra, P., 2006).

Pese a todas las protecciones, la temperatura interna no supere los límites nominales de funcionamiento de los semiconductores. Se tenía un mínimo porcentaje de error en la transmisión de datos por efectos del calor. Su pequeño tamaño y reducido peso le permitió desplazarse hasta una velocidad máxima de 12,5 cm/s sin dificultad. Aunque le fue difícil sortear obstáculos de un tamaño mayor al radio de sus ruedas, debido a la morfología de su estructura. El sistema electrónico de este robot se diseñó para que sea fácilmente escalable en cuanto a sensorica se refiere. Gracias a que su sistema posee 4 sockets PCI y la parte de sensores es mediante multiplexación, el incremento de sensores es muy fácil. Los creadores de Flamebot lo desarrollaron pensando más en el sistema sensorial y la protección de los circuitos tanto de control como de transmisión y dejó de lado la importancia de superar obstáculos.

El desafío de superar obstáculos y la capacidad de levantar objetos de determinado peso fue estudiada y superada de mejor manera por los creadores de VARAN, figura 12-2.



Figura 12-2. Robot VARAN.
Fuente: (Argudo, G. S., & Arpi, A. D., 2012).

Distinto a Flamebot, este robot es mucho más pesado y su estructura de hierro es más resistente. Su sistema de locomoción se basa en orugas para realizar un mejor desempeño superando obstáculos. Posee además un brazo mecánico que le permite levantar objetos de hasta 50kg de peso. El control de VARAN se lo puede realizar mediante una conexión cableada (hasta 100 metros) y a través de radio frecuencia con un alcance de hasta 1000 metros. Otras características importantes de este robot es que el brazo que dispone, posee 6 grados de libertad y puede superar rampas con una inclinación de 30° en la dirección de la marcha, es decir, de subida ya sea de

frente o de retro. Este robot no posee ningún dispositivo sensorico para su movimiento o para detectar efecto calórico.

Se puede notar que de acuerdo al ambiente de desempeño o a su vez la aplicación final para la que se crea un robot móvil, varía su sistema de comunicación, su sistema de locomoción, su sistema de control, su sistema sensorico, su morfología, etc. A continuación, se determinará las características más relevantes que debe poseer el robot objeto de esta investigación y posterior implementación.

2.2.2. Sistemas de comunicación de robots móviles

El sistema de comunicación de un robot móvil se complementa con el método de control, le permite recibir comandos de movimiento o tareas que requiere el operador. También se puede enviar información de localización del robot, ya sea el video de cámaras montadas sobre el robot o señales de sensores en la estructura del mismo. Para que el operador tenga un buen manejo en el entorno de funcionamiento del robot móvil.

Se debe establecer el medio físico por el cual se va a realizar la transmisión de datos, que se divide en dos grandes grupos: alámbrico e inalámbrico. Dependerá del entorno de trabajo del robot para dicha selección, muchas veces el uso de cable resulta ser de beneficio para no tener perdida de datos, pero no se puede usar en entornos plagados de escombros o de difícil acceso como lo sería una ciudad después de un sismo. En la tabla 1-2 se puede observar la comparación de alcance y ancho de banda de algunas redes alámbricas e inalámbricas más utilizadas a nivel de la capa de aplicación.

Tabla 1-2: Características de redes alámbricas e inalámbricas.

	Ejemplo	Alcance	Ancho de banda
Redes alámbricas	USB	1 m	12 – 480 Mbps
	Ethernet	1 Km	10 – 1000 Mbps
	ATM	10 Km	1 – 150 Mbps
Redes inalámbricas	Bluetooth	10 m	0,5 – 600 Mbps
	WiFi	100 m	2 – 54 Mbps
	ZigBee	100 m	20 – 250 Kbps
	WiMAX	10 Km	1,5 – 20 Mbps

Fuente: Forouzan, B. A. B. A. (2007). Transmisión de datos y redes de comunicaciones. McGraw-Hill.

Por la gran cantidad de obstáculos a sortear y la trayectoria misma que deberá tomar un robot de búsqueda, es muy probable que el cable sufra deterioros de una u otra naturaleza. Con más razón

si se utiliza en entornos donde exista fuego ya que la protección del cable se dañaría inmediatamente por el calor, provocando un cortocircuito. El rango de alcance y el ancho de banda son importantes para la discriminación de que tecnología o el medio de comunicación utilizar, con estos datos se puede saber a qué distancia puede estar el operador del robot móvil para permanecer en una zona segura y que tipo de datos se puede transmitir. Del mismo modo son importantes para la elección del sistema de comunicación los parámetros como: el coste, velocidad, atenuación, la susceptibilidad a la interferencia electromagnética y la seguridad. En la tabla 2-2 se puede observar la comparación de algunos medios con respecto a estos parámetros.

Tabla 2-2: Rendimiento de los medios de transmisión.

Medio	Coste	Velocidad	Atenuación	EMI	Seguridad
UTP	Bajo	1 – 100 Mbps	Alto	Alto	Bajo
STP	Moderado	1 – 150 Mbps	Alto	Moderado	Bajo
Coaxial	Moderado	1 Mbps – 1 Gbps	Moderado	Moderado	Bajo
Fibra óptica	Alto	10 Mbps – 1 Gbps	Bajo	Bajo	Alto
Radio	Moderado	1 – 10 Mbps	Baja – Alta	Alto	Bajo
Microondas	Alto	1 Mbps – 10 Gbps	Variable	Alto	Moderado
Satélite	Alto	1 Mbps – 10 Gbps	Variable	Alto	Moderado

Fuente: Fuente: Forouzan, B. A. B. A. (2007). Transmisión de datos y redes de comunicaciones. McGraw-Hill.

Para la aplicación de este proyecto es más adecuado un medio inalámbrico, para evitar problemas tanto con los escombros como con el posible fuego a mitigar. En la tabla 3-2, se puede observar una comparación de tecnologías que se pueden elegir.

Tabla 3-2: Comparación tecnologías de comunicación inalámbrica.

Parámetro	ZigBee 802.15.4	Bluetooth 802.15.1	WiFi 802.11
Consumo de corriente (mA)	30	65 – 170	350
Capacidad de red (nodos)	65000	30	7
Velocidad de transmisión RF (Kbps)	250	1000 – 3000	54000
Potencia de transmisión (mW)	1 – 2	1 – 100	40 – 200
Frecuencia de radio (GHz)	0,868; 0,915; 2,4	2,4	2,4
Rango de trabajo (metros)	1 – 100	1 – 100	30 – 100

Fuente: Pérez Roque, Felipe, Valdés Zaldívar, Enrique, & Arias de Fuentes, Olimpia. (2013). Sistema de Adquisición de Datos con comunicación inalámbrica. Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones, 34(3), 63-73.

Se puede considerar también el uso de controles de aeromodelismo por su versatilidad para emparejarse con un solo receptor a la vez. Descartando la posibilidad que se pueda controlar el robot con un control de frecuencia similar.

2.2.3. *Sistemas de control de robots móviles*

El sistema de control de un robot móvil hace referencia a dos fracciones importantes inmersas en el mismo, el sistema electrónico: que refiere a toda tarjeta electrónica diseñada para controlar el robot ya sea mediante cable o radio frecuencia, tanto emisión como recepción; y a la parte de algoritmos de control: que puede realizarse en un microcontrolador de manera programada o de manera autónoma según sea el caso. Se revisará las ventajas y desventajas de los principales tipos de control.

El sistema electrónico se compone de tres elementos complementarios, la electrónica de control, la electrónica de potencia y la electrónica de instrumentación. En determinados casos no es necesario que se encuentren los tres, depende de la aplicación del robot. Proyectos como Flamebot dan importancia a la electrónica de instrumentación, conformada por los distintos sensores para detectar calor y posicionamiento del robot. Disponer de esta información ayuda al operador del robot a manejarlo de manera eficiente, pero el procesamiento de dicha información también conlleva un tiempo mayor de respuesta y el uso de un microcontrolador de mejores características y mayor costo. En la electrónica de instrumentación además se debe considerar los filtros ya sean análogos o digitales de acuerdo al tipo de sensores que se utilice.

En otros casos como el robot VARAN se pone más énfasis en la electrónica de potencia, para controlar los motores tanto de desplazamiento como los del brazo robótico. La finalidad de este prototipo es levantar objetos con un peso de hasta 50 Kg, para esto utiliza motores con un torque elevado que consumen alrededor de 15 A. Es necesario una tarjeta electrónica que sirva de interfaz entre la electrónica de control y los actuadores, como en este caso los motores de alto consumo, para no tener averías en el robot por corrientes de retorno.



Figura 13-2. Driver controlador de velocidad de motores DC.

Fuente: (Argudo, G. S., & Arpi, A. D., 2012).

La interfaz de potencia puede ser creada mediante un arreglo de relés o transistores de potencia en el caso de utilizar las salidas de un microcontrolador para controlar los movimientos del robot, también se puede utilizar drivers comerciales en el caso de utilizar un control RF. La ventaja de

utilizar estos drivers es que se conectan directamente al receptor RF y su funcionamiento es con la señal PWM que entrega, de esta manera se tiene el control de sentido de giro y de velocidad de los motores de robot. En la figura 13-2 se puede observar un circuito driver utilizado comúnmente, otra ventaja de estos drivers es que se puede separar físicamente las tierras del circuito de control y de la alimentación de los actuadores, si existe algún cortocircuito o mal funcionamiento en la etapa de potencia no afectará a la placa de control. El buen funcionamiento de estos drivers depende de la calibración previa tanto de control de aeromodelismo como de la recepción de la señal PWM.

En cuanto a la electrónica de control, se encarga de recibir las instrucciones del operador, procesarlas y enviar inmediatamente la señal a los actuadores para cumplir con la tarea. En esta etapa se definen los requerimientos del prototipo como: velocidad de respuesta, fiabilidad en la recepción de datos, número de entradas y salidas. Información que nos permite la selección del microcontrolador a utilizar, que también dependerá de la tecnología de comunicación. Se busca un microcontrolador que se acople según sea el caso a comunicación Bluetooth, WiFi o RF. Es importante que el diseño de placas electrónicas sea de forma modular, para poder remplazarlas de manera inmediata en caso de existir una avería. Del mismo modo el acceso al microcontrolador en la etapa de control debe ser fácil para cambiar la programación en caso de necesitarlo.

Para la selección del microcontrolador, se recomienda revisar la tabla 4-2, en la cual se puede observar una comparativa de las características de mayor importancia en modelos de Arduino. Cabe indicar que por facilidad de conexión y comunicación con varios dispositivos de tecnología inalámbrica los Arduino son los más utilizados para proyectos de robótica. Con la ayuda de Shields se puede conectar directamente módulos Bluetooth, Xbee, WiFi. También algunos modelos pueden leer señales analógicas provenientes de controles RF y de manera similar escribir en sus salidas señales PWM que pueden servir para el control de giro y velocidad de los motores del robot.

El consumo de cada una de las tarjetas electrónicas también se debe tomar en cuenta para la selección de la batería, se plantea que el robot sea autónomo por al menos una hora. Es recomendable utilizar fuentes de alimentación independientes para la etapa de control y la etapa de potencia, del mismo modo para la alimentación de cámaras que ayudarán a visualizar el recorrido del robot. Pero se debe considerar también que es un inconveniente no disponer de un sistema de carga para todas las baterías al mismo tiempo, en lo posible se debe considerar tener un solo conector de carga para todo el robot. La mayoría de prototipos existentes utilizan baterías LiPo para alcanzar un tiempo mayor de autonomía en el robot, pero son muy costosas. Las baterías de gel son económicas pero el tiempo de carga está alrededor de 4 a 5 horas dependiendo del

amperaje que sea ésta. Las baterías de ácido no son muy utilizadas en proyectos robóticos por su peso, pero se podría considerar su uso para el presente proyecto por la facilidad de ser recargada en cualquier vehículo. Como este robot va a estar ligado a un equipo de rescate como los bomberos o cruz roja, se da por hecho que se cuenta con vehículos para realizar la carga de la batería en caso de ser necesario.

Tabla 4-2: Comparación características modelos de Arduino.

Prestaciones	Arduino UNO	LiliPad Arduino	Arduino Mega 2560	Arduino ADK	Arduino PRO	Arduino Nano
Microcontroller	Atmega328V	Atmega168V Atmega328V	Atmega256	Atmega256	Atmega328V	Atmega168 Atmega328
Operating Voltage	5 V	2,7 – 5,5 V	5 V	5 V	5 V	5 V
Input Voltage (recommended)	7 – 12 V	2,7 – 5,5 V	7 – 12 V	7 – 12 V	7 – 12 V	7 – 12 V
Input Voltage (limits)	6 – 20 V	6 – 20 V	6 – 20 V	6 – 20 V	6 – 20 V	6 – 20 V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)	14 (of which 6 provide PWM output)	54 (of which 15 provide PWM output)	54 (of which 15 provide PWM output)	14 (of which 6 provide PWM output)	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6	6	16	16	6	8
DC Current per I/O Pin	40 mA	40 mA	40 mA	40 mA	40 mA	40 mA
DC Current for 3.3 V Pin	50 mA	50 mA	50 mA	50 mA	50 mA	50 mA
Flash Memory	32 Kb (Atmega328) of which 0,5 Kb used by bootloader	16 Kb (of which 2 Kb used by bootloader)	256 Kb (of which 8 Kb used by bootloader)	256 Kb (of which 8 Kb used by bootloader)	32 Kb (Atmega328) of which 0,5 Kb used by bootloader	16 Kb (Atmega168) Or 32 Kb (Atmega328) of which 2 Kb used by bootloader
SRAM	2 Kb	1 Kb	8 Kb	8 Kb	2 Kb	1 Kb (Atmega168) or 2 Kb (Atmega328)
EEPROM	1 Kb	512 bytes	4 Kb	\$ Kb	1 Kb	512 bytes (Atmega168) or 1 Kb (Atmega328)
Clock Speed	16 MHz	8 MHz	16 MHz	16 MHz	16 MHz	16 MHz

Fuente: del Río, C. R., Estévez, A. M., & Bruzón, E. R. Capítulo 2 Hacia el Laboratorio Virtual Definitivo. TICAI, 15.

2.2.4. Métodos de navegación

Los métodos utilizados para la navegación de un robot móvil se dividen en tres grupos: teleoperación, métodos de navegación basados en sensores y métodos de navegación basados en

mapas, siendo los dos últimos métodos para la navegación de robots autónomos. La utilización de recursos para los métodos de navegación por sensores o por mapas es mucho mayor que en tele-operación, demanda un microcontrolador robusto para que realice cálculos al instante y su tiempo de respuesta no sea grande. Adicional a esto se requiere un algoritmo de control que minimice el error tanto de la ubicación del robot como en la posición del actuador complementario (brazo robótico). En cuanto a la tele-operación, Argudo, G., & Arpi, A. (2012) sostienen que permite al usuario recibir información desde el robot para generar ordenes que puedan ser ejecutadas por éste.

Se denota de esta manera que los métodos autónomos son eficientes pero el tiempo de procesamiento de la información puede provocar retardos en la comunicación. Mientras que la tele-operación disminuye de manera notable este efecto. Por esta razón se la aplica en diversas aplicaciones como en la construcción, cirugía, exploración en campos militares e incluso en la industria nuclear. La tele-operación de un robot se la denomina “tele-robótica”, ya que permite a un operador la monitorización a distancia de un robot en entornos peligrosos para el ser humano. Tomando en cuenta que la intervención del operador puede ser desde enviar comando para que el robot se mueva en determinada dirección hasta la reprogramación del mismo mediante entornos virtuales. En la figura 14-2 se puede ver los cinco elementos básicos que componen un sistema de tele-operación.

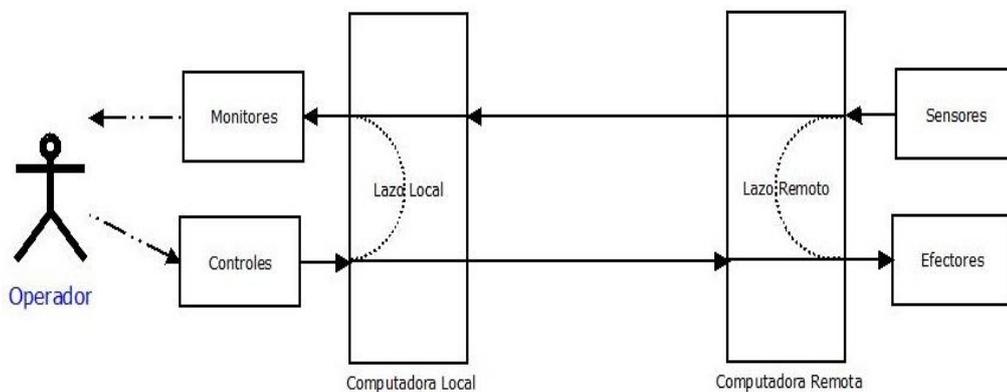


Figura 14-2. Elementos básicos de un sistema de tele-operación.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Cada uno de los elementos del sistema de tele-operación cumple una función específica y se ubican en la zona local (zona segura para el operador) o en la zona remota (zona de desarrollo del robot). En la tabla 5-2 se ve la descripción de cada elemento y la zona en la que trabaja.

Tabla 5-2: Descripción de los elementos de un sistema de tele-operación.

Elemento	Descripción	Zona de trabajo
Operador	Persona que opera a la distancia, su intervención puede ser continua o intermitente (monitorizar e indicar objetivos y planes en tiempos determinados)	Local
Dispositivo tele-operado	Máquina controlada por el operador, manipulador, robot o vehículo de exploración.	Remota
Interfaz	Conjunto de dispositivos para la interacción del operador, monitores de video u otro dispositivo que permite enviar o recibir información del robot.	Local
Control y canales de comunicación	Transmiten y adaptan las señales que se transmiten entre la zona remota y la zona local.	Local/Remota
Sensores	Recolecta la información de las zonas local y remota para utilizar en la interfaz y en el control.	Local/Remota

Fuente: del Río, C. R., Estévez, A. M., & Bruzón, E. R. Capítulo 2 Hacia el Laboratorio Virtual Definitivo. TICAI, 15.

La mayoría de prototipos estudiados para la realización del presente proyecto son tele-operados, y no todos disponen de sensores específicos, solo disponen de cámaras para que el operador pueda observar el desplazamiento del robot.

2.2.5. Estructuras

Los robots para operaciones USAR tiene estructuras de acuerdo a los requerimientos específicos de cada uno. Para los robots de rescate se utilizan materiales resistentes como el hierro, aluminio o acero, para que soporte los golpes o caídas. En aplicaciones de mitigación de incendio a más de utilizar estos materiales se aplica recubrimiento especial para soportar el calor. La locomoción se realiza mediante patas, ruedas u orugas. Siendo las ruedas u orugas las más utilizadas con sus limitaciones individuales, las ruedas para interiores y orugas para exteriores. Se considera además la temperatura que debe soportar, y los obstáculos a superar, el robot VARAN, figura 12-2 destaca con su tamaño, orugas metálicas para solucionar esta problemática.

En cuanto a la forma y las dimensiones depende del tipo de terreno y el ángulo de inclinación que se desea superar. El robot puede ser circular, rectangular o trapezoidal, para el tipo de terreno de la zona 3 del Ecuador y considerando que existen muchas pendientes se perfila como una buena opción la utilización de un robot trapezoidal con orugas metálicas. Las dimensiones deben ser acorde a los obstáculos que se desea superar y al equipamiento que llevará para realizar tareas específicas. Los prototipos estudias poseen sensores para determinar la temperatura como en el caso del robot Flamebot, un brazo mecánico que pueda manipular objetos de diferente peso como los robots VARAN y ASENDRO EOD, figura 9-2 e incluso cargar un cañón de agua como el robot LUF60, figura 10-2. Estos elementos adicionales dan información para las dimensiones y

forma final del robot. Para los requerimientos del presente proyecto se concluye que la opción a utilizar es un brazo robótico y adicional un extintor para la mitigación de incendios.

2.2.6. Equipamiento

En esta sección se define que equipamiento se acopla de mejor manera al entorno en el cual se desarrollará el robot a construir. Para la búsqueda de víctimas el robot debe poseer cámaras para visualizar su desplazamiento y un brazo robótico para realizar los movimientos necesarios para mitigar un incendio de baja escala. En el robot LUF60 el principal equipamiento es el cañón de agua para apagar incendios, lo cual es de gran aporte para un equipo de rescate. La creación de un robot con las características de LUF60 sería muy costoso, la finalidad del robot a implementar es combinar las características más relevantes y en lo posible mejorarlas para que se adapten a las necesidades de nuestro país. Es así que, el equipamiento para cumplir con las actividades requeridas es un brazo robótico, un sistema de monitoreo mediante cámaras y un sistema para la mitigación de incendios de baja escala.

Para el brazo robótico es necesario definir los grados de libertad y los actuadores que le permitan realizar sus movimientos sin dificultad. En el sistema de monitoreo es necesaria una elección del número y tipo de cámaras a utilizar. Finalmente, para el sistema de mitigación se va a seleccionar un método de extinción de fuego, su posicionamiento sobre el robot, la capacidad adecuada y su manipulación. La selección de estos elementos está directamente ligada con el peso del robot, mientras más equipamiento posea, tendrá más peso y será compleja su movilización. Se reduce la posibilidad de ingresar en espacios estrecho. La autonomía de la fuente de alimentación del robot puede disminuir por el mayor consumo de energía en los elementos del equipamiento dispuesto. También puede ser una desventaja para la selección de motores con los que se desplaza el robot, ya que a mayor peso se necesitan motores de mayor torque para compensar en la velocidad del robot. Los prototipos Packbot y VGTV-EXTREME son los más rápidos con motores de bajo torque, pero no disponen de más equipamiento que sus cámaras.

2.3. Selección de las plataformas móviles y componentes

Después de analizar las características de proyectos similares y con la finalidad de cumplir con los objetivos del presente proyecto, se identifican las características que debe poseer el robot para su funcionamiento en la zona 3 del Ecuador. En las tablas a continuación se muestran las características generales que debe poseer el robot y el grado de adaptabilidad a la zona para cumplir con las actividades tanto de búsqueda como de mitigación de incendios a baja escala. Sin

descartar que se pueden realizar mejoras en cualquiera de los sistemas descritos anteriormente, sean estos mecánicos o electrónicos.

Tabla 6-2: Selección del tipo de tracción del robot.

Propuesta	Características relevantes	Nivel de adaptabilidad
Ruedas	Dificultad para superar obstáculos con altura superior al 45% de alto de las ruedas. Si el robot se expone a temperaturas altas, tiene riesgo de explotar (ruedas con aire) o quemarse (ruedas sólidas).	Bajo
Orugas	Puede recorrer terrenos irregulares con mayor facilidad, superar obstáculos con altura superior al 45% de la altura del robot y pendientes de determinado ángulo. Si las orugas son metálicas se puede exponer el robot a temperaturas altas sin que esto afecte al sistema de tracción.	Alto
Patas	Para desplazarse sin tropezar y caer, es necesario un sistema de control muy robusto y por lo mismo costoso. Para que pueda exponerse a temperaturas altas se debe construir en un material resistente que conlleva utilizar actuadores de mayor torque para sus movimientos y del mismo modo es costoso.	Bajo

Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

El tipo de tracción que más se acopla para el funcionamiento del robot en la zona 3 del país es uno de tipo orugas metálicas.

Tabla 7-2: Selección de la forma del robot.

