



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL

TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

TEMA: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE  
DETECCIÓN Y MANIPULACIÓN DE SUSTANCIAS PELIGROSAS,  
MEDIANTE EL USO DE SENSADO QUÍMICO Y UN ROBOT MÓVIL  
TELEOPERADO A TRAVÉS DE COMANDOS GESTUALES”

AUTORES:

INGA ORTIZ, RICHARD STALIN

ZORIA ORTEGA, JUAN CARLOS

DIRECTOR: DR. ARCENTALES VITERI, ANDRÉS RICARDO

SANGOLQUÍ

2018



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, *“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN Y MANIPULACIÓN DE SUSTANCIAS PELIGROSAS, MEDIANTE EL USO DE SENSADO QUÍMICO Y UN ROBOT MÓVIL TELEOPERADO A TRAVÉS DE COMANDOS GESTUALES”*, fue realizado por los señores *Inga Ortiz, Richard Stalin y Zoria Ortega, Juan Carlos* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 23 de agosto del 2018

  
Dr. Arcentales Viteri Andrés Ricardo  
C.C.: 1712480746



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, *Inga Ortiz, Richard Stalin y Zoria Ortega, Juan Carlos* declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: ***“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN Y MANIPULACIÓN DE SUSTANCIAS PELIGROSAS, MEDIANTE EL USO DE SENSADO QUÍMICO Y UN ROBOT MÓVIL TELEOPERADO A TRAVÉS DE COMANDOS GESTUALES”***, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciado las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 23 de agosto del 2018

Inga Ortiz Richard Stalin

C.C.: 1720007044

Zoria Ortega Juan Carlos

C.C.: 1718443920



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL

**AUTORIZACIÓN**

Nosotros, *Inga Ortiz, Richard Stalin y Zoria Ortega, Juan Carlos*, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: ***“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN Y MANIPULACIÓN DE SUSTANCIAS PELIGROSAS, MEDIANTE EL USO DE SENSADO QUÍMICO Y UN ROBOT MÓVIL TELEOPERADO A TRAVÉS DE COMANDOS GESTUALES”*** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad

Sangolquí, 23 de agosto del 2018

Inga Ortiz Richard Stalin

C.C.: 1720007044

Zoria Ortega Juan Carlos

C.C.: 1718443920

## **DEDICATORIA**

Este trabajo quiero dedicarlo a mis padres Narcisa Y Daniel, ya que gracias a ellos pude concluir este gran logro.

A mi madre Narcisa por guiarme y aconsejarme en los momentos difíciles, ser mi apoyo incondicional en todo momento y darme esas palabras que necesitaba, esto va por usted Gatita.

A mi padre Daniel por sus consejos, por inculcarme sus valores y sobre todo saber encaminarme por el camino correcto.

A mis hermanos Carlos y Rommel, por aconsejarme y apoyarme en todo momento. Sus consejos me han servido de mucho en toda mi vida.

A mi novia Pamela, por apoyarme en los buenos y malos momentos demostrando ser un pilar fundamental en mi vida.

Y sobre todo este trabajo es constancia de los sacrificios que he realizado durante este arduo camino.

Richard S. Inga O.

## **DEDICATORIA**

Este proyecto quiero dedicarlo a mis padres Manuel y Ligia por haberme inculcado los principios y valores, que sirvieron para tomar decisiones en el transcurso de mi vida.

A mis hermanos Julio y Eliana, a mi cuñado Luis, a mi cuñada Lorena por apoyarme en algunas ocasiones que las necesitaba, por compartir y disfrutar muchos momentos en familia. También va dedicado a mis cinco sobrinos que siempre logran hacerme reír, y en ocasiones enojar.

Por otro lado, también va dedicado a todos mis compañeros y amigos que influyeron con sus ideas para plantear este tema de trabajo.

Finalmente quiero dedicar este trabajo a mí, puesto que fue realizado con mucho esfuerzo y dedicación. También va dedicado a una persona especial que con sus acciones y palabras me motivó siempre a culminar este trabajo.