Propuesta	Características relevantes	Nivel de adaptabilidad
Circular	Posee una facilidad para girar en cortos lapsos de tiempo, pero no se suele utilizar un robot circular con tracción de orugas ya que dificulta la movilidad.	Bajo
Rectangular	En proyectos desarrollados como Packbot se observa que se debe utilizar brazos auxiliares para superar ciertos obstáculos o pendientes, las orugas chocan perpendicularmente con los obstáculos.	Bajo
Trapezoidal	De acuerdo al ángulo que se disponga en la parte frontal y posterior del robot, se tiene mayor facilidad de superar pendientes u obstáculos de gran tamaño. Como se puede comprobar en el robot VGTV-EXTREME.	Alto

Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

La forma del robot que más se acopla para el funcionamiento en la zona 3 es la trapezoidal.

Tabla 8-2: Selección del rango de velocidad del robot.

Propuesta	Características relevantes	Nivel de adaptabilidad
0 - 5 Km/h	Rango aproximado de la velocidad de una persona caminando, el tiempo de búsqueda será el mismo que utiliza un rescatista y la finalidad del presente proyecto es reducir en lo posible este tiempo.	Medio
5 - 10 Km/h	Rango aproximado de la velocidad de una persona trotando, se reduce el tiempo de búsqueda y no se alcanza límites que puedan volcar al robot por la fuerza del impacto contra determinados obstáculos.	Alto
10 - 30 Km/h	Rango aproximado de la velocidad de una persona corriendo, se reduce drásticamente el tiempo de búsqueda y el operador puede cometer varios errores al no visualizar a una víctima a través del monitor.	Bajo

Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

El rango de velocidad promedio del robot que más se acopla para el funcionamiento del mismo en la zona 3 del país es entre 5 y 10 Km/h.

Tabla 9-2: Selección del rango de peso del robot.

Propuesta	Características relevantes	Nivel de adaptabilidad
30 - 60 Kg	Ligero para movilizarse y de fácil transporte, pero con este peso el impacto contra obstáculos lo haría voltear.	Medio
60 - 100 Kg	Rango aproximado de una persona, se podría transportar aún con normalidad, no se voltearía fácilmente con el impacto y soportaría caídas desde determinada altura.	Alto
100 - 150 Kg	Superior al peso promedio de una persona, el transporte se dificultaría y la potencia de los actuadores deberá ser muy alta disminuyendo así la autonomía de la batería del robot.	Bajo

Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

El rango de peso del robot que más se acopla para el funcionamiento del mismo en la zona 3 del país es entre 60 y 100 Kg.

Tabla 10-2: Selección del equipamiento del robot.

Propuesta	Características relevantes	Nivel de adaptabilidad
Botiquín de primeros auxilios	En caso de encontrar a una víctima después de un sismo se debería entregar un botiquín hasta que se la pueda rescatar si está atrapada entre los escombros.	Medio
Extintor	En el presente proyecto se establece mitigar incendios de baja escala, esto se puede realizar con la ayuda en un extintor dependiendo la capacidad del mismo.	Alto
Cañón de agua	Posee la capacidad de extinguir fuegos de mayor escala, pero su implementación implica mayores costos. Y no es factible para el presente proyecto.	Bajo
Brazo Robótico	Permite la manipulación de pequeños objetos como la manguera de un extintor. Habrá que determinar los grados de libertad y el torque de los actuadores que le permita levantar el peso necesario.	Alto
Cámaras	Necesarias para la visualización del entorno y la posición del efector final del brazo robótico. Es necesario determinar el número de cámaras sobre el robot y la calidad de video de cada una.	Alto
Sensores	Para el presente proyecto no se plantea determinar magnitudes físicas como: temperatura, velocidad o aceleración. Se da prioridad al tiempo de respuesta para los movimientos del robot, por lo tanto no existe información a procesar.	Bajo

Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Los equipos adicionales para el funcionamiento del robot en la zona 3 del país que serán de mayor apoyo sobre la plataforma móvil son: cámaras, un brazo robótico y un extintor.

Tabla 11-2: Selección de la tecnología de comunicación del robot.

Propuesta	Características relevantes	Nivel de adaptabilidad
WiFi	Su frecuencia es de 2,4 GHz lo que le permite alcanzar distancias de entre 30 y 100 metros entre el operador y el robot. Es una buena opción para la transmisión de video, pero transmitir video y los comandos para el movimiento del robot aumenta el tiempo de respuesta.	Medio
Bluetooth	Es muy propenso a distorsión de señales, los dispositivos móviles como celulares hacen interferencia y la conexión tiende a perderse.	Bajo
RF	Presenta dos opciones; analoga (35 MHz) o digital (2,4 GHz). En el área de aeromodelismo se utiliza ampliamente la de 2,4 GHz por su codificación FASST y su tiempo de respuesta es inmediato. Pero la transmisión de video por este medio se complica, el método de enlace es directo entre el receptor y la emisora.	Medio
RF+WiFi	Para la aplicación objeto de este proyecto se perfila como la más recomendada, pues el video se transmite mediante un router (WiFi) y los comandos para el robot mediante RF de 2,4GHz. Dotando al sistema de buena recepción de video y tiempos de respuesta pequeños para los movimientos del robot.	Alto

Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Se utilizará una combinación de dos tecnologías de comunicación, aprovechando sus mejores características para un buen funcionamiento RF (comandos robot) y WiFi (video).

Tabla 12-2: Selección de la interfaz de navegación del robot.

Propuesta	Características relevantes	Nivel de adaptabilidad
Directa	Es la más utilizada cuando se requiere que los tiempos de retardo sean casi nulos, el operador puede sentir que se encuentra en el lugar remoto ya que controla todos los actuadores casi en tiempo real. La retroalimentación se realiza mediante cámaras montadas sobre el robot.	Alto
Multimodal o multisensorial	Utiliza diversos sensores para proveer al operador de información de la situación dinámica del robot, la retroalimentación es gráfica (valores de sensores) y visual (cámaras). Requiere de un microcontrolador robusto para el procesamiento y esto influye en el tiempo de respuesta.	Medio
Control supervisado	La utilización de dispositivos hápticos permite al operador tener un alto grado de tele-presencia en el sitio remoto, pero la utilización de estos dispositivos sugiere mayor consumo de potencia y mayor costo.	Medio

Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

La interfaz que se acopla a la aplicación planteada en el presente proyecto es la directa, debido a que se puede controlar todos los actuadores en tiempo real. Esta interfaz se la realiza mediante controles de aeromodelismo de 2,4 GHz con codificación PPM, el tiempo máximo de retardo se encuentra entre los 30 y 40 milisegundos. Adicional a las selecciones detalladas se indica que la estructura del robot será construida en acero y se utilizarán protecciones para los cables; espagueti para cables para que soporten 300°C y tubos protectores para evitar que se enreden los cables en las orugas o articulaciones del brazo robótico.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

Para el presente proyecto se plantea el uso de la metodología de diseño mecatrónico y el modelo en V. Este es un concepto de diseño en paralelo que permite validar los componentes del robot en la cada etapa del diseño, cumplir con los requerimientos de usuario y demostrar la hipótesis planteada.

3.1. Modelo en V

El modelo en V relaciona las actividades de prueba con el análisis y el diseño del robot móvil. Sus aplicaciones principales son ingeniería de software, robótica, sistemas embebidos de control automático y productos de TIC en general. En la figura 1-3 se muestra el esquema utilizado para el diseño del robot móvil.

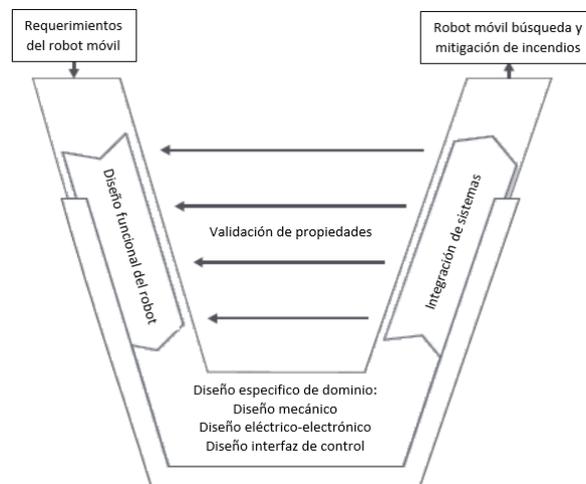


Figura 1-3. Modelo en V para el robot móvil.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Los pasos para en cumplimiento de esta metodología son los siguientes:

- **Requerimientos:**

Se establecerán los requerimientos para el desarrollo del robot tomando en cuenta que debe cumplir con determinadas medidas (largo, ancho y altura) que le permitan desplazarse sobre escombros. Además, debe cumplir con condiciones de peso, velocidad y de tracción. Adicional debe estar construido con materiales que le permitan soportar

temperaturas de un incendio de baja escala (300°C) y disponer del equipo necesario para ayudar en la mitigación del mismo (extintor 10 lb.).

El sistema de comunicación debe tener un tiempo de respuesta inmediato y un alto grado de inmunidad al ruido y a las interferencias de otros sistemas de comunicación similares.

El monitoreo se debe realizar a través de dispositivos portátiles, que le permita al operador visualizar el entorno de desplazamiento del robot para realizar la búsqueda de víctimas posterior a un sismo.

- Diseño general del sistema:

El objetivo es establecer una estructura general que describa las características de los elementos de la plataforma robótica móvil y el comportamiento de los mismos durante el funcionamiento del robot.

- Diseño específico:

Como se muestra en la figura 1-3 del modelo en V para el robot móvil, se divide en tres dominios.

- ✓ Diseño mecánico: Se definirá desplazamiento de robot junto con su equipamiento a través de los escombros para la realización de la búsqueda de víctimas. Se considerará elementos como la estructura base del robot, su forma, las medidas y su sistema de tracción. Se puntualizará el tipo de suelo, la inclinación máxima a la que se desplazará el robot, los escombros que podrá superar, la temperatura que soportará y la capacidad de carga para llevar sobre él un brazo robótico y un extintor. En esta etapa también se desarrollará el diseño del brazo robótico, considerando el número de grados de libertad que le permitirá manipular la manguera del extintor para la mitigación de incendios de baja escala.
- ✓ Diseño eléctrico-electrónico: Se establecerá la vida útil de la fuente de alimentación del robot y sus componentes. Se considerará el consumo energético de las placas electrónicas de comunicación, drivers de motores y cámaras para el monitoreo. Se diseñará la placa electrónica que acople la etapa de control con los drivers de los motores. Se determinará la autonomía del robot móvil, que debe ser de al menos 1 hora, para cumplir con su cometido de búsqueda de víctimas posterior a un sismo.
- ✓ Diseño de la interfaz de control: Se seleccionará el método de navegación del robot móvil y su tipo de interfaz para que el operador pueda controlar los movimientos del robot, el brazo robótico y la activación del sistema de mitigación de incendios a baja escala.

- Integración de los sistemas: Se integrarán los sistemas; mecánico, eléctrico-electrónico e interfaz de control. Se realizarán pruebas de campo para analizar el comportamiento de dichos sistemas.
- Validación de propiedades: Se planificarán las respectivas pruebas de campo para evidenciar el funcionamiento. Se realizarán las correcciones necesarias a los subsistemas para que se acoplen sin problemas y cumplir con los objetivos planteados en el análisis de requerimientos y el diseño conceptual. Se demostrará que la plataforma robótica cumpla con las actividades para las que se desarrollará. Las Pruebas se realizarán con el apoyo de personal de la Empresa Pública EMBA-EP
- Producto: Resultado final de la plataforma robótica (robot con su equipamiento y estación de monitoreo).

3.1.1. Análisis de requerimientos

La plataforma robótica será utilizada en dos actividades: la búsqueda de víctimas posterior a un sismo y la mitigación de incendios a baja escala en el caso de ser necesario durante la búsqueda, llevará un extintor de capacidad mínima de 10 lb., conectado a un sistema de activación remota. Se prevé también que posea un brazo robótico de al menos 3 grados de libertad que le permita realizar los movimientos necesarios para cumplir con la tarea de mitigación de incendios a baja escala. El robot debe tener respuesta inmediata a los comandos de movimiento, el retardo de transmisión no debe exceder los 30 milisegundos. Y dotar de tele-presencia al operador para desempeñar su labor de búsqueda de víctimas, la distancia mínima para seguridad del operador será 200 metros. La interfaz de control debe permitirle al operador la visualización del entorno en el que se desplaza el robot, para realizar las búsquedas.

Tomando como referencia las medidas nominales utilizadas en la construcción y considerando que el robot debe ingresar en edificios residenciales. Las dimensiones máximas del robot deben ser; ancho: 0,75 m, largo:1 m y altura: 0,45 m. Así, el robot estará en la capacidad de sortear obstáculos en el exterior de las edificaciones y del mismo modo podrá ingresar por pasillos si es necesario. Por motivos de transporte, resistencia a posibles choques con obstáculos o caídas, se requiere que la estructura del robot sea resistente y su peso se encuentre entre los 60 Kg y 100 Kg. El robot podrá soportar caída de materiales de construcción y no sufrir mayor daño, se debe utilizar un medio de transporte adecuado para el robot debido a su peso.

La velocidad nominal del robot debe estar entre a velocidad de un rescatista caminando y trotando para que pueda reducir los tiempos de búsqueda de víctimas, pero que no sea tan rápido como

para que el operador no pueda observar bien y pasar por alto un hallazgo. Por lo que se pretende que la velocidad del robot sea entre 5 Km/h y 10 Km/h. Por lo irregular que puede quedar el terreno después de un sismo, el robot debe tener la capacidad de sortear obstáculos pequeños de 0,20 m hasta grandes de al menos 1 m. Los obstáculos pueden ser esquivados o superados por encima de ellos, de este modo el robot deberá poder superar pendientes entre 15° y 20°. Para cumplir con este cometido, el robot debe ser de forma trapezoidal y su sistema de tracción debe ser mediante orugas metálicas. El robot deberá soportar temperaturas de un incendio de baja escala (300°C), así que deberá ser construido con materiales resistentes, se utilizará hierro.

En la tabla 1-3 se puede ver un resumen del análisis de requerimientos de diseño que debe cumplir la plataforma robótica móvil para su funcionamiento en la zona 3 del Ecuador.

Tabla 1-3: Requerimientos de diseño de la plataforma robótica móvil.

Requerimiento de diseño	Rango o valor
Ancho	Hasta 0,75 m
Largo	Hasta 1 m
Altura	Hasta 0,45 m
Peso	60 Kg – 100 Kg
Velocidad	5 Km/h – 10 Km/h
Largo del brazo extendido mínimo	0,90 m
Peso máximo del brazo robótico	20 Kg
Grados de libertad mínimos del brazo robótico	3 GDL
Capacidad mínima del extintor	10 libras
Pendiente mínima de desplazamiento	15 deg – 30 deg
Alcance mínimo del control remoto	150 m
Resolución mínima de la cámara	1280 x 1024 píxeles
Cuadros por segundo	30 fps
Temperatura mínima resistible	300 °C
Tiempo de autonomía mínima del robot	1 hora
Tiempo de autonomía mínima de la estación de monitoreo	1 hora

Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

3.1.2. Diagrama funcional

Basado en la estructura del sistema mecatrónico en el modelo V de Verein Deutscher Ingenieure (Kleiner, 2013).

Se realiza el diagrama funcional del robot para búsqueda posterior a sismos y mitigación de incendios a baja escala. El diagrama se puede observar en la figura 2-3.

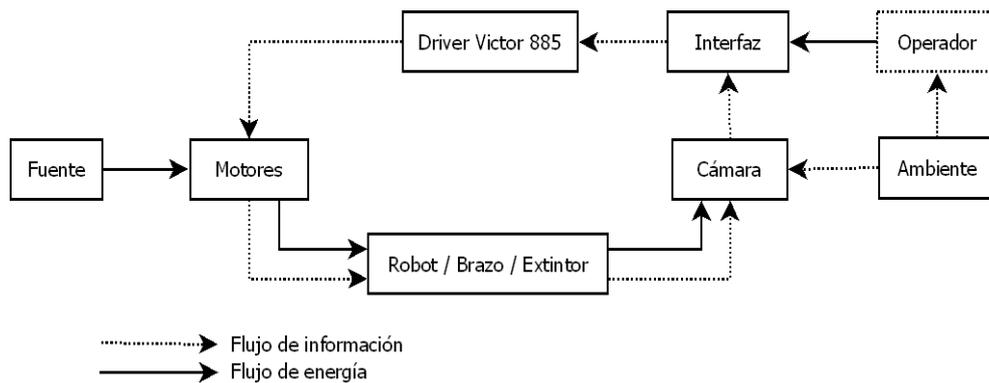


Figura 2-3. Diagrama funcional del robot para búsqueda posterior a sismos y mitigación de incendios a baja escala.
 Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Descripción del diagrama funcional:

- La fuente de alimentación del sistema consta de dos baterías, para la alimentación de la placa de control y los motores tanto de desplazamiento como del brazo robótico. Para reducir el valor de voltaje a los niveles admitidos por las distintas etapas de la placa de control se utilizará reguladores de voltaje independientes.
- Los actuadores principalmente son los motores que le permiten desplazarse al robot y los motores que mueven el brazo robótico. Adicional para el sistema de mitigación de incendios a baja escala se posee una electroválvula que controlara la apertura del extintor.
- La cámara montada sobre el robot móvil entrega información de localización del robot móvil al operador a través de la interfaz de video.
- El ambiente describe el entorno de la zona de exploración, afectada por un sismo o un conato de incendio por el que se desplaza el robot móvil.
- El operador será la persona o equipo de personas a cargo de la búsqueda o mitigación de incendio a baja escala con la ayuda del prototipo.
- La interfaz está constituida por controles remotos para el desplazamiento del robot, los movimientos del brazo robótico y la activación de la electroválvula del sistema de mitigación de incendios, junto con la pantalla que permita visualizar el desplazamiento del robot. La visualización del entorno se la puede realizar mediante pantallas, monitores móviles o computadoras portátiles para comodidad del operador.
- Los drivers victor 885 son la etapa de potencia del robot, reciben las señales PWM del control remoto y permiten el control de giro y velocidad de los motores.
- El robot móvil, el brazo robótico y la electroválvula del sistema de mitigación de incendios a baja escala realizar las actividades requeridas por el operador.

3.1.3. Diagrama de casos de uso

En la figura 3-3 se puede observar el diagrama de casos de uso, en el cuál se representa todas las actividades que puede realizar el operador con el robot de búsqueda posterior a sismos y mitigación de incendios a baja escala mediante la interfaz de control remoto.

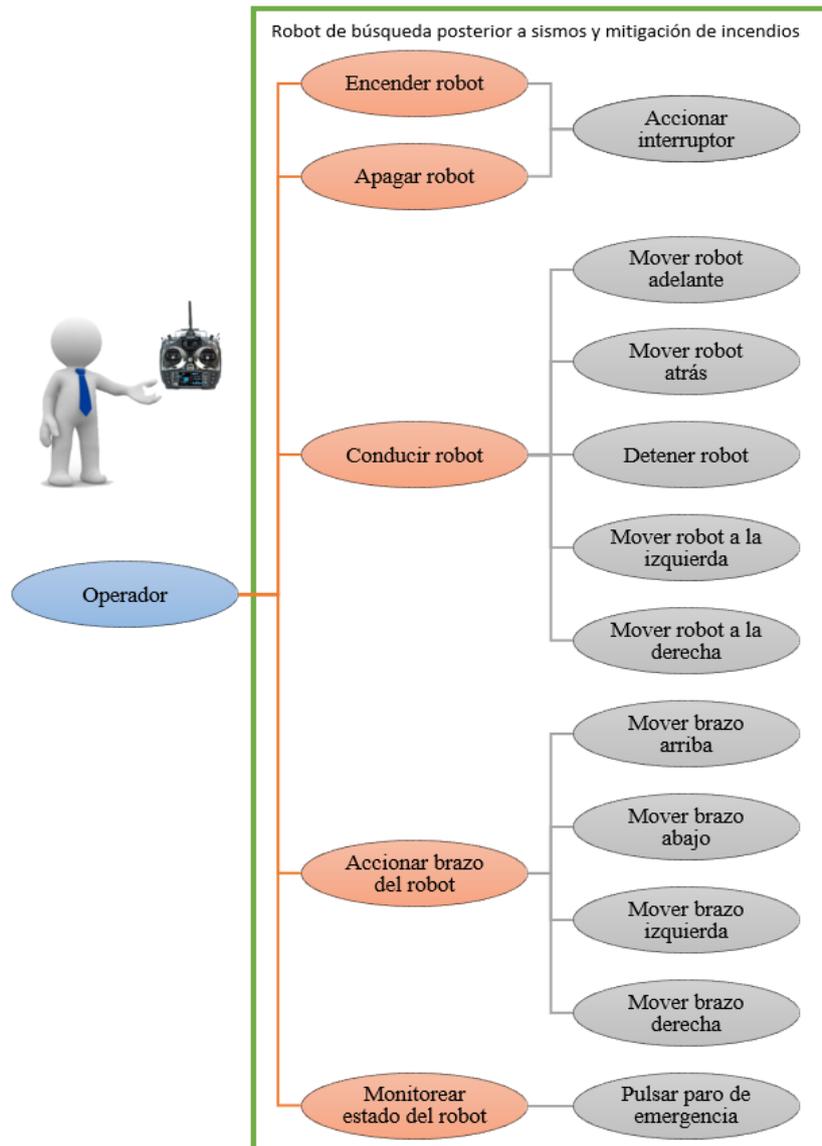


Figura 3-3. Diagrama de casos de uso para el robot de búsqueda y mitigación de incendios.

Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

A continuación, se procede con el diseño mecatrónico del sistema, es decir, el diseño específico del prototipo de acuerdo al análisis de requerimientos que se realizó al inicio del presente capítulo.

3.2. Diseño Mecatrónico del Sistema

3.2.1. Diseño mecánico

3.2.1.1. Modelo cinemático del robot móvil

La figura 4-3 muestra la vista inferior del móvil donde la posición está definida por el punto G , donde $\{0\}$ representa el sistema de referencias de coordenadas globales, G representa el centro de masa y se encuentra ubicado a una distancia a por delante del centro geométrico B , siendo $h(x, y)$ la posición y ψ la orientación del punto G respecto a $\{0\}$. (Zhang et al., 1998).

La velocidad lineal se determina promediando la velocidad lineal de la oruga derecha y la velocidad lineal de la oruga izquierda según la ecuación (1).

$$\mathbf{u} = \frac{\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_i}{2} \quad (1)$$

donde, \mathbf{u} representa la velocidad lineal, \mathbf{u}_d y \mathbf{u}_i son las velocidades lineales de desplazamiento de las orugas derecha e izquierda, respectivamente.

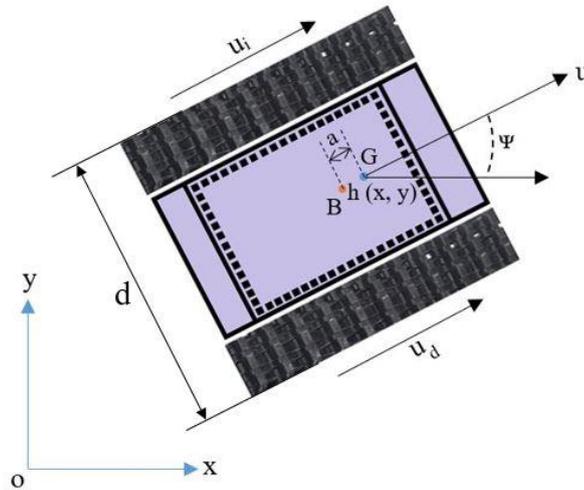


Figura 4-3. Robot móvil.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Por otro lado, si un observador se sitúa sobre la oruga izquierda, vería que la oruga derecha pasa a una velocidad $(\mathbf{u}_d - \mathbf{u}_i)$. Por lo tanto, la velocidad angular del robot móvil se puede definir con la fórmula (2),

$$\omega = \frac{\mathbf{u}_d - \mathbf{u}_i}{d} \quad (2)$$

donde, ω es la velocidad angular del robot móvil y d la distancia entre las ruedas.