Juan C. Zoria O.

## AGRADECIMIENTO

Quiero Agradecer a mi tutor Dr. Andrés Arcentales, por encaminarme en todo el desarrollo de este trabajo, por sus consejos y sobre todo su paciencia y dedicación. También agradecer principalmente a mi compañero de titulación Juan, por ser parte importante del desarrollo de este trabajo.

A mi familia, porque gracias a ustedes que siempre estuvieron a mi lado, pude lograr este objetivo tan importante para mí.

A mi novia Pamela, por saber comprender lo duro que fue este camino y sobre todo apoyarme en los momentos más difíciles.

Gracias a mis amigos y docentes de Universidad, Belén, Nadia, Jonathan, Vinicio y Cintya especialmente a Didier que es un amigo incondicional, que me extendió la mano sin esperar nada a cambio. Al Ingeniero Carlos Ponce, por sus consejos impartidos tanto académicos como profesionales.

Al señor Roberto Santamaría, Gerente de Transportes Occidentales por la gran oportunidad que me dio en esta institución.

Richard S. Inga O.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi familia, porque de una u otra manera me han apoyado y han estado junto a mí y con la cual comparto la felicidad de cumplir esta meta profesional. Un agradecimiento especial a Richard porque hemos conformado un buen grupo de trabajo y amistad.

Gracias al Doctor Andrés Arcentales, por confiar, guiar y apoyar en los problemas que se presentaron en este trabajo. Además, por la dedicación tiempo dejando de lado quizá otras actividades e invertirlas en el desarrollo de este trabajo.

Gracias a mis amigos de la Universidad con los que compartí a lo largo de la carrera. A Ingrid que fue compañera durante media vida universitaria y vivimos muchos momentos de felicidad, angustia y en ocasiones de enojo. A Didier, Belén, Nadia, Jonathan, Vinicio, por todas las buenas experiencias y apoyo a lo largo de la carrera.

Finalmente agradecer al Ingeniero Carlos Ponce, por sus consejos impartidos tanto académicos como profesionales.

Juan C. Zoria O.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CERTIFICACIÓN .....</b>	<b>i</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....</b>	<b>ii</b>
<b>AUTORIZACIÓN.....</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS .....</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>x</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Justificación e importancia.....	4
1.3 Alcance del proyecto.....	5
1.4 Objetivos .....	7
1.4.1 Objetivo general .....	7
1.4.2 Objetivos específicos.....	7
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>9</b>

<b>ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>9</b>
2.1      Sistemas Robóticos .....	9
2.1.1    Clasificación de robots .....	9
2.2      Robots móviles .....	11
2.3      Manipuladores robóticos .....	13
2.3.1    Tipos de robots manipuladores. ....	14
2.3.2    Manipuladores teleoperados.....	16
2.3.3    Manipuladores robóticos aplicados a la robótica móvil.....	18
2.4      Sistemas de control para plataformas robóticas móviles.....	20
2.5      Detección de sustancias químicas .....	23
2.5.1    Robótica aplicada a la detección de sustancias .....	24
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>27</b>
<b>DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL .....</b>	<b>27</b>
3.1      Descripción del sistema.....	27
3.2      Hardware de control por gestos.....	28
3.3      Unidad de procesamiento central de los sistemas robóticos. ....	31
3.4      Robot móvil.....	34
3.4.1    Materiales y dimensiones de diseño.....	34
3.4.2    Diseño de la etapa de potencia .....	35
3.5      Manipulador robótico de aproximación .....	40
3.5.1    Dimensionamiento de motores.....	45
3.5.2    Etapa de Potencia .....	46
3.6      Sistema de Sensado Químico .....	48
3.6.1    Especificaciones de los sensores. ....	49
3.6.2    Materiales y dimensiones de diseño.....	52
3.6.3    Diseño de la etapa de potencia .....	53