Por lo que, el modelo cinemático considerando la restricción de desplazamiento lateral, puede ser representado por las ecuaciones (3),

$$\begin{aligned}\dot{x} &= u \cos \psi - a \omega \sin \psi \\ \dot{y} &= u \sin \psi + a \omega \cos \psi \\ \dot{\psi} &= \omega\end{aligned}\quad (3)$$

El movimiento del móvil está representado por los estados $[x, y, \psi]$ y las entradas $[u, \omega]$.

3.2.1.2. Modelo dinámico del robot móvil

Basado en el trabajo de (Andaluz G., 2011) se obtiene un modelo similar al de un robot con motores diferenciales tipo unicycle y se anulan ciertos elementos cuando las variables medidas son despreciables. En la figura 5-3 se presenta el esquema del modelado dinámico.

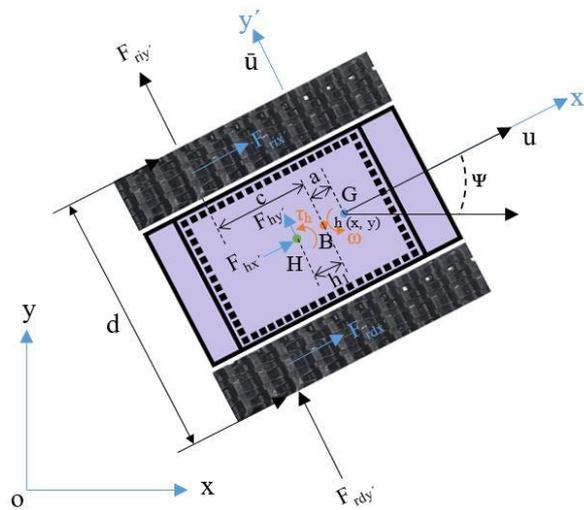


Figura 5-3. Parámetros del modelo dinámico.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Dónde:

G	es el centro de masa,
B	es el centro geométrico que une a las 2 orugas,
$h[x \ y]^T$	es el vector posición del centro de masa,
u y \tilde{u}	son las velocidades longitudinal y lateral del centro de masa,
ω y ψ	son la velocidad angular y orientación,
a, c, d y h_1	son distancias,
$F_{odx'}$ y $F_{ody'}$	son las fuerzas longitudinal y lateral en la oruga del motor derecho,
$F_{oix'}$ y $F_{oiy'}$	son las fuerzas longitudinal y lateral en la oruga del motor izquierdo,
$F_{hx'}$ y $F_{hy'}$	son fuerzas longitudinal y lateral ejercidas sobre H por la carga,
τ_h	es el momento ejercido por la carga

Considerando que cada oruga del robot es accionada por un solo motor podemos asumir que el funcionamiento es similar al que se tuviera con un único neumático en cada lado. Además las fuerzas longitudinales y laterales tanto de la oruga izquierda como la de la derecha se desplazan en el eje x al punto B , obteniendo que $c = 0$.

Se plantean las ecuaciones de Newton obteniendo el modelo reducido (4) de la suma de fuerzas y momentos.

$$\begin{aligned}\sum F_{x'} &= m(\dot{u} - \bar{u}\omega) = F_{odx'} + F_{oix'} + F_{hx'} \\ \sum F_{y'} &= m(\dot{\bar{u}} + u\omega) = F_{ody'} + F_{oiy'} + F_{hy'} \\ \sum M_z &= I_z\dot{\omega} = \frac{d}{2}(F_{odx'} - F_{oix'}) - a(F_{ody'} + F_{oiy'}) + (h + a)F_{hx'}\end{aligned}\quad (4)$$

Las ecuaciones de las velocidades u , ω y \bar{u} se pueden definir por las ecuaciones de (5).

$$\begin{aligned}u &= \frac{r}{2}(\omega_d + \omega_i) \\ \omega &= \frac{r}{d}(\omega_d - \omega_i) \\ \bar{u} &= \frac{ar}{d}(\omega_d - \omega_i)\end{aligned}\quad (5)$$

donde, r es el radio de la catalina izquierda y derecha; ω_i , ω_d son las velocidades angulares de la catalina izquierda y derecha, respectivamente.

En cuanto el comportamiento de los motores se conoce los modelos de las ecuaciones (6).

$$\begin{aligned}\tau_d &= \frac{k_a(v_d - k_b\omega_d)}{R_a} \\ \tau_i &= \frac{k_a(v_i - k_b\omega_i)}{R_a}\end{aligned}\quad (6)$$

donde, v_d y v_i son los voltajes de entrada aplicada a los motores derecho e izquierdo; k_a es la constante de reducción, k_b es la constante contra electromotriz, R_a es la resistencia eléctrica, τ_d y τ_i son los torques de los motores derecho e izquierdo respectivamente.

Del análisis dinámico de las combinaciones oruga-motor se obtienen las ecuaciones (7).

$$\begin{aligned}I_e\dot{\omega}_d + B_e\omega_d &= \tau_d - F_{rdx'}R_t \\ I_e\dot{\omega}_i + B_e\omega_i &= \tau_i - F_{rix'}R_t\end{aligned}\quad (7)$$

donde, I_e y B_e son el momento de inercia y el coeficiente de fricción viscosa respectivamente, de la combinación rotor del motor, caja de reducción y catalina, y R_t es el radio nominal de la oruga.

De las ecuaciones en (4), si se desprecian las fuerzas y torques generadas por la carga, y resolviendo el sistema de ecuaciones, obtenemos las ecuaciones en (8):

$$\begin{aligned}\sum F_{x'} + \sum M_z = F_{rix'} &= \frac{m}{2}(\dot{u} - \bar{u}\omega) - \frac{am}{d}(\dot{u} + u\omega) - \frac{I_z\dot{\omega}}{d} \\ \sum F_{y'} + \sum M_z = F_{rdx'} &= \frac{m}{2}(\dot{u} - \bar{u}\omega) + \frac{am}{d}(\dot{u} + u\omega) + \frac{I_z\dot{\omega}}{d}\end{aligned}\quad (8)$$

De las ecuaciones en (5), se puede determinar las igualdades de (9),

$$\begin{aligned}\omega_i &= \frac{u}{r} - \frac{\omega d}{2r} & \omega_d &= \frac{u}{r} + \frac{\omega d}{2r} & \bar{u} &= a\omega \\ \dot{\omega}_i &= \frac{\dot{u}}{r} - \frac{\dot{\omega}d}{2r} & \dot{\omega}_d &= \frac{\dot{u}}{r} + \frac{\dot{\omega}d}{2r} & \dot{\bar{u}} &= a\dot{\omega}\end{aligned}\quad (9)$$

Al remplazar (6) y (8) en (7), se encuentran las siguientes ecuaciones de (10),

$$\begin{aligned}I_e\dot{\omega}_d + B_e\omega_d &= \frac{k_a(v_d - k_b\omega_d)}{R_a} - \left(\frac{m}{2}(\dot{u} - \bar{u}\omega) + \frac{am}{d}(\dot{u} + u\omega) + \frac{I_z\dot{\omega}}{d}\right)R_t \\ I_e\dot{\omega}_i + B_e\omega_i &= \frac{k_a(v_i - k_b\omega_i)}{R_a} - \left(\frac{m}{2}(\dot{u} - \bar{u}\omega) - \frac{am}{d}(\dot{u} + u\omega) - \frac{I_z\dot{\omega}}{d}\right)R_t\end{aligned}\quad (10)$$

De las fórmulas (9) y (10) se obtiene las siguientes expresiones de (11).

$$\begin{aligned}I_e\left(\frac{\dot{u}}{r} + \frac{\dot{\omega}d}{2r}\right) + B_e\left(\frac{u}{r} + \frac{\omega d}{2r}\right) &= \frac{k_a\left(v_d - k_b\left(\frac{u}{r} + \frac{\omega d}{2r}\right)\right)}{R_a} \\ &\quad - \left(\frac{m}{2}(\dot{u} - \bar{u}\omega) + \frac{am}{d}(a\dot{\omega} + u\omega) + \frac{I_z\dot{\omega}}{d}\right)R_t \\ I_e\left(\frac{\dot{u}}{r} - \frac{\dot{\omega}d}{2r}\right) + B_e\left(\frac{u}{r} - \frac{\omega d}{2r}\right) &= \frac{k_a\left(v_i - k_b\left(\frac{u}{r} - \frac{\omega d}{2r}\right)\right)}{R_a} \\ &\quad - \left(\frac{m}{2}(\dot{u} - a\omega^2) - \frac{am}{d}(a\dot{\omega} + u\omega) - \frac{I_z\dot{\omega}}{d}\right)R_t\end{aligned}\quad (11)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones en (11) y considerando que $v_u = \frac{v_d+v_i}{2}$ y $v_\omega = \frac{v_d-v_i}{2}$, se obtiene (12):

$$\begin{aligned}\left(\frac{2I_e + mrR_t}{r}\right)\dot{u} &= amR_t\omega^2 - \frac{2u}{r}\left(\frac{k_ak_b}{R_a} + B_e\right) + \frac{2k_av_u}{R_a} \\ \left(\frac{I_ed^2 + 2rR_t(I_z + a^2m)}{rd}\right)\dot{\omega} &= -\frac{2amR_tu\omega}{d} - \frac{d\omega}{r}\left(\frac{k_ak_b}{R_a} + B_e\right) + \frac{2k_av_\omega}{R_a}\end{aligned}\quad (12)$$

Agrupando los parámetros dinámicos en contantes simplificadas se tiene las ecuaciones del modelo dinámico de (13).

$$\begin{aligned}\dot{u} &= \frac{\bar{\zeta}_3}{\bar{\zeta}_1}rR_t\omega^2 - 2\frac{\bar{\zeta}_4}{\bar{\zeta}_1}u + \frac{2rv_u}{\bar{\zeta}_1} \\ \dot{\omega} &= -2\frac{\bar{\zeta}_3}{\bar{\zeta}_2}rR_tu\omega - \frac{\bar{\zeta}_4}{\bar{\zeta}_2}d^2\omega + \frac{2rdv_\omega}{\bar{\zeta}_2}\end{aligned}\quad (13)$$

donde, los parámetros dinámicos son las igualdades de (14):

$$\begin{aligned}
\bar{\zeta}_1 &= \frac{R_a}{k_a} (2I_e + mrR_t) \\
\bar{\zeta}_2 &= \frac{R_a}{k_a} (I_e d^2 + 2rR_t(I_z + a^2m)) \\
\bar{\zeta}_3 &= \frac{R_a}{k_a} (am) \\
\bar{\zeta}_4 &= \frac{R_a}{k_a} \left(\frac{k_a k_b}{R_a} + B_e \right)
\end{aligned} \tag{14}$$

En el modelo (13), v_u y v_ω son los valores de entrada, este modelo solo es útil cuando se pueden manejar directamente los voltajes de los motores; como en el presente prototipo. El operador envía señales PWM que varían el voltaje promedio enviado a los motores, regulando así la velocidad del robot móvil, el lazo de control manual se cierra con el operador observando la velocidad de desplazamiento a través del monitor. Para implementar un sistema de control mediante las velocidades de referencia, es muy útil expresar el modelo del robot móvil en una forma más apropiada, considerando como señales de control las velocidades de referencia lineal y angular. Para este propósito, se necesita considerar los siguientes controladores de velocidad de las expresiones (15),

$$\begin{aligned}
v_u &= k_{PT}(u_{ref} - u) - \dot{u}k_{DT} \\
v_\omega &= k_{PR}(\omega_{ref} - \omega) - \dot{\omega}k_{DR}
\end{aligned} \tag{15}$$

Reemplazando las ecuaciones de (15) en (13) se obtienen (16):

$$\begin{aligned}
&\left(\frac{2I_e + mrR_t + \frac{2k_a}{R_a} r k_{DT}}{r} \right) \dot{u} \\
&= amR_t \omega^2 - 2u \left(\frac{k_a k_b}{rR_a} + \frac{B_e}{r} + \frac{k_a k_{PT}}{R_a} \right) + \frac{2k_a k_{PT} u_{ref}}{R_a} \\
&\left(\frac{I_e d^2 + 2rR_t(I_z + a^2m) + \frac{2k_a}{R_a} r d k_{DR}}{rd} \right) \dot{\omega} \\
&= -\frac{2amR_t u \omega}{d} - \omega \left(\frac{dk_a k_b}{rR_a} + \frac{B_e d}{r} + \frac{2k_a k_{PR}}{R_a} \right) + \frac{2k_a k_{PR} \omega_{ref}}{R_a}
\end{aligned} \tag{16}$$

Con lo cual el modelo modificado agrupando las constantes en nuevos parámetros dinámicos, se obtendría (17):

$$\begin{aligned}
\dot{u} &= \frac{\zeta_3}{\zeta_1} \omega^2 - \frac{\zeta_4}{\zeta_1} u + \frac{u_{ref}}{\zeta_1} \\
\dot{\omega} &= -\frac{\zeta_5}{\zeta_2} u \omega - \frac{\zeta_6}{\zeta_2} \omega + \frac{\omega_{ref}}{\zeta_2}
\end{aligned} \tag{17}$$

donde, las contantes dinámicas son las expresiones (18):

$$\begin{aligned}
\zeta_1 &= \frac{\frac{R_a}{k_a}(2I_e + mrR_t) + 2rk_{DT}}{2rk_{PT}} & \zeta_4 &= \frac{\frac{R_a}{k_a}\left(\frac{k_a k_b}{R_a} + B_e\right)}{rk_{PT}} + 1 \\
\zeta_2 &= \frac{\frac{R_a}{k_a}(I_e d^2 + 2rR_t(I_z + a^2 m)) + 2rdk_{DR}}{2rdk_{PR}} & \zeta_5 &= \frac{\frac{R_a}{k_a}(amR_t)}{dk_{PR}} \\
\zeta_3 &= \frac{\frac{R_a}{k_a}(amR_t)}{2k_{PT}} & \zeta_6 &= \frac{\frac{R_a}{k_a}\left(\frac{k_a k_b}{R_a} + B_e\right)d}{2rk_{PR}} + 1
\end{aligned} \tag{18}$$

El modelo dinámico de (17) se puede expresar matricialmente de la manera indicada en (19):

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\zeta_3}{\zeta_1} \omega^2 - \frac{\zeta_4}{\zeta_1} u \\ -\frac{\zeta_5}{\zeta_2} u \omega - \frac{\zeta_6}{\zeta_2} \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\zeta_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\zeta_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ref} \\ \omega_{ref} \end{bmatrix} \tag{19}$$

Reagrupando (19) puede ser escrita como se muestra en (20).

$$\begin{bmatrix} \zeta_1 & 0 \\ 0 & \zeta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \zeta_4 & \zeta_3 \omega \\ \zeta_5 \omega & \zeta_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{ref} \\ \omega_{ref} \end{bmatrix} \tag{20}$$

o en una forma compacta según (21)

$$H\dot{\mathbf{v}} + C(\mathbf{v})\mathbf{v} = \mathbf{v}_{ref} \tag{21}$$

donde \mathbf{v}_{ref} es el vector de las velocidades de referencia, \mathbf{v} es el vector de las velocidades reales del móvil. Agrupando los parámetros dinámicos de (20) se obtiene la parametrización lineal de (22):

$$\begin{bmatrix} \dot{u} & 0 & -\omega^2 & u & 0 & 0 \\ 0 & \dot{\omega} & 0 & 0 & u\omega & \omega \end{bmatrix} \boldsymbol{\zeta} = \begin{bmatrix} u_{ref} \\ \omega_{ref} \end{bmatrix} \tag{22}$$

donde: $\boldsymbol{\zeta} = [\zeta_1 \ \zeta_2 \ \zeta_3 \ \zeta_4 \ \zeta_5 \ \zeta_6]^T$ contiene los parámetros dinámicos que hacen útil el modelo.

Se realizó además el modelamiento CAD en SolidWorks previo a la construcción del robot móvil que permita realizar simulaciones del comportamiento de la plataforma. En la figura 6-3 se puede observar el diseño de la plataforma robótica móvil sin las orugas.

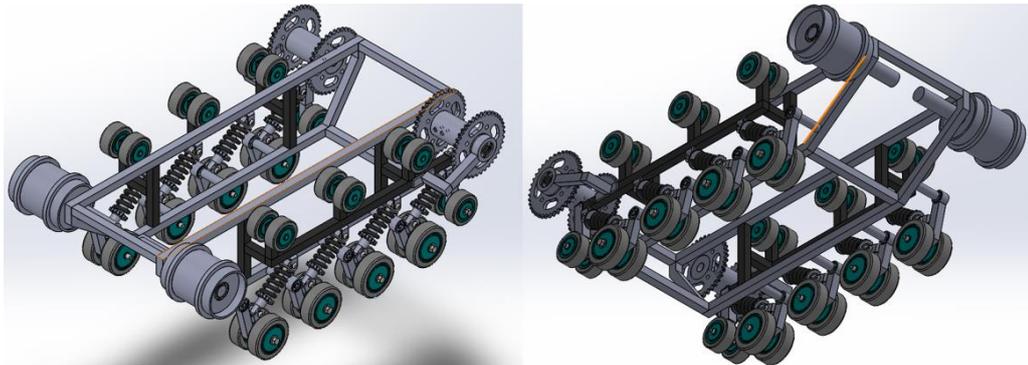


Figura 6-3. Vistas del diseño en SolidWork de la plataforma móvil.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

El modelo matemático es cercano al funcionamiento de un robot con sistema de tracción de tipo oruga, con las consideraciones necesarias. Así se utiliza este modelo matemático para describir el funcionamiento del modelo CAD y realizar las simulaciones necesarias previo a la construcción de la plataforma robótica móvil. En la figura 7-3 se puede observar la plataforma móvil en el proceso de construcción.



Figura 7-3. Plataforma móvil en proceso de construcción.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Posterior a la construcción de la plataforma móvil se realizó el diseño y construcción del brazo con 4 GDL para colocarlo sobre esta base.

3.2.1.3. Modelo cinemático del brazo

El modelo cinemático explica el movimiento de un manipulador a partir de conceptos geométricos, para el análisis cinemático se identifica el extremo operativo del brazo o un punto de interés a ser modelado. Apoyado en el trabajo previo de (Andaluz, V. et al., 2016) se puede representar un manipulador basado en la posición de sus eslabones, figura 8-3.

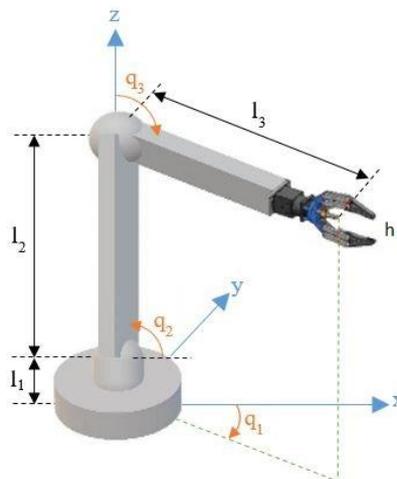


Figura 8-3. Manipulador de 4 Grados de Libertad.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Mediante la interpretación de la geometría espacial de cada eslabón se determinan las distancias en los tres ejes según el ángulo de cada eslabón expresado en (23):

$$\begin{aligned} h_x &= l_2 \cos(q_2) \cos(q_1) + l_3 \cos(q_2 + q_3) \cos(q_1) \\ h_y &= l_2 \cos(q_2) \sin(q_1) + l_3 \cos(q_2 + q_3) \sin(q_1) \\ h_z &= l_1 + l_2 \sin(q_2) + l_3 \sin(q_2 + q_3) \end{aligned} \quad (23)$$

Una vez encontradas las ecuaciones de posición del extremo operativo se puede aplicar la derivada respecto al tiempo para obtener las velocidades lineales para cada dimensión de manipulador, según muestra (24).

$$\begin{aligned} \dot{h}_x &= -l_2 [\sin(q_2) \cos(q_1) \omega_2 + \cos(q_2) \sin(q_1) \omega_1] - l_3 [\sin(q_2 + q_3) (\omega_2 + \omega_3) \cos(q_1) \\ &\quad + \sin(q_1) \cos(q_2 + q_3) \omega_1] \\ \dot{h}_y &= -l_2 [\sin(q_2) \omega_2 \sin(q_1) - \cos(q_1) \omega_1 \cos(q_2)] \\ &\quad - l_3 [\sin(q_2 + q_3) (\omega_2 + \omega_3) \sin(q_1) - \cos(q_1) \omega_1 \cos(q_2 + q_3)] \\ \dot{h}_z &= l_2 \cos(q_2) \omega_2 + l_3 \cos(q_2 + q_3) (\omega_2 + \omega_3) \end{aligned} \quad (24)$$

Usando las ecuaciones anteriores se expresa el modelo cinemático de forma compacta en (25), mediante lenguaje matricial.

$$\dot{\mathbf{h}} = \mathbf{J} \cdot \boldsymbol{\omega} \quad (25)$$

Donde las velocidades lineales dependen directamente de las velocidades angulares en cada uno de los eslabones del brazo manipulador. Además, utilizando la pseudo-inversa de la matriz Jacobiana se puede producir el proceso inverso como se indica en (26).

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{J}^\# \dot{\mathbf{h}} \quad (26)$$

En (27) se indica los elementos de la matriz Jacobiana.

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} J_{11} &= -\sin(q_1) [l_2 \cos(q_2) + l_3 \cos(q_2 + q_3)] \\ J_{21} &= \cos(q_1) [l_2 \cos(q_2) + l_3 \cos(q_2 + q_3)] \\ J_{31} &= 0 \\ J_{12} &= -\cos(q_1) [l_2 \sin(q_2) + l_3 \sin(q_2 + q_3)] \\ J_{22} &= -\sin(q_1) [l_2 \sin(q_2) + l_3 \sin(q_2 + q_3)] \\ J_{32} &= l_3 \cos(q_2 + q_3) \\ J_{13} &= -l_3 \cos(q_1) \sin(q_2 + q_3) \\ J_{23} &= -l_3 \sin(q_1) \sin(q_2 + q_3) \\ J_{33} &= l_3 \cos(q_2 + q_3) \end{aligned} \quad (27)$$

Siendo la matriz Jacobiana una transformación lineal que realiza el mapeo de las variables de estado a las variables de salida. A continuación, se presenta el modelo dinámico que representa el comportamiento del brazo de 4 GDL.

3.2.1.4. Modelo dinámico del brazo

En el modelamiento dinámico de un manipulador móvil se procede a determinar la regla matemática que vincula las variables de entrada y salida del sistema. El modelo dinámico expresa las fuerzas o pares requeridos por los actuadores, para lograr el movimiento deseado, en términos de posiciones, velocidades y aceleraciones a lo largo de la trayectoria y los parámetros del manipulador.

Para determinar el modelo dinámico del manipulador se utiliza el método de Euler-Lagrange que permite encontrar las ecuaciones de torques en los eslabones, para este análisis se consideran masas puntuales en los extremos de cada eslabón según se presenta en la figura 9-3.