3.7	Sistemas Auxiliares .....	56
3.7.1	Detección de Metales .....	56
3.7.2	Visión remota .....	57
3.8	Integración de hardware .....	57
<b>CAPÍTULO IV .....</b>		<b>59</b>
<b>SOFTWARE DE CONTROL Y COMUNICACIÓN .....</b>		<b>59</b>
4.1	Introducción .....	59
4.2	Comunicación de los sistemas.....	59
4.2.1	Servidor de la plataforma móvil.....	61
4.2.2	Cliente Myo.....	63
4.2.3	Cliente Raspberry.....	64
4.2.4	Comunicación Servidor – Cámara.....	66
4.3	Software de control .....	66
4.3.1	SDK Myo Armband.....	67
4.3.2	Obtención de información de la Myo Armband.....	68
4.3.3	Control de la plataforma móvil.....	70
4.3.4	Control del manipulador y sensado en TeensyDuino.....	71
<b>CAPÍTULO V .....</b>		<b>74</b>
<b>INTEGRACIÓN DE LOS SUBSISTEMAS .....</b>		<b>74</b>
5.1	Introducción.....	74
5.2	Diseño de la interfaz gráfica.....	75
5.3	Pruebas y Resultados.....	79
5.3.1	Latencia de la comunicación.....	79
5.3.2	Sistema de sensado.....	81
5.3.3	Autonomía de la plataforma robótica móvil.....	86

<b>CAPÍTULO VI .....</b>	<b>87</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>87</b>
6.1      Plataforma robótica móvil .....	87
6.2      Software de control y comunicación .....	89
6.3      Integración de los subsistemas .....	91
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>93</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Asignación de cadena de caracteres en el SDK</i> .....	30
<b>Tabla 2.</b> <i>Característica de los datos espaciales</i> .....	31
<b>Tabla 3.</b> <i>Características Raspberry Pi 3 modelo B</i> .....	32
<b>Tabla 4.</b> <i>Especificaciones técnicas Teensy 3.6</i> .....	33
<b>Tabla 5.</b> <i>Características de Dagu Wild Thumper 6WD.</i> .....	35
<b>Tabla 6.</b> <i>Movimientos del robot móvil con el módulo Relé</i> .....	39
<b>Tabla 7.</b> <i>Características del módulo LM2596</i> .....	40
<b>Tabla 8.</b> <i>Descripción de las Articulaciones</i> .....	41
<b>Tabla 9.</b> <i>Relación entre los comandos gestuales y las articulaciones.</i> .....	43
<b>Tabla 10.</b> <i>Torque para el movimiento de las articulaciones.</i> .....	45
<b>Tabla 11.</b> <i>Selección de servomotores.</i> .....	46
<b>Tabla 12.</b> <i>Corriente de consumo de los servomotores</i> .....	47
<b>Tabla 13.</b> <i>Sustancias que identifica los sensores Fígaro.</i> .....	50
<b>Tabla 14.</b> <i>Especificaciones técnicas de los sensores</i> .....	51
<b>Tabla 15.</b> <i>Especificaciones bomba succión de aire</i> .....	53
<b>Tabla 16.</b> <i>Directorios del SDK</i> .....	67
<b>Tabla 17.</b> <i>Variables de interés del SDK</i> .....	68
<b>Tabla 18.</b> <i>Variable para gobernar las acciones del sistema</i> .....	69
<b>Tabla 19.</b> <i>Valores del vector aplicado la función Split</i> .....	70
<b>Tabla 20.</b> <i>Activación y desactivación de los pines digitales</i> .....	71
<b>Tabla 21.</b> <i>Configuración de los pines de la tarjeta Teensy</i> .....	72
<b>Tabla 22.</b> <i>Composición química de los elementos de prueba.</i> .....	81
<b>Tabla 23.</b> <i>Pruebas en vacío</i> .....	82
<b>Tabla 24.</b> <i>Pruebas con Alcohol</i> .....	83
<b>Tabla 25.</b> <i>Pruebas con Thinner</i> .....	84
<b>Tabla 26.</b> <i>Pruebas con Gasolina</i> .....	84
<b>Tabla 27.</b> <i>Pruebas con Cemento de Contacto</i> .....	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Diferentes tipos de robots móviles. ....	10
<i>Figura 2.</i> Robot manipulador “Da Vinci”. ....	10
<i>Figura 3.</i> Robot teleoperado. ....	11
<i>Figura 4.</i> Plataforma móvil Curiosity en las llanuras de Marte. ....	12
<i>Figura 5.</i> Variables inmersas en el movimiento de un robot diferencial. ....	13
<i>Figura 6.</i> Robot cartesiano. ....	14
<i>Figura 7.</i> Robot cilíndrico. ....	15
<i>Figura 8.</i> Robot polar. ....	15
<i>Figura 9.</i> Robot angular. ....	16
<i>Figura 10.</i> Robot manipulador en tareas agrícolas. ....	17
<i>Figura 11.</i> Robot manipulador de residuos biológicos. ....	18
<i>Figura 12.</i> Manipulador móvil “Curiosity”. ....	19
<i>Figura 13.</i> Robot “Robin 1”. ....	20
<i>Figura 14.</i> Control por gesticulación. ....	21
<i>Figura 15.</i> Reconocimiento Gestual por EMG. ....	22
<i>Figura 16.</i> Sistema de caracterización de gestos. ....	23
<i>Figura 17.</i> Detectores de olor en ambiente conocido. ....	25
<i>Figura 18.</i> Sistema de detección de sustancias químicas. ....	26
<i>Figura 19.</i> Nariz electrónica autónoma. ....	26
<i>Figura 20.</i> Diagrama de bloques Hardware. ....	28
<i>Figura 21.</i> Partes de la banda Myo Armband. ....	29
<i>Figura 22.</i> Indicadores LED y su significado. ....	29
<i>Figura 23.</i> Gestos captados por Myo Armband. ....	30
<i>Figura 24.</i> Esquema de la plataforma robótica móvil. ....	34
<i>Figura 25.</i> Dagu Wild Thumper. ....	35
<i>Figura 26.</i> Esquema de conexiones del robot móvil. ....	36
<i>Figura 27.</i> Módulo Relé de cuatro canales con optoacopladores. ....	37
<i>Figura 28.</i> Configuración del módulo relé como puentes H. ....	38