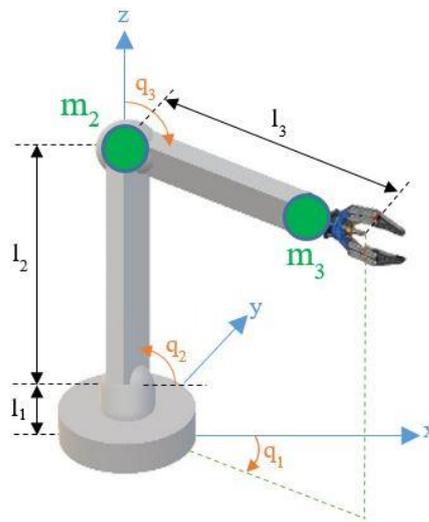


Figura 9-3. Ubicación de las masas puntuales en el manipulador de 4 grados de libertad.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

El método de Euler-Lagrange utiliza las energías cinéticas y potenciales de cada eslabón. Para determinar las ecuaciones de la energía cinética se requiere las velocidades en cada masa puntual según se muestra en (28).

$$K = \frac{1}{2} m_2 V_2^T V_2 + \frac{1}{2} m_3 V_3^T V_3 \quad (28)$$

Para encontrar las velocidades generadas en cada eslabón se parte de las ecuaciones de posición para cada uno de los extremos por eslabón indicados en (29).

$$\begin{aligned} x_2 &= l_2 \cos q_1 \cdot \cos q_2 & x_3 &= l_2 \cos q_2 \cdot \cos q_1 + l_3 \cos(q_2 + q_3) \cos q_1 \\ y_2 &= l_2 \cdot \cos q_2 \cdot \sin q_1 & y_3 &= l_2 \cos q_2 \cdot \sin q_1 + l_3 \cos(q_2 + q_3) \sin q_1 \\ z_2 &= l_1 + l_2 \cdot \sin q_2 & z_3 &= l_1 + l_2 \sin q_2 + l_3 \sin(q_2 + q_3) \end{aligned} \quad (29)$$

Derivando las ecuaciones de posición respecto al tiempo se determinan las velocidades por cada eslabón según lo expresado en (30):

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned}
 \dot{x}_2 &= -l_2 \text{Sen}q_2 \text{Cos}q_1 \dot{q}_2 - l_2 \text{Cos}q_2 \text{Sen}q_1 \dot{q}_1 \\
 \dot{y}_2 &= -l_2 \text{Sen}q_2 \text{Sen}q_1 \dot{q}_2 + l_2 \text{Cos}q_2 \text{Cos}q_1 \dot{q}_1 \\
 \dot{z}_2 &= l_2 \text{Cos}q_2 \dot{q}_2
 \end{aligned} \right\} V_2 \\
 & \left. \begin{aligned}
 \dot{x}_3 &= -l_2 \text{Sen}q_2 \text{Cos}q_1 \dot{q}_2 - l_2 \text{Cos}q_2 \text{Sen}q_1 \dot{q}_1 - l_3 \text{Sen}(q_2 + q_3) \text{Cos}q_1 [\dot{q}_2 + \dot{q}_3] \\
 &\quad - l_3 \text{Cos}(q_2 + q_3) \text{Sen}q_1 \dot{q}_1 \\
 \dot{y}_3 &= -l_2 \text{Sen}q_2 \text{Sen}q_1 \dot{q}_2 + l_2 \text{Cos}q_2 \text{Cos}q_1 \dot{q}_1 - l_3 \text{Sen}(q_2 + q_3) \text{Sen}q_1 [\dot{q}_2 + \dot{q}_3] \\
 &\quad + l_3 \text{Cos}(q_2 + q_3) \text{Cos}q_1 \dot{q}_1 \\
 \dot{z}_3 &= l_2 \text{Cos}q_2 \dot{q}_2 + l_3 \text{Cos}(q_2 + q_3) [\dot{q}_2 + \dot{q}_3]
 \end{aligned} \right\} V_3
 \end{aligned} \tag{30}$$

Una vez obtenidas las ecuaciones de las diferentes velocidades, se procede a obtener (31) que son las ecuaciones de las energías cinéticas.

$$\begin{aligned}
 K_2 &= \frac{1}{2} m_2 l_2^2 \left\{ \dot{q}_2^2 + \dot{q}_1^2 \text{Cos}^2 q_2 \right\} \\
 K_3 &= \frac{1}{2} m_3 \left\{ l_2^2 \dot{q}_2^2 + \dot{q}_1^2 \left[l_2 \text{Cos}q_2 + l_3 \text{Cos}(q_2 + q_3) \right]^2 + [\dot{q}_2 + \dot{q}_3]^2 l_3^2 + \dot{q}_1^2 [\dot{q}_2 + \dot{q}_3]^2 l_2 l_3 \text{Cos}q_3 \right\}
 \end{aligned} \tag{31}$$

Para completar el término de modelamiento de Euler-Lagrange se determina la energía potencial del conjunto de eslabones expresado en (32).

$$E_p = (m_2 + m_3) g l_1 + m_2 g l_2 \text{Sen}q_2 + m_3 g l_2 \text{Sen}q_2 + m_3 g l_3 \text{Sen}(q_2 + q_3) \tag{32}$$

Una vez obtenidas las ecuaciones de las respectivas energías se aplica el método Euler-Lagrange, sumando las ecuaciones de las energías cinéticas y restando las ecuaciones de la energía potencial, obteniendo (33):

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{1}{2} \dot{q}_2^2 l_2^2 (m_2 + m_3) + \frac{1}{2} \dot{q}_1^2 \left\{ m_2 l_2^2 \text{Cos}^2 q_2 + m_3 \left[l_2 \text{Cos}q_2 + l_3 \text{Cos}(q_2 + q_3) \right]^2 \right\} \\
 &\quad + \frac{1}{2} l_3^2 m_3 [\dot{q}_2 + \dot{q}_3]^2 - g h (m_2 + m_3) - m_2 g l_2 \text{Sen}q_2 - m_3 g \left[l_2 \text{Sen}q_2 + l_3 \text{Sen}(q_2 + q_3) \right]
 \end{aligned} \tag{33}$$

El Lagrangeano expresado en (33) debe ser procesado para llegar al modelo dinámico del sistema, mediante la forma expresada en (34):

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \tag{34}$$

Luego de procesar y obtener las ecuaciones en la forma de (34) se obtiene el modelo dinámico del manipulador que se resume en (35) de forma matricial.

$$\tau = M\ddot{q} + C\dot{q} + g \tag{35}$$

En (35) la matriz M contiene toda la inercia del sistema y sus elementos son los indicado en (36):

$$\begin{aligned}
M_{11} &= m_2 l_2^2 \text{Cos}^2 q_2 + m_3 \left[l_2 \text{Cos} q_2 + l_3 \text{Cos} (q_2 + q_3) \right]^2 \\
M_{12} &= 0 \\
M_{13} &= 0 \\
M_{21} &= 0 \\
M_{22} &= l_2^2 (m_2 + m_3) + l_3^2 m_3 + 2l_2 l_3 m_3 \text{Cos} q_3 \\
M_{23} &= l_3^2 m_3 + l_2 l_3 m_3 \text{Cos} q_3 \\
M_{31} &= 0 \\
M_{32} &= l_3^2 m_3 + l_2 l_3 m_3 \text{Cos} q_3 \\
M_{33} &= l_3^2 m_3
\end{aligned} \tag{36}$$

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix}$$

La matriz C contiene los efectos; de la aceleración centrífuga y de coriolis producidos en el movimiento de los eslabones, sus elementos son los expresados en (37).

$$\begin{aligned}
C_{11} &= -m_2 l_2^2 \text{Cos} q_2 \text{Sen} q_2 \dot{q}_2 - m_3 \left[l_2 \text{Cos} q_2 + l_3 \text{Cos} (q_2 + q_3) \right] \left[l_2 \text{Sen} q_2 \dot{q}_2 + l_3 \text{Sen} (q_2 + q_3) (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \right] \\
C_{12} &= -m_2 l_2^2 \text{Cos} q_2 \text{Sen} q_2 \dot{q}_1 - m_3 \left[l_2 \text{Cos} q_2 + l_3 \text{Cos} (q_2 + q_3) \right] \left[l_2 \text{Sen} q_2 \dot{q}_1 + l_3 \text{Sen} (q_2 + q_3) \dot{q}_1 \right] \\
C_{13} &= -m_3 \left[l_2 \text{Cos} q_2 + l_3 \text{Cos} (q_2 + q_3) \right] l_3 \text{Sen} (q_2 + q_3) \dot{q}_1 \\
C_{21} &= m_2 l_2^2 \text{Cos} q_2 \text{Sen} q_2 \dot{q}_1 + m_3 \left[l_2 \text{Cos} q_2 + l_3 \text{Cos} (q_2 + q_3) \right] \left[l_2 \text{Sen} q_2 + l_3 \text{Sen} (q_2 + q_3) \right] \dot{q}_1 \\
C_{22} &= -l_2 l_3 m_3 \text{Sen} q_3 \dot{q}_3 \\
C_{23} &= -l_2 l_3 m_3 \text{Sen} q_3 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \\
C_{31} &= l_3 m_3 \left[l_2 \text{Cos} q_2 + l_3 \text{Cos} (q_2 + q_3) \right] \text{Sen} (q_2 + q_3) \dot{q}_1 \\
C_{32} &= l_2 l_3 m_3 \text{Sen} q_3 \dot{q}_2 \\
C_{33} &= 0
\end{aligned} \tag{37}$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}$$

Y finalmente el vector g contiene el peso del manipulador producido por el efecto de la gravedad sus elementos son los que se muestran en (38).

$$\begin{aligned}
g &= \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} \\
g_1 &= 0 \\
g_2 &= m_2 g l_2 \text{Cos} q_2 + m_3 g \left[l_2 \text{Cos} q_2 + l_3 \text{Cos} (q_2 + q_3) \right] \\
g_3 &= m_3 g l_3 \text{Cos} (q_2 + q_3)
\end{aligned} \tag{38}$$

El desarrollo del modelo cinemático y dinámico del robot móvil y del brazo nos permite conocer información previa a la construcción para evaluar vibraciones, sobrepesos y sobre voltajes, que llevarían a movimientos erráticos o descoordinados. Esta información es útil para la implementación de un sistema de control en futuras investigaciones, de esta manera el robot puede ser autónomo.

Para verificar el comportamiento de la plataforma móvil para seguir trayectorias determinadas por el operador a través del control RF se utilizó el modelo cinemático encontrado, para realizar simulaciones con la ayuda de la herramienta software Simulink, como se puede observar en la figura 10-3.

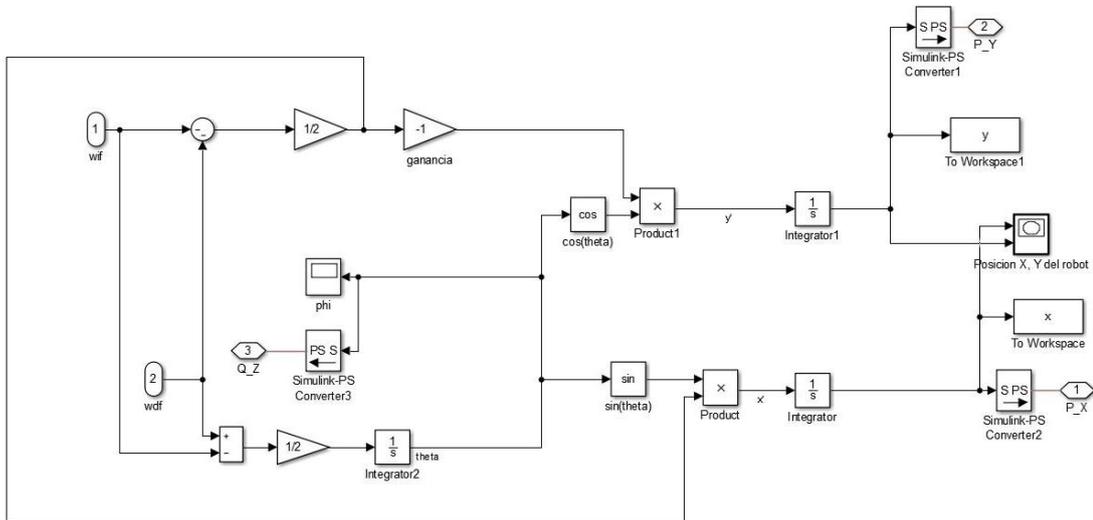


Figura 10-3. Cinemática de la plataforma robótica móvil en Simulink.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Mediante la importación del modelo CAD del robot móvil a Simulink se puede experimentar el funcionamiento del diseño mecánico al enlazarlo con el modelo cinemático, como se observa en la figura 11-3.

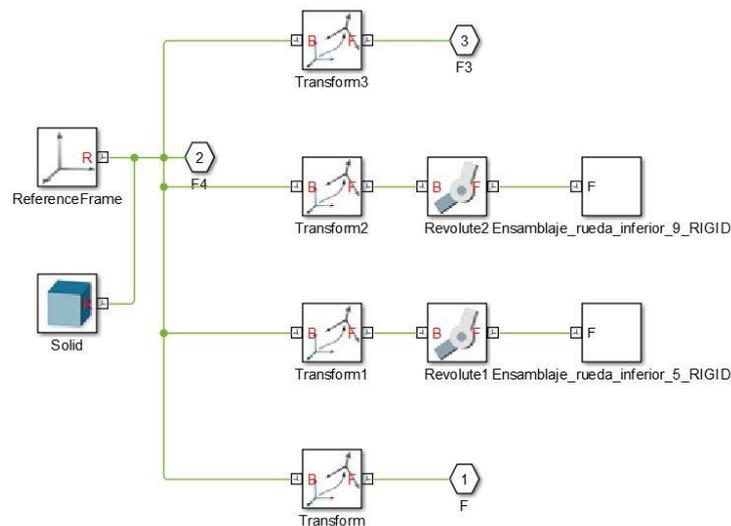


Figura 11-3. Importación del modelo CAD a Simulink.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Para evaluar la respuesta de seguimiento de trayectoria del robot móvil, se emularon las instrucciones que el operador puede enviar al robot a través de control RF mediante una slider se

seleccionó las instrucciones: adelante, atrás, izquierda, derecha o paro del robot móvil. La integración de los comandos con el modelo matemático y la importación del modelo CAD se puede observar en figura 12-3.

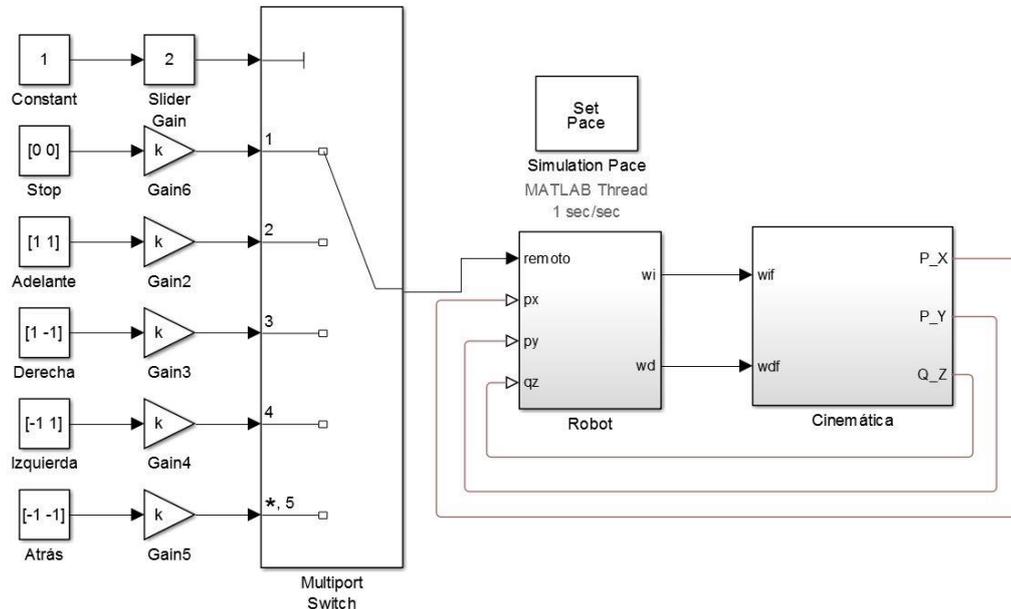


Figura 12-3. Simulación del control RF integrando el modelo CAD y la cinemática.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

En la figura 13-3 se observa el modelo CAD en 3D del robot móvil importado y utilizado para las simulaciones de su comportamiento para seguir trayectorias comandadas por el usuario.

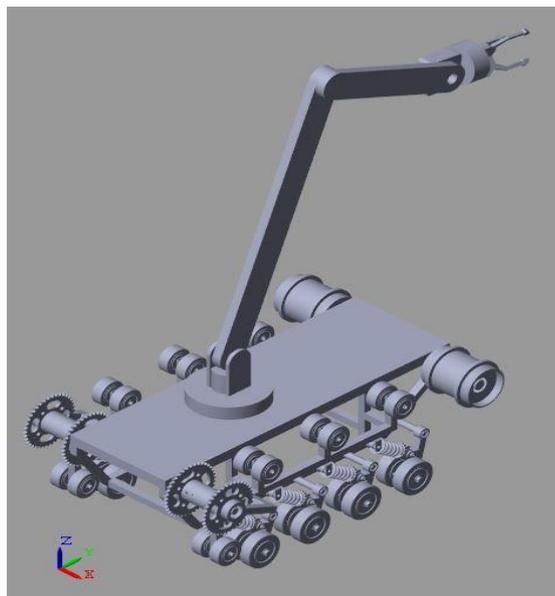


Figura 13-3. Modelo CAD importado a Simulink para la simulación.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Finalmente, en la figura 14-3 se observan dos trayectorias resultantes de la simulación de desplazamiento del robot usando las instrucciones adelante, atrás, izquierda, derecha o paro del robot móvil.

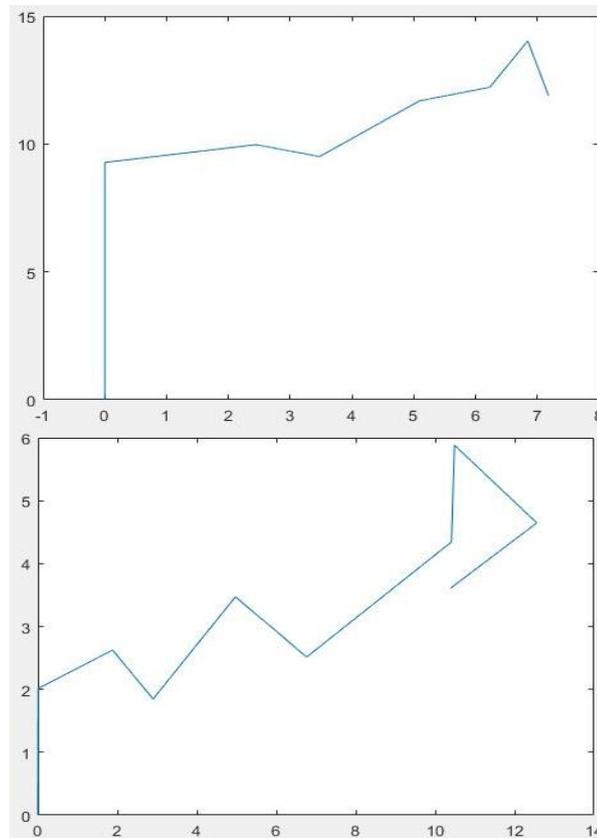


Figura 14-3. Trayectorias simuladas del robot móvil.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Con las simulaciones realizadas se verificó el funcionamiento del sistema mecánico integrando el modelo matemático de la cinemática y el modelo CAD del robot.

3.2.1.5. Diseño del sistema de mitigación de incendios

En el diseño del sistema de mitigación de incendios a baja escala se seleccionan los dos elementos principales que lo componen, el extintor y el tipo de activación del sistema. En el análisis de requerimientos se puede notar que se solicita una capacidad mínima del extintor de 10 libras, y en esta etapa se delimitará el tipo de incendio a mitigar. En el presente prototipo se precisó que sea un incendio de baja escala, esto corresponde a un incendio de grado I (la superficie en llamas no supera los 4 m²). Como complemento se puede clasificar los incendios dependiendo del material combustible, y se limita a los que pueden suceder en un entorno posterior a un sismo.

En la tabla 2-3 se puede observar la clasificación de los incendios en base al material combustible, estos datos se tomaron de la guía operativa para la organización y funcionamiento de los cuerpos

de bomberos a nivel nacional. Se observa que los incendios que pueden suceder son los de tipo A, B y C, no se considera el tipo D ya que es poco probable en la zona de aplicación del prototipo y su mitigación o extinción requieren de extintores específicos.

Tabla 2-3: Tipos de incendios según NFPA 1001.

Clasificación	Material combustible	Ejemplo
Clase A	Materiales sólidos / normales	papel, cartón, fibras, madera
Clase B	Materiales líquidos y gaseosos	gasolina, kerosén, alcohol
Clase C	Equipos eléctricos activos	electrodomésticos, transformadores
Clase D	Metales combustibles	aluminio, magnesio, titanio, sodio

Fuente: (Guía operativa para la organización y funcionamiento de los cuerpos de bomberos a nivel nacional, 2016).

Del mismo modo en guía operativa para la organización y funcionamiento de los cuerpos de bomberos a nivel nacional se considera que los extintores se los debe utilizar para incendios incipientes (baja escala). Si el fuego no se extingue después de su descarga completa se debe considerar otro método de extinción de mayor capacidad.

En la tabla 3-3 se muestra el tipo de extintor que se debe utilizar para cada clase de incendio y el tiempo aproximado de descarga.

Tabla 3-3: Tipos de extintores para las distintas clases de incendio según NFPA 1001.

Tipo de extintor	Agente extintor	Clase de incendio	Tiempo de descarga
Agua con presión	Agua	Solo A	45 seg. – 3 min.
Espuma (AFFF)	Espuma	A y B	50 seg.
Dióxido de carbono (CO2)	Dióxido de carbono	B y C	8 seg. – 30 seg.
Polvo químico seco (PQS)	Monoamónico	A, B y C	8 seg. – 25 seg.
Polvo seco para metales combustibles	Varios	Solo D	28 seg. – 30 seg.

Fuente: (Guía operativa para la organización y funcionamiento de los cuerpos de bomberos a nivel nacional, 2016).

En base a los fundamentos expuestos se elige un extintor con capacidad de 10 libras de tipo PQS, de este modo se puede mitigar incendios de tipo A, B y C que pueden aparecer en entornos posteriores a sismos en la zona 3 del país. El sistema de activación de un extintor puede ser manual o automático (con el uso de bulbos de disparo). La activación automática funciona bajo el mismo principio de rociadores de agua, la temperatura llega a determinado valor y se dispara. Bajo la concepción de que el robot será operado por personal capacitado, no se considera la activación automática, el extintor podría activarse de manera innecesaria por las temperaturas del entorno en el que se encuentre el robot realizando la búsqueda. La activación manual no se la puede realizar considerando que el extintor estará sobre el robot a varios metros de distancia del operador.

Así, se opta por un método de activación remota a través de una palanca de control que a su vez active una electroválvula situada en la boquilla del extintor, para que el operador active el sistema cuando considere que es estrictamente necesario. La electroválvula utilizada soporta una presión de 13 bares, con esto aseguramos que el extintor se mantenga sellado durante la búsqueda y se abra solo con el pulso eléctrico recibido cuando el operador emita la señal remota. El circuito de activación de la electroválvula es parte de la placa electrónica central de control, que se muestra en el diseño eléctrico-electrónico. Así se puede ubicar la placa en un lugar específico dentro del robot para protegerla del calor.

3.2.2. Diseño eléctrico-electrónico

El diseño eléctrico – electrónico empieza con la selección de los motores para el sistema de tracción. Se estableció en el análisis de requerimientos que el sistema de tracción debe ser basado en orugas, quiere decir que se necesitan dos motores para el desplazamiento de robot. La velocidad del robot debe estar entre 5 Km/h y 10 km/h, se toma el límite máximo. Para el cálculo de la potencia que debe tener los motores se considera la carga adicional (brazo robótico y extintor) y el ángulo de la pendiente mínima de desplazamiento. Estas consideraciones y su relación se pueden observar en la figura 15-3.

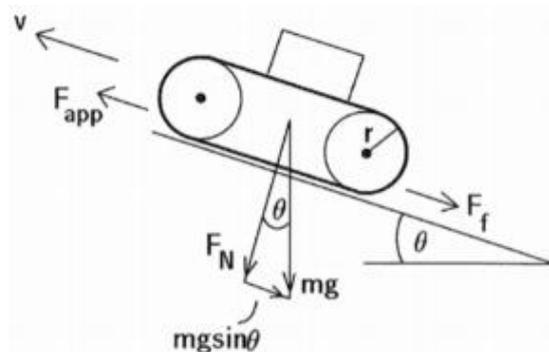


Figura 15-3. DCL Sistema de carga.

Fuente: (Chaglla, M. et al, 2014).

Donde:

F_{app}	es la fuerza de aplicación para superar la rampa,
F_f	es la fuerza de fricción de las orugas con la superficie,
F_N	es la fuerza normal que ejerce la superficie sobre el robot,
mg	es el peso del robot,
θ	es el ángulo de inclinación de la rampa,
μ	es coeficiente de fricción del material de la superficie,
v	es la velocidad máxima de robot,

Se tiene como datos la masa de robot $m_{robot} = 80$ kg y la masa de su equipamiento (brazo robótico + extintor) $m_{extra} = 20$ kg, para el ángulo de inclinación se utiliza el máximo $\theta_{max} = 30$ deg y similar para la velocidad se considera el valor máximo de 10 Km/h.

$$m_{total} = m_{robot} + m_{extra} = 100 \text{ [Kg]}$$

Considerando la figura 15-3, mediante análisis de las fuerzas se tiene:

$$F_{app} = F_f + m * g * \sin\theta \quad (39)$$

Reemplazando en (39) de acuerdo a los elementos conocidos de la figura 8.3 se tiene (40),

$$F_{app} = (F_N * \mu) + m * g * \sin\theta \quad (40)$$

$$F_{app} = (m * g * \cos\theta * \mu) + (m * g * \sin\theta)$$

Reemplazando con los datos del robot móvil y considerando un coeficiente máximo de fricción de 0,57 según (Ramos, E., et al, 2012):

$$F_{app} = 100 * 9.8 * ((\cos 30^\circ * 0.57) + \sin 30^\circ)$$

$$F_{app} = 973.76 \text{ [N]}$$

Para la potencia de los motores se utiliza la ecuación (41):

$$P = F_{app} * v \quad (41)$$

$$P = 2707.05 \text{ [W]}$$

Como se va a utilizar dos motores:

$$P = 1353.53 \text{ [W]}$$

Utilizando un factor de seguridad del 5% para la potencia de cada motor se tiene:

$$P = 1488.88 \text{ [W]} = 2 \text{ [Hp]}$$

Como conclusión es necesario utilizar dos motores de mínimo 2 Hp de 24 voltios, para que la corriente de consumo no sea muy alta.

3.2.2.1. Diseño de la interfaz de control

Como ya se mencionó la característica principal de la interfaz de control es que, el retardo sea mínimo (30 milisegundos). Esto es posible con la tele-operación y una interfaz directa, este método de navegación y este tipo de interfaz le permite al operador tomar decisiones en tiempo real. El operador controla en todo momento los actuadores del robot, los motores para desplazamiento y los motores del brazo robótico. Además, el operador tiene retroalimentación a través de la cámara montada sobre el robot, para resolver los movimientos que desea realizar. Se utiliza un control de aeromodelismo con una frecuencia de 2,4GHz que permite el control de motores DC con la ayuda de drivers controlados con señales PWM. En la figura 16-3 se puede observar un esquema general del funcionamiento de la interfaz de control del robot.

El control de aeromodelismo seleccionado posee una codificación PCM, la modulación por impulsos codificados transforma la señal analógica en una secuencia de bits. Se considera la modalidad más fiable por ser libre de interferencias de armónicos. El control emite un código de comprobación para el enlace con el receptor, evitando interferencia incluso de controles similares, cada control utiliza su propio código.

El radio enlace utiliza tecnología de espectro ensanchado por salto de frecuencia FHSS, mediante esta tecnología se transmite una porción de la información en una frecuencia determinada en un intervalo de tiempo y posterior salta a otra frecuencia para completar la transmisión. El orden de salto es pseudo aleatorio y conocido solo por el emisor y receptor previamente emparejados. En ambientes abiertos, sin ningún tipo de interferencia el alcance de este control puede llegar a 1000 m. A continuación, se realizan cálculos para determinar el alcance en entornos cerrados y con interferencias que se pueden dar posterior a un sismo.

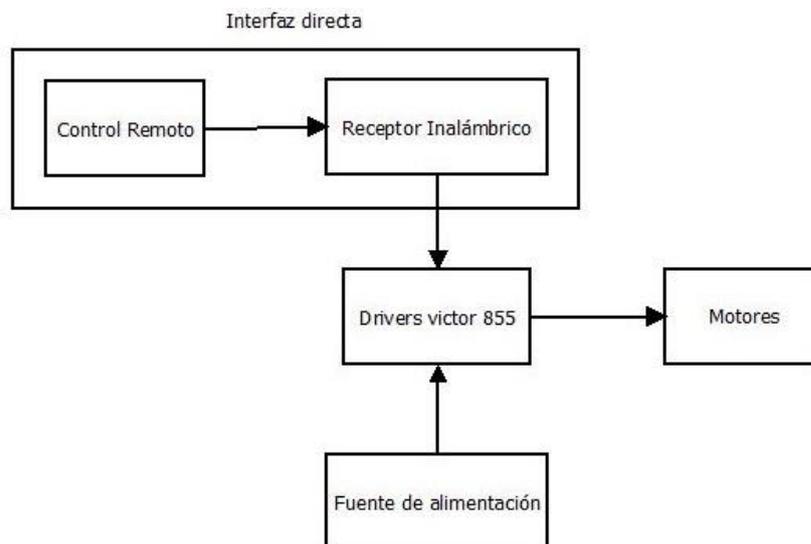


Figura 16-3. Esquema general tele-operación con interfaz directa.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

- ✓ Control remoto y Receptor inalámbrico: componen la interfaz directa de la tele-operación, el retardo se encuentra en el rango de 30 a 40 milisegundos.
- ✓ Drivers victor 855: reciben las señales PWM directamente, procesa las señales y controla el giro y la velocidad de los motores. El procesamiento de estas señales tiene un tiempo de retardo de 20 milisegundos.
- ✓ La fuente de alimentación: dota de 12 V para el funcionamiento de los drivers victor 855 y 24 V para el funcionamiento de los motores.

Con este tipo de interfaz de control el retardo máximo total entre la emisión de comandos desde el control remoto hacia el robot se encuentra en el rango de 60 a 100 milisegundos.

Las especificaciones técnicas de la emisora y receptor utilizados se pueden ver en la tabla 4-3.

Tabla 4-3: Características de la emisora y receptor utilizados para el control del robot.

FlySky FS-CT6B 2.4GHz 6CH Transmitter	Receiver FS-R6B Mode
Brand Name: Flysky	Channels: 6
Channels: 6	Model type: heli/glid/airplane
Model type: heli/airlane	RF range: 2.40-2.48GHz
RF range: 2.4-2.48GHz	Bandwidth: 500KHz
Bandwidth: 500KHz	RF.receiver sensitivity: -105dBm
RF power: less than 20 dBm	2.4G system: AFHDS
2.4G system: AFHDS	Code type: GFSK
Code type: GFSK	Sensitivity: 1024
Sensitivity: 1024	Power: 4.0 - 8.4V DC
Low voltage warning: yes(less than 9V)	Weight: 13 g
DSC port: yes (PS2; output: PPM)	ANT lenght: 26 mm
Charger port: yes	Size: 45*23*9 mm
Power: 12V DC (1.5AA*8)	Color: Gray (Transparent)
Weight: 495 g	Certificate: CE FCC
ANT length: 26 mm	
Size: 189*97*295 mm	
Certificate: CE0678, FCC	
Type: Mode 2 (left throttle hand)	

Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Para determinar que un radio enlace es posible y asegurar la conexión, la pérdida total debe ser menor a la diferencia entre la potencia del emisor y la sensibilidad RF del receptor. Se considera apropiada una diferencia de 6 dB, para que la comunicación sea estable. De acuerdo a los datos del control utilizado.

$$Potencia_{Tx} - Sensibilidad_{Rx} = 20 \text{ dB} - (-105 \text{ dB}) = 125 \text{ dB}$$

Utilizando la recomendación UIT-R P.1238-8, Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de sistemas de radiocomunicaciones en interiores y redes radioeléctricas de área local en la gama de frecuencias de 300 MHz a 100 GHz. Se realiza los cálculos de pérdida total para la transmisión en interiores según la ecuación (44):

$$L_{Total} = 20 \log(f) - 28 + N \log(d) + L_f(n) \quad (44)$$

Donde:

N: coeficiente de pérdida de potencia debida a la distancia.

f: frecuencia (MHz).

d: distancia de separación (m) entre la emisora y el receptor.

L_f : factor de pérdida debida a la penetración en el suelo (dB).

n: número de pisos entre la emisora y el receptor.

En las tablas 5-3 y 6-3 se puede observar los coeficientes de pérdida de potencia debida a la distancia y los factores de pérdida debida a la penetración en el suelo para distintas frecuencias de transmisión.

Tabla 5-3: Coeficiente pérdida de potencia N, para cálculo de pérdida de transmisión en interiores.

Frecuencia	Edificio residencial	Edificio de oficinas	Edificio comercial	Fábrica	Pasillo
900 MHz	-	33	20	-	-
1,25 GHz	-	32	22	-	-
1,9 GHz	28	30	22	-	-
2,1 GHz	-	25,5	20	21,1	17
2,4 GHz	28	30	-	-	-
3,5 GHz	-	27	-	-	-
2,625 GHz	-	44	-	33	-
4 GHz	-	28	22	-	-
5,2 GHz	30	31	-	-	-
5,8 GHz	-	24	-	-	-
28 GHz	-	-	27,6	-	-
60 GHz	-	22	17	-	16
70 GHz	-	22	-	-	-

Fuente: Rec. (UIT-R P.1238-8, 2015).

Se realiza los cálculos con los datos de coeficiente de pérdida de potencia para edificios residenciales y edificio de oficinas.

Tabla 6-3: Factor de pérdida de penetración en el suelo, L_f (dB), siendo n el número de pisos penetrados, para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores ($n \geq 1$).

Frecuencia	Edificio residencial	Edificio de oficinas	Edificio comercial
900 MHz	-	9 (1 piso) 19 (2 pisos) 24 (3 pisos)	-
1,8 - 2 GHz	4 n	15 + 4 (n - 1)	6 + 3 (n - 1)
2,4 GHz	10 ⁽¹⁾ (apartamento) 5 (casa)	14	-
3,5 GHz	-	18 (1 piso) 26 (2 pisos)	-
5,2 GHz	13 ⁽¹⁾ (apartamento) 7 ⁽²⁾ (casa)	16 (1 piso)	-
5,8 GHz	-	22 (1 piso) 28 (2 pisos)	-

Fuente: Rec. (UIT-R P.1238-8, 2015).

De manera similar se realiza cálculos en edificios residenciales tanto para el caso de apartamentos como para casas. Así, se determinó la pérdida total y el alcance máximo para cada uno de los casos posibles.

Pérdidas de transmisión en interiores sin interferencia de escombros:

$$L_{Total} = 20 \log(2400) - 28 + 28 \log(690)$$

$$L_{Total} = 119,07 \text{ dB}$$

Pérdidas de transmisión en interiores con interferencia de escombros de una casa:

$$L_{Total} = 20 \log(2400) - 28 + 28 \log(450) + 5$$

$$L_{Total} = 118,90 \text{ dB}$$

Pérdidas de transmisión en interiores con interferencia de escombros de un edificio de departamentos:

$$L_{Total} = 20 \log(2400) - 28 + 28 \log(300) + 10$$

$$L_{Total} = 119,04 \text{ dB}$$

Pérdidas de transmisión en interiores con interferencia de escombros de un edificio de oficinas:

$$L_{Total} = 20 \log(2400) - 28 + 30 \log(150) + 14$$

$$L_{Total} = 118,87 \text{ dB}$$

En el peor escenario, posterior a un sismo con escombros de un edificio de oficinas se garantiza el alcance mínimo requerido para la plataforma robótica que es 150 m. Y el emparejamiento único entre emisor y receptor asegura que no exista interferencia de controles similares.

3.2.2.2. *Diseño del sistema de transmisión del video*

Para el funcionamiento correcto del robot y no tener inconvenientes con la transmisión de video, estos sistemas de transmisión son totalmente independientes. De esta manera para el sistema de transmisión de video solo se debe cumplir con el alcance mínimo de 150 m, una resolución mínima de 1280 x 1024 píxeles y 30 fps. La frecuencia en la que se transmita el video debe encontrarse en el espectro que sea gratuito y no incurra en problemática legal.

La transmisión del video debe funcionar en ambientes cerrados para que el robot tenga la posibilidad de realizar la búsqueda pese a los obstáculos, sin que la señal se atenúe significativamente. Los dispositivos de transmisión deben ser flexibles, para la conexión a diversos equipos receptores y poseer la capacidad de conectarse con otras redes. Además de ser escalable, para realizar mejoras en un futuro, como la conexión a internet. Tomando en cuenta los requisitos mínimos y las consideraciones detalladas para este diseño, se selecciona la solución que mejor se acople.

De esta manera se define las opciones a utilizar: WiFi, Wimax, o MotoWi4. De las tres se elige WiFi por la facilidad de conexión, flexibilidad de escalabilidad y por encontrarse dentro del espectro de frecuencias gratuitas. Adicional se prevé el uso de dos cámaras sobre el robot, una colocada en la parte posterior de robot que le permitirá al operador la visualización del entorno a

medida que el robot se desplaza y una segunda cámara colocada sobre el brazo robótico del brazo para que el operador pueda inspeccionar espacios estrechos con mayor detenimiento en casos de búsqueda entre escombros. En la figura 17-3 se observa la cámara principal del robot y la matriz de leds que se utilizará para la búsqueda en lugares oscuros.



Figura 17-3. Cámara WiFi BD-DP604.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Las características de la cámara se las puede observar en la tabla 7-3.

Tabla 7-3: Características técnicas de la cámara WiFi BD-DP604.

Característica	Cámara WiFi BD-DP604
Dimensiones	100x68x58 mm
Alimentación	12 V
Grabación HD	Video y Audio 720p
Visión Nocturna	Array 4 LED Night Vision 20MT
Conectividad inalámbrica	WiFi

Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

En la figura 18-3 se aprecia la cámara que se montó sobre el brazo robótico, como se considera la posibilidad de golpearse o raspase mientras se realiza una observación detenida entre los escombros, se utiliza una cámara GoPro HERO 3 por su tamaño y robustez.



Figura 18-3. Cámara GoPro HERO 3.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017

Esta cámara posee una batería propia con una autonomía de 1 hora y la posibilidad de guardar video tanto en la cámara con la ayuda de una tarjeta microSD o en el celular que se esté realizando la recepción del video. Las características principales de la cámara se observan en la tabla 8-3.

Tabla 8-3: Características técnicas de la cámara GoPro HERO 3.

Característica	GoPro HERO 3
Dimensiones	41 x 59 x 21 mm
Peso	74 g
Grabación HD	1080p (60-50fps), 720p (120-100-60-50fps)
Grabación Slow-Motion	720p (120fps)
Audio	Micrófono mon, jack 3.5 mm opcional
Resolución fotos	10 MP
Conectividad inalámbrica	WiFi
Almacenamiento	Micro SD
Batería	1180 mAh

Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

La ventaja de las dos cámaras a utilizar es que la recepción del video se la puede realizar en cualquier dispositivo portátil, dando comodidad al operador y la disponibilidad de seleccionar el tamaño de monitor para realizar la búsqueda.

3.2.2.3. Diseño del sistema de control y monitoreo

Con la selección de los elementos de la interfaz de control y el sistema de transmisión de video, se diseña la placa electrónica que constituirá el sistema de control y monitoreo. En la figura 19-3 se puede observar la placa de circuito central del robot. Esta placa también controlará las salidas hacia los drivers para los motores del brazo robótico y los de desplazamiento del robot.



Figura 19-3. Placa PCB del sistema de control y monitoreo del robot.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

De manera similar en la figura 20-3 se muestran el diseño de las pistas del circuito PCB, y la ubicación de cada elemento seleccionado en las etapas de diseño.

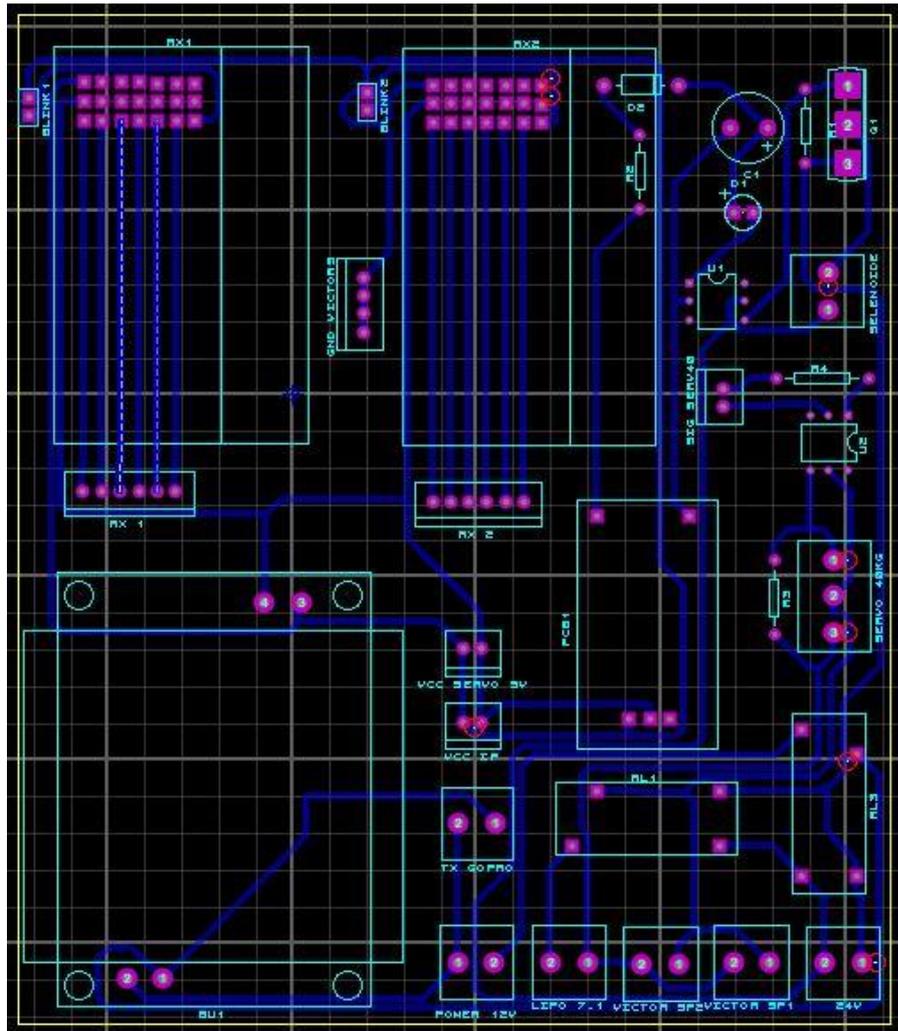


Figura 20-3. Diagrama PCB de la placa del sistema de control y monitoreo del robot.

Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Finalmente se realiza el diseño y selección del sistema de alimentación, se considera el consumo de energía de todos los elementos: cámaras, motores, dispositivos electrónicos, etc.

3.2.2.4. Diseño del sistema de alimentación

El sistema de alimentación se lo divide en dos partes una alimentación de 12V y otra de 24V, con la alimentación de 12V se alimentará las cámaras, la iluminación adicional y los motores del brazo robótico. En cuanto a la tarjeta de control se realizará mediante divisores de voltaje para obtener el valor necesario para cada dispositivo (transmisor, Arduino, receptor RF, etc.). Mientras que con la fuente de 24V se alimentará exclusivamente los motores para el desplazamiento del robot.

La corriente de consumo de las cámaras, la iluminación adicional y los motores del brazo robótico se la denomina $I_{\text{accesorios}}$ y la corriente de consumo de la placa de control se la llamará I_{control} .

$$I_{total} = I_{accesorios} + I_{control}$$

$$I_{total} = 5870 \text{ mA}$$

Agregando un factor de seguridad del 25%, la $I_{consumo12V}$ es:

$$I_{consumo12V} = 1.25 * I_{total} = 7337,5 \text{ mA}$$

La capacidad de la batería está determinada por:

$$Ab = \frac{\text{capacidad de la bateria}}{\text{consumo esperado}}$$

$$\text{capacidad de la bateria} = Ab * \text{consumo esperado}$$

$$\text{Capacidad de la bateria} = 7337,5 \text{ [mA]} * 1[h] = 7337,5 \text{ [mAh]}$$

Para el caso de los motores de tracción del robot móvil se considera el voltaje y corriente nominal de consumo de los motores. Los motores serán alimentados con 24 V y la corriente de consumo es de 60 A, de esta manera la capacidad de la batería es:

$$Ab = \frac{\text{capacidad de la bateria}}{\text{consumo esperado}}$$

$$\text{capacidad de la bateria} = Ab * \text{consumo esperado}$$

$$\text{Capacidad de la bateria} = 60 \text{ [A]} * 1[h] = 60 \text{ [Ah]}$$

Se usan dos baterías de plomo-ácido de 12 V con capacidad de 40 Ah, que son las más cercanas encontradas en el mercado que cumplan con los requerimientos.

3.3. Planificación de Pruebas

Continuo a la culminación del diseño e implementación del robot para búsqueda posterior a sismos, y mitigación de incendios a baja escala se planifican las pruebas para comprobar el correcto funcionamiento del sistema completo. Se realizarán los ajustes necesarios hasta cumplir con los requisitos planteados en este capítulo.

Para avalar las pruebas se realizarán con la presencia de tres bomberos de la Cía. X-5 facilitados mediante oficio N° 155-GEMBA-EP-2017 por parte de la Empresa Municipal Cuerpo de Bomberos de Ambato – Empresa Pública. Las pruebas necesarias a realizar para corroborar el funcionamiento del robot son las siguientes:

- ✓ Pruebas de desplazamiento del robot en terreno irregular.
- ✓ Pruebas de carga extra soportada por el robot.
- ✓ Pruebas de mitigación de incendios de baja escala.
- ✓ Pruebas de temperatura soportadas por el robot (400°C).
- ✓ Pruebas de acceso del robot a la casa de humos.
- ✓ Funcionamiento de transmisión de video desde el robot a la interfaz de control.