<b>Figura 29.</b> Grados de libertad del manipulador robótico. ....	41
<b>Figura 30.</b> Espacio de trabajo del manipulador móvil. Plano: (a) horizontal y (b) vertical. ....	42
<b>Figura 31.</b> Dimensiones del manipulador robótico. ....	43
<b>Figura 32.</b> (a) Soporte eslabón, (b) Soporte servos, (c) Unión eslabón. ....	44
<b>Figura 33.</b> Manipulador robótico ensamblado. ....	48
<b>Figura 34.</b> Esquema de conexiones del sensado químico. ....	49
<b>Figura 35.</b> Circuito de conexión de los sensores (a) TGS26xx y (b) TGS82x. ....	51
<b>Figura 36.</b> Circuito básico del sensor de temperatura. ....	52
<b>Figura 37.</b> Placa electrónica de la etapa de sensado. ....	52
<b>Figura 38.</b> Diagrama del módulo relé en la etapa de sensado. ....	54
<b>Figura 39.</b> Sistema de sensado ensamblado. ....	55
<b>Figura 40.</b> Conexión del sensor inductivo. ....	56
<b>Figura 41.</b> Plataforma robótica integrada. ....	57
<b>Figura 42.</b> Plataforma móvil robótica. ....	58
<b>Figura 43.</b> Sistemas de comunicación. ....	61
<b>Figura 44.</b> Flujo de datos del servidor. ....	62
<b>Figura 45.</b> Centro de control de la Myo Armband. ....	63
<b>Figura 46.</b> Apertura y cierra del puerto serial. ....	65
<b>Figura 47.</b> Distribución de la interfaz gráfica. ....	75
<b>Figura 48.</b> Visualización de imagen en la interfaz. ....	76
<b>Figura 49.</b> Selección de control de la interfaz. ....	76
<b>Figura 50.</b> Indicadores de los sensores químicos e inductivo. ....	77
<b>Figura 51.</b> Indicadores de desplazamiento. ....	78
<b>Figura 52.</b> Barra de comandos avanzados. ....	78