Todas estas pruebas fueron realizadas en el Centro de Capacitación y Entrenamiento de la Empresa Municipal Cuerpo de Bomberos de Ambato – Empresa Pública con el personal antes

mencionado y un equipo de protección contra incendios. Posterior a las pruebas y previo la entrega de un informe de las actividades realizadas la entidad pública extenderá una certificación del trabajo realizado.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego de realizar las pruebas de los sistemas: electrónico, mecánico y de transmisión de manera individual en distintos escenarios, obteniendo resultados favorables y con la autorización del Crnl. (SP) MSc. Mario Carrillo Rosero Gerente General EMBA-EP extendida el día 02 de marzo del presente año se procedió a realizar las pruebas de campo necesarias para determinar el correcto funcionamiento del proyecto de investigación, dando como resultado lo siguiente.

4.1. Resultados de desplazamiento del robot en terreno irregular.

Para la verificación del desplazamiento del robot se utilizó varios escenarios como: suelo de cemento, suelo de hormigón, tierra irregular y con vegetación y una rampa de 25°. Se realizó mediciones de tiempo que tardaba el robot en recorrer 6 m de distancia para posterior calcular la velocidad del mismo, cabe indicar que el robot partía desde una posición de reposo. Las mediciones, el cálculo de la velocidad y el promedio final se lo muestra en la tabla 1-4.

Tabla 1-4: Mediciones de tiempo y cálculo de velocidad del robot.

Tiempo [s]	Velocidad [m/s]	Velocidad [Km/h]
2.14	2.80	10.32
2.16	2.78	10.21
2.15	2.79	10.24
2.16	2.78	10.32
2.14	2.80	10.26
2.16	2.78	10.31

Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Se puede observar que la velocidad es cercana a la planteada en los requisitos del proyecto, la velocidad promedio del robot en terreno plano es 10.28 Km/h, el resultado es favorable para continuar con el resto de pruebas. En las figuras 1-4, se puede observar imágenes de las pruebas de velocidad y el tipo de superficie de desplazamiento en un ambiente residencial.

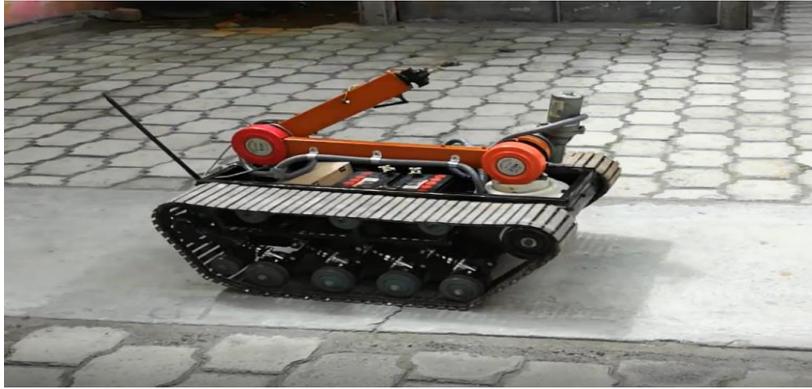


Figura 1-4. Pruebas de velocidad del robot móvil (6 metros de recorrido).
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

En cuanto al tipo de terreno se realizaron pruebas en distintos tipos de superficie, obteniendo resultados de desplazamiento favorables gracias al sistema de orugas con amortiguamiento, observando una ligera disminución de la velocidad del robot al desplazarse en superficies con granillo o lastre debido al material de las orugas. En la tabla 2-4 se puede observar el porcentaje aproximado de reducción de la velocidad en ciertas superficies de terreno.

Tabla 2-4: Porcentajes de disminución de velocidad respecto a la superficie de desplazamiento.

Superficie	Porcentaje de velocidad disminuida
Arena	0.56 %
Tierra	0.79 %
Tierra + Lastre	1.33 %
Tierras + Vegetación	0.84 %

Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Considerando que estos porcentajes no son relevantes, pues en el escenario más complicado la velocidad se reduciría a 9.9 km/h, se procede con la siguiente prueba. En las figuras 2-4 y 3-4 se puede observar al robot desplazándose sobre otro tipo de superficie.



Figura 2-4. Robot desplazándose sobre tierra + lastre.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Las pruebas de desplazamiento sobre tierra más vegetación se las realizó dentro de Centro de Capacitación y Entrenamiento de la EMBA-EP. Para concluir con las pruebas de desplazamiento del robot en terreno irregular se realizó la prueba de superación de rampa. En esta prueba se usó una rampa de 25deg de inclinación construida de cemento, fue superada sin ningún inconveniente por el robot y se encuentra dentro del rango de los requerimientos del sistema que es de 15deg a 30deg, pero se pudo observar que debido al consumo de baterías a cierto porcentaje de carga el robot empezó a tardar más tiempo en subir la rampa. Según Nieves, J., & Aristizábal, J. (2013). Se tienen valores de voltaje de acuerdo al porcentaje de carga de las baterías, estos valores se consideran para realizar las pruebas de superación de rampa.



Figura 3-4. Robot desplazándose sobre tierra + vegetación.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

En la tabla 3-4 se puede observar una comparativa entre el porcentaje de carga de la batería del robot móvil y el tiempo que tardó en superar una rampa de 6 metros a 25deg construida en cemento.

Tabla 3-4: Evaluación de funcionamiento del robot para superar una rampa de 25deg con respecto al porcentaje de carga de la batería del robot.

Porcentaje de carga baterías	Voltaje en las baterías [V]	Tiempo para superar la rampa [s]
100%	25.4	2.15
75%	25	2.41
50%	24.4	2.89
30%	24	3.67
Descargada	23.2	No supera rampa

Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

En la figura 4-4 se observa al robot en la prueba de superación de rampa, en un ambiente residencial.



Figura 4-4. Robot mientras sube la rampa.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Con estos resultados se pone en consideración el uso de otro tipo de baterías o de mayor capacidad para eliminar este pequeño inconveniente, pues es respecto a la descarga de la misma. Otra alternativa es el cambio de baterías al estar a su 50% de nivel de carga.

4.2. Resultados de carga adicional soportada por el robot

El robot se diseñó para llevar un peso adicional de un extintor con capacidad de 10 libras, pero gracias a los potentes motores utilizados se pudo superar esta cantidad de peso extra sobre el robot. Esto permite dotar al robot de un extintor con mayor capacidad para la mitigación de incendios, tener la posibilidad de llevar a una persona o incluso sujetar la manguera de una motobomba según observaciones y recomendaciones del personal de la Cía. X-5 de la EMBA-EP presente durante las pruebas. Para comprobar el funcionamiento del robot con peso extra se realizaron pruebas con dos personas; de 60 Kg y 65 Kg respectivamente, con la batería cargada al 100%. Esto se puede observar en las figuras 5-4. y 6-4.



Figura 5-4. Prueba de peso adicional sobre el robot con una persona de 65 Kg.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.



Figura 6-4. Prueba de peso adicional sobre el robot con un bombero de 60 Kg.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

En la tabla 4-4 se puede observar el comportamiento del robot con los pesos extras de 60 y 65 Kg. respectivamente.

Tabla 4-4: Evaluación de funcionamiento del robot con peso extra, pruebas con 60 y 65 Kg.

Peso extra sobre el robot [Kg]	Distancia de recorrido [m]	Velocidad del robot[Km/h]
60	3	9,38
60	5	9,35
60	10	9,33
65	3	8,89
65	5	8,87
65	10	8,87

Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Se debe considerar que el consumo de las baterías fue más rápido que con el robot sin carga adicional (solo brazo y extintor). Para usar el robot como aplicación al transporte de personas se debe realizar un rediseño de la fuente de alimentación, para que la autonomía del mismo no se vea afectada.

4.3. Resultados mitigación de incendios de baja escala

Culminadas las pruebas que permitirán realizar la búsqueda de personas posterior a un sismo, se continuó con las pruebas de mitigación de incendios de baja escala. Estas pruebas se realizaron en dos escenarios dentro del Centro de Capacitación y Entrenamiento de la EMBA-EP, en las denominadas pailas de fuego (fosas de cemento) para simular incendios de baja escala controlados y en una casa modelo denominada casa de humos para simular el acceso del robot a un hogar en el que se presente un incendio. Como se ve en las figuras 7-4 y 8-4 respectivamente.



Figura 7-4. Prueba de mitigación de incendio de baja escala en paila de fuego.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.



Figura 8-4. Prueba de mitigación de incendio de baja escala en la casa de humos.

Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Se utilizó como material combustible madera y cartón en los dos escenarios de incendio. Con la supervisión de los bomberos de la Cía. X-5 se pudo realizar 6 pruebas de extinción, esto debido a que no se disponía de un número mayor de extintores y la recarga no puede ser inmediata. El tipo de extintores utilizados fue de tipo PQS que tiene la capacidad de mitigar fuegos de tipo A, B y C.

Se observó que durante la mitigación de los incendios la visibilidad disminuye por la cantidad de PQS en el ambiente, esto fue contrarrestado de manera parcial con el uso de una lámpara led sobre el robot. Los comentarios de los bomberos fueron favorables y aclararon que la visibilidad fue similar a la que hubiera tenido un miembro de ellos durante la mitigación del incendio, esto se observa en la figura 9-4.



Figura 9-4. Visibilidad durante la mitigación del incendio de baja escala.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Después de unos minutos en ambiente se despeja y se puede observar claramente que la mitigación del fuego fue realizada con éxito. Esto se puede ver en la figura 10-4.



Figura 10-4. Escenario posterior a la mitigación del incendio de baja escala.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

En la tabla 5-4 se puede observar el funcionamiento del robot móvil para la mitigación de incendios, con respecto a la temperatura, área de fuego, lugar de incendio y el tiempo que se tardó en mitigarlo.

Tabla 5-4: Evaluación de mitigación de incendios en la casa de humos y en paila de fuego.

Escenario de incendio	Área de incendio[m ²]	Temperatura promedio [° C]	Tiempo de mitigación [s]
Casa de humos	2.5	352	20.19
Casa de humos	2.5	358	20.16
Casa de humos	2.8	397	20.56
Casa de humos	2.9	423	21.68
Paila de fuego	1.2	317	8.93
Paila de fuego	1.2	334	9.15

Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Todos los intentos de mitigación de incendio se cumplieron con éxito cuando el extintor tenía una carga del 100%, se intentó mitigar un incendio con un extintor ya usado en una prueba anterior y

la presión del mismo se perdió por lo cual no fue posible cumplir con el cometido. El tiempo máximo de descarga de un extintor de tipo PQS es de 25 segundos, en las 6 pruebas realizadas con éxito, ninguna supera este tiempo y se asegura la extinción total del fuego.

Una observación adicional fue sobre el control de activación del extintor, es conocido que la gran mayoría de tipos de extintores son activados una única vez y se lo debe utilizar hasta que se agote, ya que no se puede volver a sellar totalmente y esto provoca la despresurización del mismo. Una alternativa presentada por los expertos fue la utilización de extintores de CO₂ ya que estos permiten la opción de ser utilizados varias veces, aunque por recomendaciones técnicas este tipo de extintores se debe recargar al estar al 50% de su capacidad y es exclusivo para incendios de clase C. Se deja abierta la opción del estudio o implementación de un mejor sistema de mitigación para posteriores investigaciones.

4.4. Pruebas de temperatura soportadas por el robot

Para las pruebas de temperatura se utilizó un pirómetro FLUKE 62 MAX, tomando lecturas en la paila de fuego y estimando los valores en la casa de humos. No se realizó mediciones en la casa de humos por el riesgo al que se exponían los bomberos permaneciendo dentro de la casa durante el incendio. La temperatura dependió de la cantidad de combustible, el material presente durante el incendio y el nivel de concentración de gases x el hacinamiento del lugar. Las mediciones fueron realizadas por el personal de la Cía. X-5 de la empresa pública EMBA-EP y avaladas en el certificado entregado por parte de dicha empresa el día 07 de abril de 2017, según oficio N° 247-GEMBA-EP-2017. En la figura 11-4 se puede observar imágenes de las lecturas de temperatura realizadas.



Figura 11-4. Muestras de temperatura del incendio y soportadas por el robot.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Se debe indicar que robot va predispuesto a mitigar el incendio en el menor tiempo posible, así la temperatura disminuye a media que se mitiga y el robot no sufre daños. Mientras que existen otro tipo de robots que no disponen de un sistema de mitigación de fuego y soportan mayores temperaturas durante un tiempo prolongado y es necesario disponer de protección adicional. En el caso del presente proyecto de investigación según los requerimientos planteados, se cumple con la temperatura mínima a soportar antes de la mitigación del incendio de baja escala.

4.5. Pruebas de acceso del robot a la casa de humos

Durante las pruebas de desplazamiento del robot sobre terreno irregular y las pruebas de superación de rampa se observó el funcionamiento adecuado del robot, en las pruebas en el Centro de Capacitación y Entrenamiento de la empresa pública EMBA-EP se comprobó este funcionamiento al ingresar exitosamente en la casa de humos. Esta edificación tiene las medidas estándar de construcción para una casa, en cuanto a puertas corredores y cuartos se refiere. En la figura 12-4 se puede observar al robot móvil ingresar y desplazarse sin inconvenientes dentro de la casa de humos, así el robot se encuentra en la capacidad de ingresar a hogares para mitigar incendios de ser necesario.



Figura 12-4. Imágenes del ingreso del robot a la casa de humos.

Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Es robot puede ingresar con facilidad a una casa y mitigar incendios, evitando así que el bombero se exponga directamente al fuego. El bombero podría manipular el robot móvil desde una zona segura, mitigar el fuego y posterior a eso ingresar al lugar para la evacuación del lugar. Reduciendo además el riesgo que el bombero se encuentre dentro del lugar y se produzca una explosión de objetos como tanques de gas por las altas temperaturas durante el incendio.

4.6. Funcionamiento de transmisión de video desde el robot a la interfaz de control

Como se mencionó en el capítulo de diseño el video se puede recibir en distintos dispositivos móviles, como celulares, computadoras portátiles, monitores y TVs. Dependerá del escenario de búsqueda o incendio, para la selección del dispositivo de monitoreo. En el centro de capacitación y entrenamiento de la empresa pública EMBA-EP no se disponía de monitores portátiles y el lugar es aislado a propósito para realizar las pruebas con fuego, así que la recepción del video se realizó en dos celulares de gama media. Adicional se puso en modo grabación la cámara GO Pro para analizar los videos durante la mitigación de incendios. En la figura 13-4 se puede observar algunas imágenes tomadas en modo video de la cámara GO Pro. Durante las pruebas se observó que la recepción de video sufrió un retardo de acuerdo a la distancia que se encontraba el robot del operador, esto se puede observar en la tabla 6-4.



Figura 13-4. Imágenes tomadas por la cámara GO Pro.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Tabla 6-4: Análisis de tiempos de retardo en la transmisión de video durante la mitigación de incendios en el interior de la casa de humos y en el exterior.

Escenario de incendio	Distancia entre el operador y el robot [m]	Retardo del video [ms]
Casa de humos	50	60
Casa de humos	100	97
Casa de humos	150	145
Exterior	50	30
Exterior	100	68
Exterior	150	127

Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017.

Los retardos de videos no son muy altos y permiten realizar un monitoreo del área sin mayor dificultad. La calidad del video permite el reconocimiento de personas para ser detectadas en un entorno de escombros.

4.7. Demostración de la hipótesis.

Es posible implementar un robot móvil que disponga de un sistema de tracción para desplazarse en superficies irregulares, que cumpla con tareas de búsqueda de personas posterior a un sismo y mitigar incendios de baja escala.

Las variables principales para demostrar la hipótesis son: la velocidad, la temperatura soportada y el tiempo de mitigación de un incendio de baja escala.

Contraste de hipótesis: velocidad

Hipótesis nula H_0 : $V \leq V_0 = 10 \text{ Km/h}$

Hipótesis alternativa H_1 : $V > V_0 = 10 \text{ Km/h}$

Donde:

V es la velocidad de desplazamiento del robot móvil.

V_0 es la velocidad establecida en los requerimientos del robot móvil.

$\bar{x} = 10.28$

$\sigma = 0.0604$

$n = 6$

$\alpha = 0.05$

Utilizando el estadístico de contraste de la hipótesis, de acuerdo a la distribución t de Student se tiene:

$$t = \frac{\bar{x} - V_0}{\sigma / \sqrt{n}} = 11.2197$$

La región crítica es: $(2.015, +\infty)$, como 11.2197 pertenece a la región crítica:

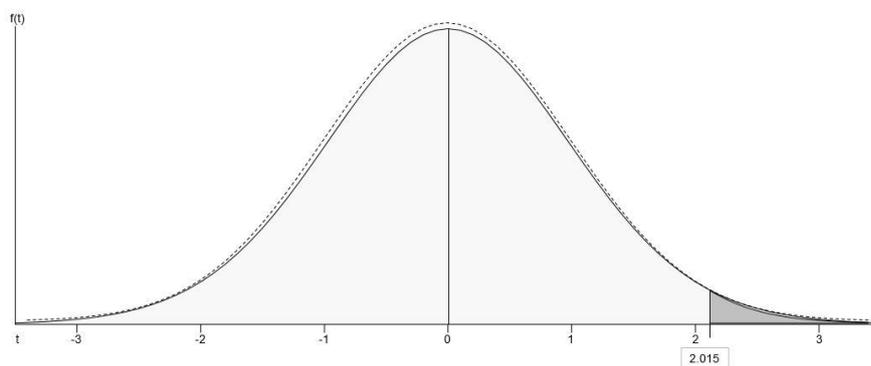


Figura 14-4. Contraste hipótesis velocidad del robot móvil.

Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017

Se rechaza H_0 y se acepta la hipótesis alternativa H_1 , demostrando que la velocidad es superior a la establecida en los requerimientos del robot móvil.

Contraste de hipótesis: temperatura soportada

Hipótesis nula H_0 : $T \leq T_0 = 300^\circ\text{C}$

Hipótesis alternativa H_1 : $T > T_0 = 300^\circ\text{C}$

Donde:

T es la temperatura soportada por el robot móvil.

T_0 es la temperatura mínima que debe el robot móvil.

$\bar{x} = 381,41$

$\sigma = 40,9863$

$n = 4$

$\alpha = 0,05$

Utilizando el estadístico de contraste de la hipótesis, de acuerdo a la distribución t de Student se tiene:

$$t = \frac{\bar{x} - V_0}{\sigma / \sqrt{n}} = 2.8089$$

La región crítica es: $(2.015, +\infty)$, como 2.8089 pertenece a la región crítica:

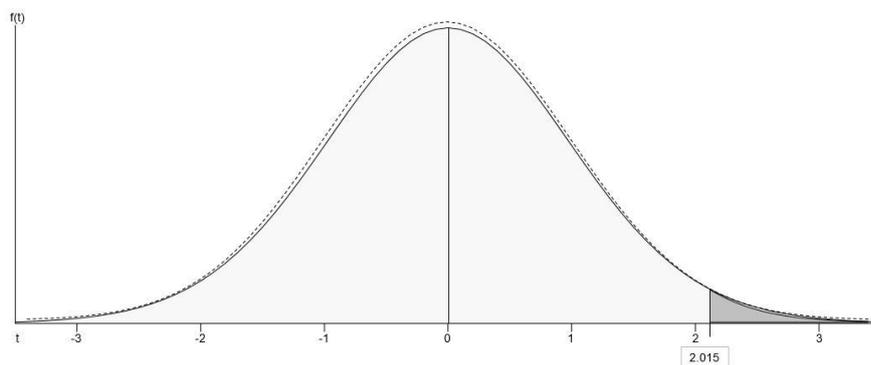


Figura 15-4. Contraste hipótesis temperatura soportada por el robot móvil.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017

Se rechaza H_0 y se acepta la hipótesis alternativa H_1 , demostrando que la temperatura soportada por el robot es superior a la mínima establecida en los requerimientos del robot móvil.

Contraste de Hipótesis: tiempo de mitigación

Hipótesis nula $H_0: t \geq t_0 = 25$ seg.

Hipótesis alternativa $H_1: t < t_0 = 25$ seg.

Donde:

t es el tiempo de mitigación de un incendio a baja escala realizada por el robot móvil.

t_0 es el tiempo que tarda un extintor de 10 libras de PQS en descargarse por completo.

$\bar{x} = 20,64$

$\sigma = 0,8679$

$n = 4$

$\alpha = 0,05$

Utilizando el estadístico de contraste de la hipótesis, de acuerdo a la distribución t de Student se tiene:

$$t = \frac{\bar{x} - V_0}{\sigma / \sqrt{n}} = -10.0501$$

La región crítica es: $(-\infty, -2.1320)$, como -10.0501 pertenece a la región crítica:

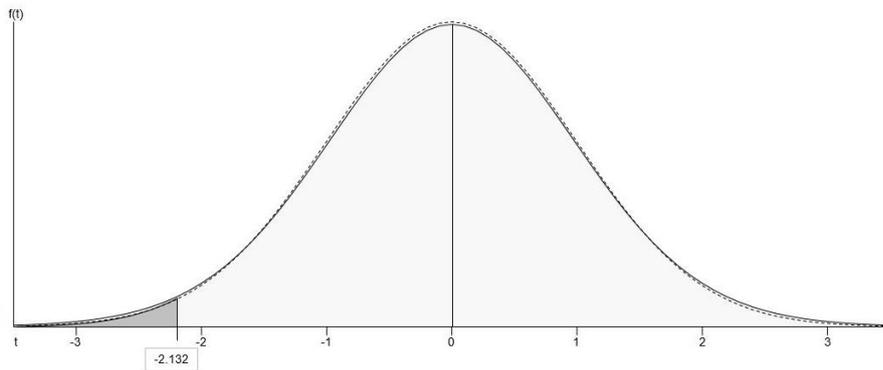


Figura 16-4. Contraste hipótesis tiempo mitigación de incendio de baja escala.
Realizado por: SANCHEZ, Miguel, 2017

Se rechaza H_0 y se acepta la hipótesis alternativa H_1 , demostrando que el tiempo de mitigación de un incendio de baja escala realizada por el robot móvil es menor al tiempo de descarga completa de un extintor de 10 libras de capacidad.

Por tanto, se puede aceptar que si es posible implementar un robot móvil que disponga de un sistema de tracción para desplazarse en superficies irregulares, que cumpla con tareas de búsqueda posterior a un sismo y la ayuda a la mitigación de incendios de baja escala. Disminuyendo el peligro al que se exponen sus operadores. Las pruebas fueron supervisadas por el personal de la Cía. X-5 de la empresa pública EMBA-EP y avaladas en el certificado entregado por parte de dicha empresa el día 07 de abril de 2017, según oficio N° 247-GEMBA-EP-2017 por el gerente general de la misma.

PROPUESTA

- Desarrollar algoritmos de control para que la plataforma robótica móvil sea autónoma y esté en la capacidad de planificar trayectorias mediante herramientas de la inteligencia artificial.
- Implementar un sistema de sensores infrarrojos para que la localización de personas luego de ocurrido un desastre se pueda realizar en menor tiempo.
- Implementar un sistema de transmisión de datos de largo alcance para que la plataforma robótica móvil esté en la capacidad de realizar búsquedas de personas desaparecidas en zonas de difícil acceso.
- Implementar un sistema para desactivar o evacuar objetos explosivos, así la plataforma robótica móvil podría ayudar en operaciones en zonas minadas requeridas por elementos militares.

CONCLUSIONES

- Se analizó los distintos sistemas de tracción de robots y se seleccionó el sistema de tipo orugas para que el robot se pueda desplazar en áreas con escombros. El sistema de tracción de tipo ruedas no puede desplazarse a través de obstáculos superiores al 45% del tamaño de sus llantas. El sistema de tracción por patas puede atascar entre los escombros que se presentan posterior a un sismo. El sistema de tracción tipo oruga es capaz de superar objetos mayores al 45% de la altura del robot, desplazarse en distintas superficies sin reducir de manera significativa su velocidad e incluso deslizarse a través de rampas con una inclinación entre 15deg a 30 deg.
- Se diseñó e implementó una plataforma robótica móvil con los accesorios necesarios para tener acceso a zonas afectadas por sismos. Su forma es trapezoidal, permitiéndole superar escombros y rampas. Se descartó la forma rectangular por su dificultad para superar rampas y la forma circular por no acoplarse al sistema de tracción seleccionado (tipo orugas). Para las medidas de la plataforma robótica móvil se consideró como referencia máxima las medidas estándar de construcción, las medidas son; 90 cm de largo, 60 cm de ancho y 50 cm de alto (con el brazo retraído). Con estas medidas el robot se puede desplazar libremente a través de puertas y pasillos dentro de una casa. El material del cual está construido el robot es hierro para que soporte golpes, y caídas de pequeños escombros sobre el mismo. Además, por la temperatura mínima de 300°C que debe soportar el robot se optó por construir las orugas del mismo material.
- Se diseñó e implementó un sistema de mitigación de incendios de baja escala, constituido por un extintor de PQS con 10 libras de capacidad, una electroválvula para la activación y un brazo robótico con 4 GDL que realice los movimientos necesarios para la mitigación. En las pruebas realizadas en el centro de capacitación y entrenamiento de la empresa pública EMBA-EP, se determinó que el sistema puede mitigar incendios de baja escala en un tiempo máximo de 21.68 segundos. El tiempo máximo de descarga del extintor es 25 segundos, así se asegura la mitigación completa con un extintor cargado al 100%.
- Se implementó un sistema de transmisión de datos para el monitoreo y control del robot móvil. El monitoreo se realizó mediante cámaras WiFi que transmitieron el video hacia dispositivos móviles a una distancia de 150 m sin perder la comunicación y ligeros retardos. La cámara GoPro HERO 3 tiene la posibilidad de grabar video durante la mitigación de incendios de baja escala para realizar evaluaciones de funcionamiento de

robot móvil. Para el control del robot móvil y accesorios se utilizó controles RF de 2,4 GHz y codificación PPM, lo cual permitió una comunicación con retardos máximos de 30 a 40 milisegundos y tener un alcance de 150 m sin pérdida del enlace. El alcance de 150 m se midió con interferencia de edificaciones, en línea de vista directa el alcance supera esta distancia.

- Se validó el funcionamiento de los sistemas de transmisión de datos, control y de locomoción de la plataforma robótica móvil mediante las pruebas de campo realizadas en el Centro de Capacitación y Entrenamiento de la empresa pública EMBA-EP. Con las pruebas de desplazamiento se verificó que el sistema de locomoción seleccionado le permite al robot recorrer sobre terreno irregular a una velocidad entre 9,9 y 10,03 Km/h de acuerdo al tipo de superficie. Se comprobó que el sistema de transmisión de datos de control y monitoreo tiene un alcance máximo de 150 m sin pérdida de comunicación, recibiendo el video en un dispositivo móvil y sin perder el control de movimientos del robot. Adicional la distancia de 150 m entre el robot y el operador, permite minimiza el riesgo a que se expone un bombero durante la mitigación de incendios de baja escala. Todas estas pruebas fueron certificadas por el Crnl. (SP) MSc. Mario Carrillo Rosero gerente general EMBA-EP según oficio N° 247-GEMBA-EP-2017 con fecha 07 de abril de 2017.

RECOMENDACIONES

- El robot móvil dispone de una hora de autonomía del robot, se recomienda utilizar baterías de tipo selladas de 24 V y 500 Ah para que pueda realizar búsquedas de hasta 8 horas continuas.
- Se recomienda implementar contenedores de kits de primeros auxilios resistentes, que puedan ser entregados a víctimas hasta que pueda intervenir el equipo de rescate de ser necesario.
- El sistema de transmisión del robot móvil le permite subir rampas con un grado de inclinación de hasta 30 deg se recomienda realizar un estudio de factibilidad técnica para que pueda superar rampas de mayor inclinación y gradas para el ingreso a hogares de más de una planta.
- Por recomendación de los miembros de la Cía. X-5 de la empresa pública EMBA-EP se sugiere utilizar un extintor de CO₂. A cambio del PQS, para evitar daños en el robot pues el PQS es corrosivo y a medida que se acumula puede causar un corto circuito.
- Se recomienda que el robot móvil sea controlado por dos operadores debido al número de palancas que se requiere, de este modo el primer operador controlaría los movimientos de la plataforma robótica móvil y el segundo operador los movimientos del brazo robótico para realizar la mitigación de incendios de baja escala.

BIBLIOGRAFÍA

- **Andaluz Ortiz, G. M.** (2011). Modelación, Identificación y Control de Robots Móviles (Doctoral dissertation, QUITO/EPN/2011).
- **Andaluz, V. H., Quevedo, W. X., Chicaiza, F. A., Varela, J., Gallardo, C., Sánchez, J. S., & Arteaga, O.** (2016). Transparency of a bilateral tele-operation scheme of a mobile manipulator robot. In International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics (pp. 228-245). Springer International Publishing.
- **Argudo Cobos, G. S., & Arpi Saldaña, A. D.** (2012). Diseño y construcción de un robot móvil tele operado para la asistencia en operaciones de alto riesgo del Cuerpo de Bomberos (Bachelor's thesis).
- **Barrientos, A.** (2002). Nuevas aplicaciones de la robótica. Robots de servicio. Avances en robótica y visión por computador. Cuenca, Ediciones Castilla-La Mancha, 288.
- **Bermudez, G., Novoa, K. S., & Infante, W.** (2004). La robótica en actividades de búsqueda y rescate urbano. Origen, actualidad y perspectivas. Revista Tecnura, 8(15), 97-108.
- **Bermudez, G., & Sierra, P.** (2006). Robot para la Detección de Focos de Incendio Flamebot. IV Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá DC-Colombia.
- **Casper, J., Micire, M., and Gang, R.** (2004). Search and rescue robotics. In Proceedings of the 3rd International Conference on Continental Earthquakes.
- **Chaglla, M., Raúl, D., & Pereira Salazar, R. P.** (2014). Diseño, construcción e implementación de un prototipo de robot móvil para el recorrido de trayectorias definidas por computador para el laboratorio de robótica industrial DECEM (Bachelor's thesis, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería en Mecatrónica).
- **Chen, I. M.** (2015). Modular robots. In Handbook of manufacturing engineering and technology (pp. 2129-2168). Springer London.

- **del Río, C. R., Estévez, A. M., & Bruzón, E. R.** Capítulo 2 Hacia el Laboratorio Virtual Definitivo. TICAI, 15.
- **Dorigo, M., Floreano, D., Gambardella, L. M., Mondada, F., Nolfi, S., Baaboura, T., ... & Burnier, D.** (2013). Swarmanoid: a novel concept for the study of heterogeneous robotic swarms. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 20(4), 60-71.
- **Drenner, A., Janssen, M., Kottas, A., Kossett, A., Carlson, C., Lloyd, R., & Papanikolopoulos, N.** (2013). Coordination and longevity in multi-robot teams involving miniature robots. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 72(2), 263.
- **Forouzan, B. A. B. A.** (2007). Transmisión de datos y redes de comunicaciones. McGraw-Hill.
- **Huitzil, I., Benítez, A., Hernandez, A., Flores, O., & Luna, A.** (2014). Propuesta de un paquete integrado para el desarrollo de protótipos robóticos. de *Cuerpos Académicos*, 67.
- **Kleiner, S., & Kramer, C.** (2013). Model based design with systems engineering based on RFLP using V6. In *Smart Product Engineering* (pp. 93-102). Springer Berlin Heidelberg.
- **Kwon, Y. S., & Yi, B. J.** (2012). Design and motion planning of a two-module collaborative indoor pipeline inspection robot. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(3), 681-696.
- **Li, Z., & Du, R.** (2013). Design and analysis of a bio-inspired wire-driven multi-section flexible robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10(4), 209.
- **Liedke, J., Matthias, R., Winkler, L., & Wörn, H.** (2013, July). The collective self-reconfigurable modular organism (CoSMO). In *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2013 IEEE/ASME International Conference on* (pp. 1-6). IEEE.
- **Liljebäck, P., Pettersen, K. Y., Stavadahl, Ø., & Gravdahl, J. T.** (2012). A review on modelling, implementation, and control of snake robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 60(1), 29-40.
- **Murphy, R. R., Tadokoro, S., & Kleiner, A.** (2016). Disaster robotics. In *Springer Handbook of Robotics* (pp. 1577-1604). Springer International Publishing.

- **Murphy, R. R.** (2000). Marsupial and shape-shifting robots for urban search and rescue. *IEEE Intelligent Systems and their applications*, 15(2), 14-19.
- **Niemeyer, G., Preusche, C., Stramigioli, S., & Lee, D.** (2016). Telerobotics. In *Springer handbook of robotics* (pp. 1085-1108). Springer International Publishing.
- **Nieves, J., & Aristizábal, J.** (2013). Implementación de un Prototipo de Sistema Fotovoltaico Autónomo: Construcción, Caracterización y Monitoreo.
- **Pérez Roque, F., Valdés Zaldívar, E., & Arias de Fuentes, O.** (2013). Sistema de Adquisición de Datos con comunicación inalámbrica. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 34(3), 63-73.
- **Wright, C., Buchan, A., Brown, B., Geist, J., Schwerin, M., Rollinson, D., ... & Choset, H.** (2012). Design and architecture of the unified modular snake robot. In *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on* (pp. 4347-4354). IEEE.
- **Yang, K., Wang, X. Y., Ge, T., & Wu, C.** (2014). Dynamic model of underwater snake-like robot using Kane's method. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 19, 146-154.
- **Zhang, H., Wang, W., Deng, Z., Zong, G., & Zhang, J.** (2006). A novel reconfigurable robot for urban search and rescue. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 3(4), 48.

ANEXOS

ANEXO A. Solicitud de autorización para realizar pruebas en la empresa EMBA-EP.

Ambato, 23 de febrero de 2017

Cnrl. (SP)
Mario Carrillo

GERENTE DE LA EMBA-EP

Presente.-

De mi consideración:

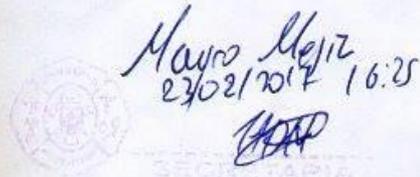
Reciba un atento y cordial saludo, a la vez que me permito solicitar de la manera más comedida se autorice al personal pertinente para la colaboración en las pruebas de un proyecto de investigación correspondiente a la tesis de maestría: **"Desarrollo de una plataforma robótica móvil para búsqueda posterior a un sismo, y mitigación de incendios de baja escala"**, realizada en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Con las pruebas se pretende determinar la eficiencia para mitigar el inicio de un incendio de baja escala mediante un extintor que va sobre un robot, para lo cual solicito su ayuda con las instalaciones necesarias para simular un incendio, equipo de protección, equipos para determinar la temperatura que soportará el robot y de ser posible un escenario posterior a un sismo el día martes 28 de febrero del presente año. Del mismo modo solicito comedidamente se me pueda extender un certificado avalando que se realizaron las pruebas, para sustentar mi tesis, realizada por: Luis Miguel Sánchez Muyulema con C.C.: 1804277158, correo electrónico: lmiguelsanchezm@gmail.com, celular: 0996914866.

Por la favorable atención a la presente, le agradezco.

Atentamente,



Ing. Luis Miguel Sánchez M.
C.C.: 1804277158



Mario Mejiz
23/02/2017 16:25
SECRETARIA

ANEXO B. Autorización para realizar pruebas en la empresa EMBA-EP.

EMPRESA MUNICIPAL CUERPO DE BOMBEROS DE AMBATO-EMPRESA PÚBLICA
GERENCIA GENERAL
Av. Unidad Nacional y González Suárez

Oficio N° 155-GEMBA-EP-2017
Ambato, 02 de marzo de 2017

Ingeniero
Luis Miguel Sánchez M.
Presente

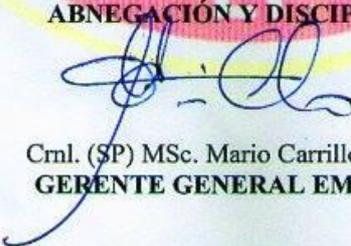
De mi consideración:

En atención a su Oficio sin número, de fecha 23 de febrero de 2017, tendiente a conseguir se autorice al personal pertinente para la colaboración en la pruebas de un proyecto de investigación correspondiente a la tesis de maestría: "Desarrollo de una plataforma robótica móvil para búsqueda posterior a un sismo, y mitigación de incendios de baja escala", realizada en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo; al respecto, me permito indicar lo siguiente:

- Se facilitará la casa de humo o la paila de fuegos en el Centro de Capacitación y Entrenamiento y la presencia de tres Bomberos de la Cía. X-5 en la prueba de incendio, para lo que el interesado debe poner el combustible y los extintores de ser necesarios.
- Se facilitará un equipo de protección contra incendios.
- No se dispone de equipos para determinar la temperatura.
- No se dispone de infraestructura posterior a un sismo.
- La certificación se otorgará solamente del trabajo realizado.

Particular que comunico para los fines consiguientes.

Atentamente,
ABNEGACIÓN Y DISCIPLINA


Cml. (SP) MSc. Mario Carrillo Rosero
GERENTE GENERAL EMBA-EP

GCI/fb
02/03/2017

c.c.: Cml. Marco Sánchez A., PRIMER JEFE EMBA-EP

ANEXO C. Solicitud certificación de las pruebas en la empresa EMBA-EP.

Ambato, 16 de marzo de 2017

CrnI. (SP)

MSc. Mario Carrillo Rosero

GERENTE GENERAL EMBA-EP

Presente

De mi consideración:

Reciba un atento y cordial saludo, a la vez que me permito agradecerle a su noble institución a través de su persona por la colaboración en las pruebas de mi proyecto de investigación correspondiente a una tesis de maestría "Desarrollo de una plataforma robótica móvil para búsqueda posterior a un sismo, y mitigación de incendios de baja escala", realizada en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. A los miembros del tercer pelotón de la Cía. X-5: señores bomberos Bladimir Jácome y Bryan Lizana, a cargo del señor Sargento Pablo Oña; que muy amablemente nos brindaron su apoyo. Muestra de la insigne educación que reciben los miembros de tan ilustre institución. Del mismo modo me permito solicitar de la manera más comedida se me extienda un certificado para avalar el funcionamiento de mi tesis, las actividades realizadas y que pueden constatar los presentes fueron:

1. Pruebas de desplazamiento del robot en terreno irregular.
2. Pruebas de carga extra soportada por el robot.
3. Pruebas de mitigación de incendios de baja escala.
4. Pruebas de temperatura soportadas por el robot (400 °C).
5. Pruebas de acceso del robot a la casa de humos.
6. Funcionamiento de transmisión de video desde el robot a la interfaz de control.

Para constancia de las pruebas anexo imágenes de las actividades realizadas.

Seguro de contar con su valiosa certificación, que ayudará a la aprobación de mi tesis y con el deseo de realizar futuros trabajos de investigación en conjunto con su institución, le quedo muy agradecido.



Ing. Luis Miguel Sánchez M.

C.C.: 1804277158 correo electrónico: lmiguelsanchezm@gmail.com, celular: 0996914866



16/03/17 16:09
SECRETARIA

C-6

ANEXO D. Certificación de las pruebas en la empresa EMBA-EP.

**EMPRESA MUNICIPAL CUERPO DE BOMBEROS DE AMBATO-EMPRESA PÚBLICA
GERENCIA**

Av. Unidad Nacional y González Suárez

Oficio N° 247-GEMBA-EP-2017
Ambato, 07 de abril de 2017.

Ingeniero
Luis Miguel Sánchez M.
Presente

De mi consideración:

Por el presente me permito **CERTIFICAR** que el Ingeniero Luis Miguel Sánchez M., dentro de su proyecto de investigación, correspondiente a la tesis de maestría “Desarrollo de una plataforma robótica móvil para búsqueda posterior a un sismo, y mitigación de incendios de baja escala”, realizó en el Centro de Capacitación y Entrenamiento de la EMBA-EP, pruebas con un robot, siendo estas:

- Pruebas de desplazamiento del robot en terreno irregular.
- Pruebas de carga extra soportada por el robot.
- Pruebas de mitigación de incendios de baja escala.
- Pruebas de temperatura soportadas por el robot (400°).
- Pruebas de acceso del robot a la casa de humo.
- Funcionamiento de transmisión de video desde el robot a la interfaz de control.

Particular que comunico para los fines consiguientes.

Atentamente,

ABNEGACIÓN Y DISCIPLINA

Cml. (SP) MSc. Mario Carrillo Rogero
GERENTE GENERAL EMBA-EP

GJC/eg
07/04/2017

ANEXO E. Manual de usuario del control RF de 2.4Ghz FlySky.

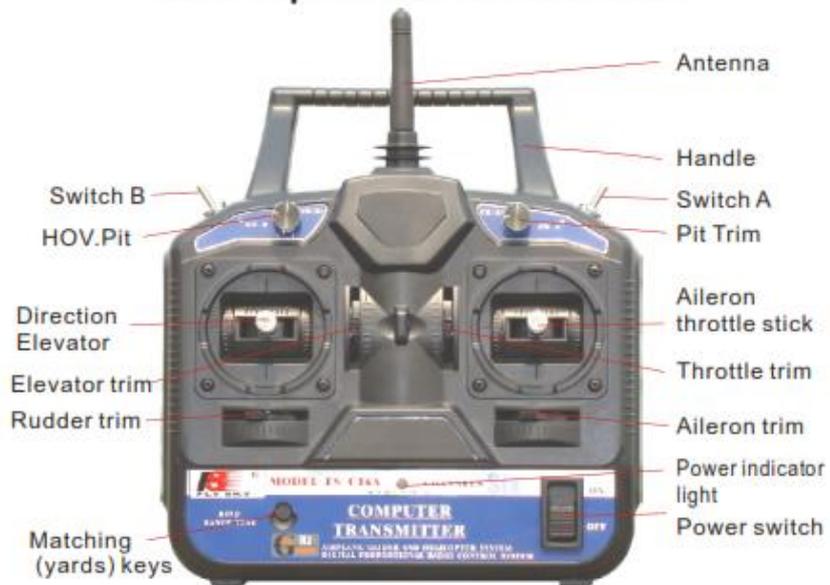


Notes

Model: FS-CT6A

2.4G 6 Channel remote system

8. Each part of the transmitter



Front



Back



Side

10. 2. 4G Operation notes

This is 2.4 G Frequency model products make of automatic address code. It use digital transmission mode, and this prevent outside interference effective active and passive.

10. 01 Matching (code)

Our products are well matched in the factory, you do not need to match by yourself. But if your are going to match the receiver with other transmitter, please follow the following steps:

1. Install the battery to 2.4G transmitter and shut it down.
2. Insert the matching lines to the channel Bat port of the receiver. (Figure.1)
3. Connect the receiver battery to any one of the channel port, on the same time the two LED are flashing and this means the receiver are going to the match status.
4. Press and hold the button on the transmitter, and then switch on the power supply.
5. Observe the LED on the receiver, if found that the LED is not flash anymore and that means successful matched. (This process about 10s)
6. Release the match button on the transmitter, take out the match line.
7. Install the server and then test.
8. If the tests fail, please repeat the action above.
9. If the tests success, then insert the power supply port into BAT, match complete. (The above ways of match is only suitable on FLYSKY 2.4G products)

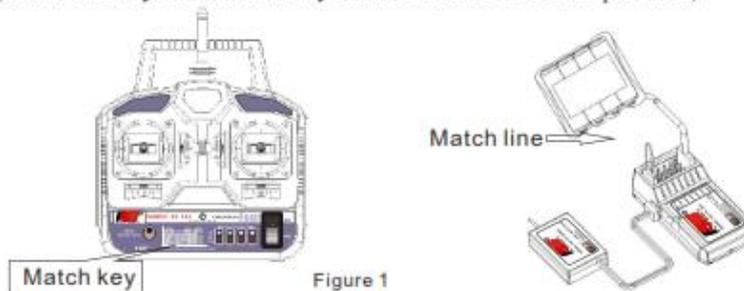


Figure 1

10. 02 Boot

1. Connect every part.
2. Switch on the power supply.
3. Connect the power supply.
4. Receive LED light solid.
5. Finish and use.

12. Computer software installation

FS-CT6A use the new computer programmable model design, every function of transmitter can be setup by computer. It makes you enjoy the fun of high-tech models.

12. 01 PC software download:

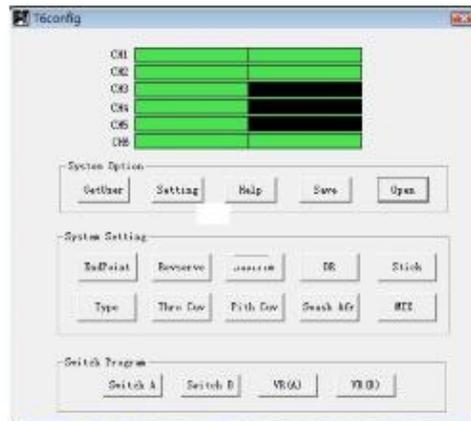
You can download from our website : WWW.FLYSKYCHINA.COM

12. 02 PC software installation:

1. Install driver software: FS-CT6DRIVER001. EXE
2. Install application software: FS-CT6SOFTWARE. EXE
3. Restare computer.
4. Installation completed.

12. 03 PC software application:

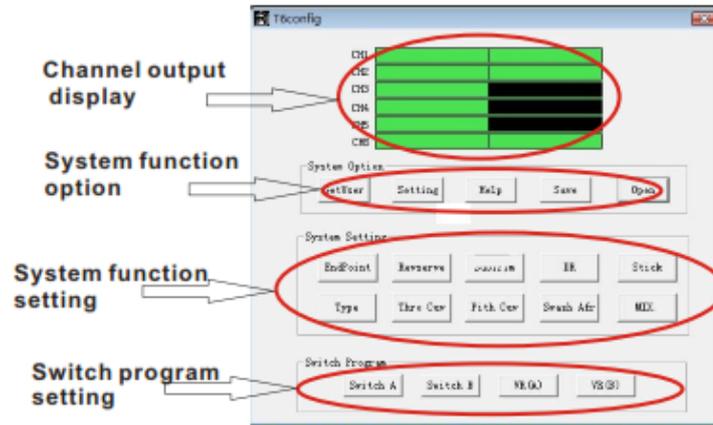
1. Install the battery to the transmitter and switch on the power.
2. Connect the transmitter, programming line and pc.
3. Left double-click the application icon and show up the following screen.



Application interface

13. Transmitter function notes (Heli)

Connect the transmitter programming line with pc, switch on the transmitter and application software. If you choose these types of heli (HELI90, HELI120, HELI140) the following interface will appear:



13. 01 System function option:

GETUSER: Import the transmitter data to pc.

When programming, please use GETUSER button to transfer the data to PC after make sure the setting function, this prevent the data overwrite.