## **RESUMEN**

El presente trabajo de titulación explica el procedimiento seguido para el diseño e implementación de una plataforma robótica móvil teleoperada, controlada por gesticulación adquiridos por la banda Myo Armband. Esta plataforma consta de los siguientes subsistemas: un robot móvil de 6 llantas con tracción y suspensión independiente para trasladar a los demás sistemas en un entorno controlado. Además de un manipulador robótico de 6 grados de libertad que permita realizar aproximaciones finas hacia la fuente de interés, esto con el fin de acercarse a un conducto por el cual ingresa el aire proveniente de la fuente de olor. Consta también de una cámara de sensado químico que utiliza los sensores de la familia fígaro, para detectar diferentes volátiles en el ambiente. Utiliza sistemas auxiliares que permiten la navegación en el entorno, para esto se utilizó un teléfono celular como cámara IP. Otro sistema auxiliar es la detección de metales en la fuente de interés, cuya finalidad es determinar si existe o no riesgo de esquilas metálicas. El sistema de control y adquisición de datos es gobernado mediante una tarjeta Raspberry pi y una Teensy 3.6. Todos estos sistemas son integrados mediante protocolos de comunicación inalámbricos y alámbricos, también utiliza una interfaz gráfica que permite al operador visualizar el entorno, controlar el sistema móvil como el de manipulación y generar la señal para iniciar un proceso de sensado. En esta interfaz gráfica se despliegan los indicadores de los sensores químicos, los mismos se encienden si sobrepasan un umbral previamente establecido.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **SOCKET**
- **PLATAFORMA MÓVIL**
- **MANIPULADOR ROBÓTICO**
- **SENSADO QUÍMICO**

## **ABSTRACT**

The present work explains the procedure for the design and implementation of a mobile tele operated robotic platform, controlled by gestures acquired by a Myo Armband. This platform consists of the following subsystems: a 6-wheel mobile robot with independent traction and suspension to move the other systems within a controlled environment. Additionally a robotic manipulator of 6 degrees of freedom that allows to make fine approaches to the source of interest, this in order to bring a pipe through which enters the air coming de the source of smell. It also consists of a chemical sensing chamber that uses the sensors of the Figaro family to detect different volatiles in the environment. It uses auxiliary systems that allows navigation in the environment, for this research, a cell phone was used as an IP camera. Another auxiliary system is the metal detection in the source of interest, whose purpose is to determine whether metal splinters exist or not. A Raspberry pi card and a Teensy 3.6 card govern the control and data acquisition system. All these systems are integrated by wireless and wired communication protocols, it also uses a graphical interface that allows the operator to visualize the environment, control the mobile system such as the manipulation system and generate the signal to initiate a sensing process. In the graphical interface the indicators of the chemical sensors are displayed, they will light up if they pass a previously established threshold.

### **KEYWORDS:**

- **SOCKET**
- **MOBILE PLATFORM**
- **ROBOTIC MANIPULATOR**
- **CHEMICAL SENSING**

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1 Antecedentes

El uso de herramientas creadas por el ser humano ha sido de gran soporte para la creación de la sociedad actual, permitiendo la manipulación del entorno. Sin embargo, existen situaciones en las que la persona no puede estar en contacto directo con la actividad ya sea por su grado de peligrosidad o dificultad. Por tal motivo, se ha desarrollado la teleoperación de robots, salvaguardando la integridad de la persona sin dejar de hacer el trabajo necesario. Varios de estos sistemas se han implementado en actividades submarinas, aeroespaciales, movilidad de vehículos, actividades agrícolas, entre otras (Gutiérrez Carvajal & Castillo Estepa, 2006), (Emanuel, Diego, Danilo, & Vicente, 2017), (Peña, Riaño, & Mejía, 2016), (S. Garcia, Emanuel, & Mut, 2014).