Left click the 'SETTING' button, the screen on the right will appear, this system function is use for the programming line USB port selection, it improves the communication of Transmitter and PC. If select wrongly, the channel output display will not have any data changes and all other settings are invalid.



Press 'ok' button after finished selecting.

Left click the 'HELP' button on the interface, and the interface on the right will appear, this interface offer you some services information.



2. 4G 6 Channel remote system

Left click the 'SAVE' button on the interface, the screen on the right will appear, this function is for save all your settings. in theory, you can set up numerous types and save.

You can give it a name, and left click the 'save' button to save.



Left click the 'OPEN' button on the main interface, the screen on the right will appear, this system function is for the parameters setting.

Left click the 'save' button after select finished.



13. 02 System function settings

Left click the 'ENDPOINT' button on the interface, the screen on the right will appear, this function is use for adjust the movement of server to a suitable angel for a better control.

Each server are allowed to adjust Individual, it has two parts: left half part and right half part. Adjusted value from 0% to 100%, the number can be directly enter from the keyboard.

Left click the 'ok' button to finish the adjustment.

Left click the 'cancel' button to restore.



Left click the 'REVERSE' button on the interface, the screen on the right will appear, this function is use for change the direction of server movement, it keeps the transmitter control direction correspond to the server.

Left click the channel you want to change.

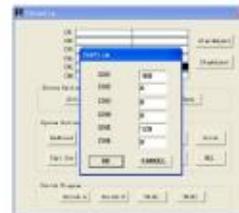
Click 'ok' button to finish the adjustment.



Left click the 'SUBTRIM' button on the interface, the screen on the right will appear, this function is use for adjustment for single server for a better control, improve the yarage of model.

Each server are allowed to adjust Individual, Adjusted value from -120 to 120. Number can be directly entered from the keyboard.

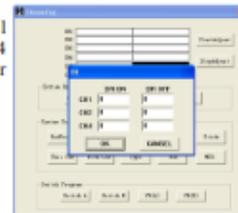
Click 'ok' button to finish the adjustment.



2. 4G 6 Channel remote system

Left click the 'DR' button on the interface, the screen on the right will appear, this function is use for Double ratio control of CH1\CH2\CH4 channel. It gives you the best control of the model. This function offer the great help to beginner.
CH1\CH2\CH4 are allowed to adjust Individual, Adjusted value from 0% to 100%. Number can be directly entered from the keyboard.
This function will only take effect when the 'DR' button is switch on.

Click 'ok' button to finish the adjustment.



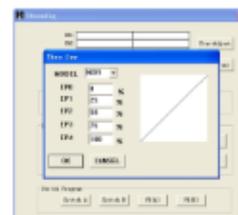
Left click the 'STICK SETTING' button on the interface, the screen on the right will appear, this function is use for control mode adjustment according to different customer's habit, this system offer four different mode to choose.

Click 'ok' button to finish the adjustment.



Left click the 'THRO CUV' button on the interface, the screen on the right will appear, this function is use for the adjustment of engine throttle curve to make it more suitable to the model and Play a better performance, and also improve the yarage of model.
It make up of two parts: normal state(NOR) and Stunt state(IDEL). Each state of the curve are make up by five point, each point can be setup Individually, Adjusted value from 0% to 100%, Number can be directly entered from the keyboard.

Click 'ok' button to finish the adjustment.



Left click the 'PITH CUV' button on the interface, the screen on the right will appear, this function is use for the adjustment of the helicopter PIT, it improves model control and also the yarage of model.
It make up of two parts: normal state(NOR) and Stunt state(IDEL). Each state of the curve are make up by five point, each point can be setup Individually, Adjusted value from 0% to 100%, Number can be directly entered from the keyboard.

Click 'ok' button to finish the adjustment.



Left click the 'TYPE' button on the interface, the screen on the right will appear, this function is use for the model selection.
This system offers four model to select: ACRO, HELI-90, HELI-120, HELI-140.

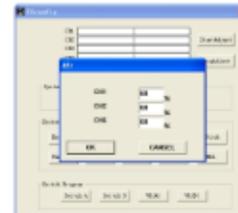
Click 'ok' button to finish the adjustment.



2. 4G 6 Channel remote system

Left click the 'ARF' button on the interface, the screen on the right will appear, this function is use for the swash plate adjustment of CCPM function helicopter, to have a better control. CH1\CH2\CH4 are allowed to adjust Individual, Adjusted value from 0% to 100%. Number can be directly entered from the keyboard.

Click 'ok' button to finish the adjustment.



function is use for the programmable mixed control function, it offers some special function.

This system offers three individual mixed control function(MIX1/MIX2/MIX3)

Source: mixed control source select.

Des: destination select

Up rate: upper part's mixed control ratio (-100%to100%)

Down rate: lower part's mixed control ratio (-100%to100%)

Switch: Activation ways (OFF.ON.SWA.SWB)

Click 'ok' button to finish the adjustment.



13. 03 Switch and Potentiometers settings

Left click the 'SWITCH A' or 'SWITCH B' button on the interface, the screen on the right will appear, this function is use for correspond function select setting of switch A and switch B. following are the choice of content: NULL.DR.NORID.THRO.CUT.

Click 'ok' button to finish the adjustment.



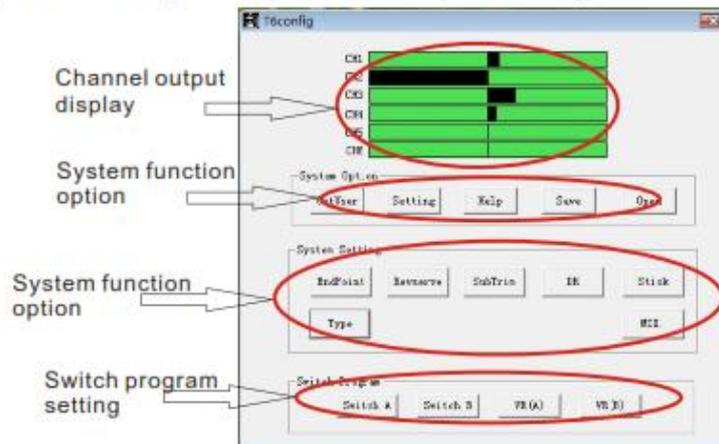
Left click the 'VR (A)' or 'VR (B)' button on the interface, the screen on the right will appear, this function is use for correspond function select setting of both Potentiometers, following are the content setting: NULL.PITHADJUST.

Click 'ok' button to finish the adjustment.



14. Transmitter function notes (Plane)

Connect the transmitter programming line with PC, switch on the transmitter and PC software. When you select Fixed-wing aircraft (ACRO), the following interface will appear:



14. 01 System function option

GETUSER: Import the transmitter data to pc.

When programming, please use GETUSER button to transfer the data to PC after make sure the setting function, this prevent the data overwrite.

Left click the setting button, the screen on the right will appear, this system function is use for the programming line USB port selection, it improves the communication of Transmitter and PC. If select wrongly, the channel output display will not have any data changes and all other settings are invalid.

Press 'ok' button after finished selecting.



Left click the 'help' button on the interface, and the interface on the right will appear, this interface offer you some services information.



2. 4G 6 Channel remote system

Left click the 'SAVE' button on the interface, the screen on the right will appear, this function is for save all your settings. in theory, you can set up numerous types and save.

You can give it a name, and left click the 'save' button to save.



Left click the 'OPEN' button on the main interface, the screen on the right will appear, this system function is for the parameters setting.

Left click the 'save' button after select finished.



13. 02 System function settings

Left click the 'ENDPOINT' button on the interface, the screen on the right will appear, this function is use for adjust the movement of server to a suitable angel for a better control.

Each server are allowed to adjust Individual, it has two parts: left half part and right half part. Adjusted value from 0% to 100%, the number can be directly enter from the keyboard.

Left click the 'ok' button to finish the adjustment.

Left click the 'cancel' button to restore.



Left click the 'REVERSE' button on the interface, the screen on the right will appear, this function is use for change the direction of server movement, it keeps the transmitter control direction correspond to the server.

Left click the channel you want to change.

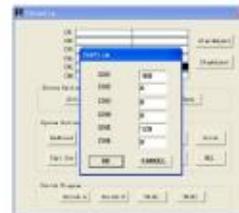
Click 'ok' button to finish the adjustment.



Left click the 'SUBTRIM' button on the interface, the screen on the right will appear, this function is use for adjustment for single server for a better control, improve the yarage of model.

Each server are allowed to adjust Individual, Adjusted value from -120 to 120. Number can be directly entered from the keyboard.

Click 'ok' button to finish the adjustment.



2. 4G 6 Channel remote system

Left click the 'DR' button on the interface, the screen on the right will appear, this function is use for Double ratio control of CH1\CH2\CH4 channel. It gives you the best control of the model. This function offer the great help to beginner.
CH1\CH2\CH4 are allowed to adjust Individual, Adjusted value from 0% to 100%. Number can be directly entered from the keyboard.
This function will only take effect when the 'DR' button is switch on.

Click 'ok' button to finish the adjustment.



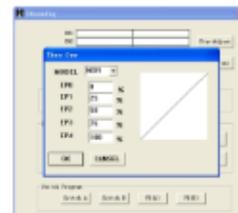
Left click the 'STICK SETTING' button on the interface, the screen on the right will appear, this function is use for control mode adjustment according to different customer's habit, this system offer four different mode to choose.

Click 'ok' button to finish the adjustment.



Left click the 'THRO CUV' button on the interface, the screen on the right will appear, this function is use for the adjustment of engine throttle curve to make it more suitable to the model and Play a better performance, and also improve the yarage of model.
It make up of two parts: normal state(NOR) and Stunt state(IDEL). Each state of the curve are make up by five point, each point can be setup Individually, Adjusted value from 0% to 100%, Number can be directly entered from the keyboard.

Click 'ok' button to finish the adjustment.



Left click the 'PITH CUV' button on the interface, the screen on the right will appear, this function is use for the adjustment of the helicopter PIT, it improves model control and also the yarage of model.
It make up of two parts: normal state(NOR) and Stunt state(IDEL). Each state of the curve are make up by five point, each point can be setup Individually, Adjusted value from 0% to 100%, Number can be directly entered from the keyboard.

Click 'ok' button to finish the adjustment.



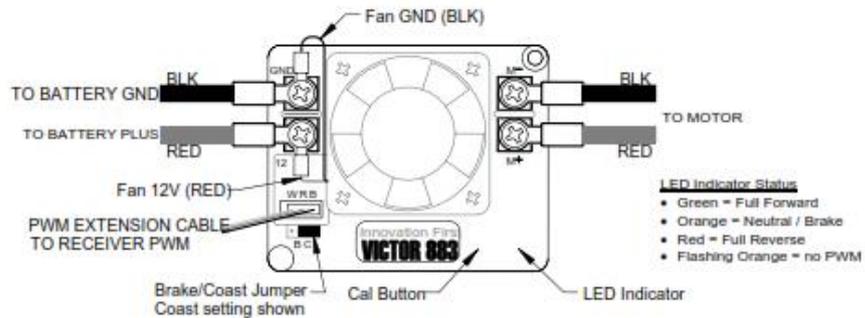
Left click the 'TYPE' button on the interface, the screen on the right will appear, this function is use for the model selection.
This system offers four model to select: ACRO, HELI-90, HELI-120, HELI-140.

Click 'ok' button to finish the adjustment.



The Victor speed controllers are specifically engineered for robotic applications. The high current capacity, low voltage drop, and peak surge capacity make the Victor ideal for drive systems while its braking options and precise control meet the demanding needs of arms and lift systems. This controller safely handles the high continuous current draws and extreme current surges produced by Competition robots. The innovative FET

switching architecture and an integral cooling fan ensures cool FET junction temperatures. The low voltage drop and high switching speed ensures the motor receives maximum power, providing significant improvements in acceleration, direction changes, and lifting torque. The LED indicator will be GREEN in 'full-forward' condition, RED in 'full-reverse' and ORANGE while in neutral.



Wiring Guidelines

1. The fan must be wired so it is always ON when the Victor is ON.
 2. Attach the fan wires and connect to the appropriate voltage.
 3. The input and output wires should be 10AWG wire minimum and firmly connected to ensure low voltage drop and minimal temperature rise.
 4. Use circle lugs designed for your wire size. The lug should have a hole designed for a #6 or #8 screw. If the center hole is too large, (#10 or larger) inadequate mechanical contact may result in excessively high resistance and temperature rise.
 5. Check all lug connection after crimping and soldering. You should not be able to pull the lug off the wire with your hands.
 6. Once the input and output wires are firmly connected, tie the wires using tie straps within 2" of the Victor. This will ensure the wires do not move and loosen the connections.
- WARNING: BEFORE APPLYING POWER:**
1. Ensure the input connections are not reversed. Connecting 24V and GND backwards will destroy the unit.
 2. Ensure that there is not a short circuit on the output. A short circuit will destroy the unit.
 3. Ensure there is a circuit breaker either inline with the 24v power input to the speed controller, or inline with the motor. Use an appropriate circuit breaker for your application to ensure that long term exposure to a stalled motor (high currents) will not overheat the Victor.

PWM Connection

You will need (1) PWM extension cable or PWM Signal Driver.

1. Use a PWM Signal Driver to ensure the signal from your receiver is Victor compatible if you are not using an IFI Control System.
2. The male PWM cable connector connects to the speed controller. The Victor housing is design to provide a firm connection. Trim the shroud corners slightly if necessary for insertion into the Victor.
3. The PWM extension cable should be installed with the black wire towards the fan.
4. Standard Radio Controlled PWM connectors are fragile. Use caution when inserting and removing the PWM cable so the contacts on both connectors are not damaged.

Mounting Guidelines

You will need (2) #4 or #6 screws.

1. The Victor can be installed in any orientation.
2. The speed controller must have adequate space above the fan for airflow, a minimum of 2 inches.
3. Do not over-tighten the mounting screws through the speed controller. A snug connection will hold the speed controller in place without crushing the case.

Calibration Instructions

The Victor is pre-calibrated to values compatible with an IFI Control System and re-calibration is not needed. You can re-calibrate to achieve 'full forward/reverse' from your joystick movement if necessary.

NOTE: While in calibration mode, the Victor will record the max PWM value detected as 'full forward', the min PWM value as 'full reverse', and 'neutral' will be the PWM value recorded at the release of the Cal button. The following steps will guide.

User Calibration:

1. Power ON the speed controller.
2. Press and hold the Cal button. After a moment, the LED indicator on the Victor will begin alternating between RED and GREEN to indicate a cal mode.

3. While continuing to hold the Cal button, move the joystick to the maximum and minimum positions. This can be done in any order and as many times as desired.
4. While continuing to hold the Cal button, return the joystick to center (neutral position).
5. Release the Cal button.
6. A flashing GREEN indicator confirms a successful calibration.
7. A flashing RED indicator denotes an unsuccessful calibration.

An unsuccessful calibration occurs when either:

- a) Insufficient joystick travel was detected in forward and/or reverse.
- b) The trim tab is too far from center.

Resetting Calibration to Factory Pre-calibration:

1. Power OFF the speed controller.
2. Press and hold the Cal button.
3. While continuing to hold the Cal button, Power ON the speed controller.
4. A flashing GREEN indicator denotes calibration is reset. Release the Cal button.

Brake / Coast Configuration

The Brake / Coast jumper is used to set the speed controller's action during a neutral condition. The Brake provides significant resistance to motor rotation and is recommended for motors driving linkages and arms that can be back-driven by gravity or other external forces.

The speed controller checks the status of the jumper approximately 60 times per second. This allows the user to change from brake to coast during operation. A limit switch may be connected to the jumper connector instead of the jumper. The limit switch can be triggered by various means including the use of a servo.

Brake / Coast Guidelines:

1. Always install jumper to prevent loss. If you lose the jumper, a standard computer jumper will work.
2. The Coast condition (Jumper on Inner two Pins) sets the output to an open circuit during neutral.
3. The Brake condition (Jumper on Outer two pins) sets the output to a short across the motor leads during neutral.

Troubleshooting

Indication: No ORANGE indicator on power up.

Problem: Input power issue or joystick trim tab off center.

Possible Solutions:

1. Disconnect PWM cable.
2. If indicator blinks ORANGE, the PWM value that was being received is either between 'neutral' and 'full forward', or between 'neutral' and 'full reverse'. Check joystick trim tab to ensure the controller is not in a partial forward or a partial reverse condition. If no change, check that the joystick and receiver channels match.
3. If indicator remains off, check +V or GND connections for voltage and proper polarity.

Indication: Flashing ORANGE indicator on power up.

Problem: No PWM signal.

Possible Solutions:

1. Ensure the transmitter and receiver are powered ON.
2. The PWM cable may be improperly connected. Check wire color-coding at each end. Check that the connector is not off a pin at the receiver end.
3. Check for a good PWM signal by connecting a known good servo to the PWM extension cable. If the servo does not move, this can indicate either:
 - a) a faulty receiver
 - b) an improperly connected cable
 - c) a bad PWM extension cable

Note: The servo requires that 5V be present on the center pin of the PWM cable. This connection is not required for the Victor.

Indication: Flashing RED indicator after calibration.

Problem: Calibration Failed.

Possible Solutions:

1. Inadequate travel in forward or reverse. Repeat the calibration procedure and move the joystick further forward and/or further reverse.
2. The joystick trim tab is NOT centered. Neutral cannot be extremely far from center.

Indication: No power output from the speed controller although the indicator LED works.

Problem: Possible internal damage.

Possible Solutions:

If the indicator on the Victor is operating properly and there is no output, the Victor may be internally damaged. This condition is typically caused by a short circuit on the output or there has been an over-current condition to caused a failure.

Check the following:

1. Ensure the indicator is changing between ORANGE, RED and GREEN with joystick movement.
2. Disconnect the motor and check the output (M+ to M-) with a voltmeter. The meter should read between \pm Battery voltage with corresponding full range joystick movement.

If the indicator is working properly and the outputs are not working properly, the speed controller is probably damaged. The final test to determine if the Victor is damaged is to replace it with another Victor.

Indication: No power output from the speed controller and the indicator does NOT work.

Problem: No input power or possible internal damage.

Possible Solutions:

If the indicator on the Victor is not operating properly and there is no output, the Victor may be internally damaged. This condition is typically caused by no input power or a reverse polarity on the input.

Check the following:

1. Disconnect the output wires.
2. Ensure the indicator on the Victor will not illuminate at any joystick position.
3. Check the input at the Victor (+BATTERY to GND) with a voltmeter.

If the indicator is not working properly and the input is good, the speed controller is probably damaged. The final test to determine if the Victor is damaged is to replace it with another Victor.

CAUTION: Prior to replacing a potentially damaged speed controller, ensure that the wires connected to the output are not shorted and the input is not reversed. Also verify that neither of the motor output leads are shorted to the chassis of the motor and/or the robot.

ANEXO G. Consideraciones de pérdidas de transmisión en interiores por distancia y penetración según ITU-R P.1238-8.

4

Rec. ITU-R P.1238-8

3.1 Site-general models

The models described in this section are considered to be site-general as they require little path or site information. The indoor radio path loss is characterized by both an average path loss and its associated shadow fading statistics. Several indoor path loss models account for the attenuation of the signal through multiple walls and/or multiple floors. The model described in this section accounts for the loss through multiple floors to allow for such characteristics as frequency reuse between floors. The distance power loss coefficients given below include an implicit allowance for transmission through walls and over and through obstacles, and for other loss mechanisms likely to be encountered within a single floor of a building. Site-specific models would have the option of explicitly accounting for the loss due to each wall instead of including it in the distance model.

The basic model has the following form:

$$L_{total} = L(d_o) + N \log_{10} \frac{d}{d_o} + L_f(n) \quad \text{dB} \quad (1)$$

where:

- N : distance power loss coefficient
- f : frequency (MHz)
- d : separation distance (m) between the base station and portable terminal (where $d > 1$ m)
- d_o : reference distance (m)
- $L(d_o)$: path loss at d_o (dB), for a reference distance d_o at 1 m, and assuming free-space propagation $L(d_o) = 20 \log_{10} f - 28$ where f is in MHz
- L_f : floor penetration loss factor (dB)
- n : number of floors between base station and portable terminal ($n \geq 0$), $L_f = 0$ dB for $n = 0$.

Typical parameters, based on various measurement results, are given in Tables 2 and 3. Additional general guidelines are given at the end of the section.

TABLE 2

Power loss coefficients, N , for indoor transmission loss calculation

Frequency	Residential	Office	Commercial	Factory	Corridor
900 MHz	–	33	20	–	–
1.25 GHz	–	32	22	–	–
1.9 GHz	28	30	22	–	–
2.1 GHz	–	25.5 ⁽⁴⁾	20	21.1	17 ⁽⁹⁾
2.4 GHz	28	30	–	–	–
3.5 GHz	–	27	–	–	–
2.625 GHz	–	44 ⁽²⁾	–	33 ⁽⁶⁾	–
4 GHz	–	28	22	–	–
5.2 GHz	30 ⁽²⁾ 28 ⁽³⁾	31	–	–	–
5.8 GHz	–	24	–	–	–

TABLE 2 (*end*)

Frequency	Residential	Office	Commercial	Factory	Corridor
28 GHz	–	–	27.6 ⁽⁸⁾	–	–
60 GHz ⁽¹⁾	–	22	17	–	16 ⁽⁷⁾⁽⁹⁾
70 GHz ⁽¹⁾	–	22	–	–	–

⁽¹⁾ 60 GHz and 70 GHz values assume propagation within a single room or space, and do not include any allowance for transmission through walls. Gaseous absorption around 60 GHz is also significant for distances greater than about 100 m which may influence frequency reuse distances (see Recommendation ITU-R P.676).

⁽²⁾ Apartment: Single or double storey dwellings for several households. In general most walls separating rooms are concrete walls.

⁽³⁾ House: Single or double storey dwellings for a household. In general most walls separating rooms are wooden walls.

⁽⁴⁾ Computer room where there are many computers around the room.

⁽⁵⁾ Transmitter and receiver are on the same floor and both antennas are set at ceiling height of 2.7 m.

⁽⁶⁾ Path between transmitter and receiver is semi-shielded by metal materials and both antennas height is 1.5 m.

⁽⁷⁾ Transmit and receive antennas have 15.4° beam width.

⁽⁸⁾ Railway station (170 m × 45 m × 21 m(H)) and Airport terminal (650 m × 82 m × 20 m(H)): NLoS case, 60° half-power beam width antenna for transmitter is set at the height of 8 m, and 10° beam width for receiver is set at 1.5 m on the floor. The value was obtained from the maximum path gain among various TX and RX antenna orientations.

⁽⁹⁾ Transmitter and receiver are on LoS corridor.

TABLE 3

Floor penetration loss factors, L_f (dB) with n being the number of floors penetrated, for indoor transmission loss calculation ($n \geq 1$)

Frequency	Residential	Office	Commercial
900 MHz	–	9 (1 floor) 19 (2 floors) 24 (3 floors)	–
1.8-2 GHz	4 n	15 + 4 ($n - 1$)	6 + 3 ($n - 1$)
2.4 GHz	10 ⁽¹⁾ (apartment) 5 (house)	14	
3.5 GHz		18 (1 floor) 26 (2 floors)	
5.2 GHz	13 ⁽¹⁾ (apartment) 7 ⁽²⁾ (house)	16 (1 floor)	–
5.8 GHz		22 (1 floor) 28 (2 floors)	

⁽¹⁾ Per concrete wall.

⁽²⁾ Wooden mortar.