Los sistemas robóticos teleoperados necesitan de acciones humanas para ser controlarlos. El avance de la bioingeniería ha permitido el desarrollo de nuevas tendencias para controlar los sistemas teleoperados, uno de los sistemas más utilizados es el electrofisiológico que basa su funcionamiento a través del sensado de señales provenientes de la activación eléctrica de los músculos (Eduardo & Machado, 2010), (Avila, 2017). En la investigación de Naik *et. al.* explora el diseño de sistemas de control en base a señales fisiológicas como el sensado del cerebro o de la mano y los clasifica por una red neuronal mediante seis gestos como son: flexión de la muñeca, flexión de dedos (anular y medio), flexión de la muñeca hacia el dedo meñique, flexión de la muñeca hacia el pulgar, flexión de la muñeca y dedos hacia el centro, flexión dedo y muñeca hacia el meñique (Naik, Kumar, & Palaniswami, 2008).

Para detectar los gestos y mejorar las características de la señal de electromiografía existen dos enfoques, uno de ellos es combinar el EMG con otros sensores, o el uso de algoritmos para mejorar la precisión y características del reconocimiento de la señal (Shin, Lee, & Son, 2016). De esta manera se pueden generar acciones de control para los diferentes actuadores.

Y. Kim *et. al.* estudió el control del seguimiento de un robot móvil basado en el reconocimiento de gestos de una mano humana, para lo cual se ha utilizado señales de electromiografía de dos canales, y se ha logrado realizar cuatro órdenes para el control: adelante, atrás, izquierda y derecha (Kim, Lee, & Jung, 2015). Con estas órdenes se llega a la zona de interés para realizar el testeado de los objetos.

Sobre plataformas robóticas móviles se ubican manipuladores que usan diferentes controladores como joystick, teléfonos móviles, hasta las propias señales biopotenciales del cuerpo para obtener robots móviles teleoperados (Montañez & Pinto, 2017), (Triana, Prada, & Forero, 2015).

La manipulación de artefactos explosivos es riesgosa para la integridad de quien los opera, por tal motivo, se pueden desarrollar robots que estén en la capacidad de realizar tareas que minimicen el riesgo al ser humano. En la actualidad robots móviles con brazos manipuladores son un ejemplo de vehículos antibombas, cuyo objetivo es preservar el bienestar físico de las fuerzas militares y policiales (L. Garcia, 2008).

En el ambiente pueden existir sustancias peligrosas que pueden ser nocivas para el ser humano, para lograr determinar este particular se utilizan sensores químicos que identifican contaminantes en el ambiente. Se puede determinar la cantidad de partículas por millón de una molécula de gas como el CO<sub>2</sub>, acetona, compuestos explosivos, etc (José de Jesús et al., 2016), (Añazco, 2015). Otras aplicaciones del uso de sensores químicos es determinar las sustancias estupefacientes. El objetivo de estas plataformas es determinar la cantidad de químico presente en el ambiente, y dirigir

la plataforma hacia el lugar con mayor concentración (Gaibor et al., 2016). Se debe tener en cuenta que sustancias peligrosas pueden estar dentro de diferentes tipos de materiales, ya sea plásticos o metales, por tal razón se debe integrar sensores con otros fines y lograr suplir este problema.

Se puede realizar la integración de sensores para medir varios parámetros como: temperatura, dióxido de carbono, conductancia, oxígeno, entre otros. La finalidad es estudiar sustancias peligrosas en algunos entornos y de esta manera alertar de manera auditiva del peligro existente en el entorno que se encuentra (De Paz Menéndez, 2015).

El uso de cámaras IP y dispositivos electrónicos inalámbricos permiten crear un sistema de video con el fin de monitorear zonas alejadas o de difícil acceso (Silvia & Ramírez, 2016), (Obregon, 2016). La tendencia actual de la robótica es crear dispositivos que puedan manipular el entorno y enviar al operario la información necesaria para poder tomar decisiones oportunas y correctas, es así que se tienen robots tales como:

- Sojourner Rover: vehículo robótico, diseñado para ser enviado a Marte con capacidad de transmitir imágenes y realizar experimentos en el suelo (Cerón Correa, 2005).
- Curiosity: fue enviado a Marte por la NASA para movilizarse por las llanuras y recolectar muestras, Curiosity posee un laboratorio incorporado que le permite hacer análisis químicos del entorno (Arvidson et al., 2017).
- Robin 1: es un robot ecuatoriano del GIR (Grupo de Intervención y Rescate) que se especializa en la desactivación de bombas, es una combinación de un robot móvil y un brazo antropomórfico (Cóndor Zapata & Martínez Herrera, 2017).

## 1.2 Justificación e importancia

Los ambientes industriales, laboratorios químicos, entre otros, tienen alto riesgo de accidentes para ello se han desarrollado normas de seguridad, pero esto no es suficiente para aislar al operador de posibles incidentes que pueden dejar graves consecuencias.

Problemas en las vías respiratorias, pérdida del olfato, amputación en extremidades son algunas consecuencias de los accidentes al trabajar con sustancias peligrosas. Los avances en la medicina y tecnología han permitido tratar algunos, pero problemas como la pérdida de una extremidad no ha podido ser reemplazada en su totalidad.

En un área de trabajo químico los operadores pueden determinar la sustancia dependiendo de su aroma, muchas veces se componen de un solo elemento químico, otros son compuestos de varios elementos o sustancias. La Sociedad Americana para pruebas y materiales (ASTM) ha clasificado 830 descriptores aromáticos, los humanos pueden identificar de manera correcta 100 aromas en promedio (Acosta, 2013). La exposición prolongada del operario en estos entornos es perjudicial para la nariz que es el órgano de captación de aromas, además, varios de estos pueden ser de carácter nocivo para la salud, la combinación de algunos aromas puede ser un indicador de la creación de sustancias peligrosas o ilícitas.

Es por ello que para reducir los accidentes una opción es aislar completamente al operario del área de trabajo o manipulación, para reemplazar el trabajo de los operadores que requiere que estén en contacto con las sustancias se pueden utilizar sensores químicos que al ser calibrados logran determinar diferentes compuestos y de esta manera determinar la nocividad de la sustancia todo esto apoyados con la robótica.

La robótica permite realizar actividades que comúnmente son complejas de elaborar para el hombre, además, permite realizar trabajos más precisos, repetitivos y rápidos (Sosa & Rodriguez, 2015). Con la finalidad de aislar al hombre de entornos potencialmente peligrosos se usan robots teleoperados que permiten manipular diferentes objetos con el fin de proponer una solución viable y efectiva ante situaciones adversas para las personas, con este fin y preservando la integridad de los seres humanos se ha optado por utilizar sistemas robóticos teleoperados que aíslen a la persona de entornos peligrosos.

Este trabajo abarca áreas como la química y la robótica que permiten desarrollar sistemas para detección de sustancias, y se puede trabajar en diferentes campos de aplicación, entre estos se tiene: la detección de drogas, en el campo militar para la detección de pólvora o explosivos, etc.

Además, servirá como base para el desarrollo de diferentes trabajos que podrán servir en distintas áreas como: militar, policial, laboratorios químicos, etc. la universidad de las Fuerzas Armadas ESPE con la finalidad de aportar tecnología a la sociedad y uno de sus puntos de aplicación es proveer de sistemas de seguridad a las Fuerzas Armadas.

El presente trabajo está enmarcado dentro del proyecto “Localización de TNT y pólvora de base doble a través de sensado químico en un entorno controlado mediante robótica cooperativa (SmellRobSense)” que aportará al alcance de los objetivos de este proyecto.

### **1.3 Alcance del proyecto**

El proyecto actual tendrá como finalidad desarrollar una plataforma robótica móvil que integre diferentes sistemas, tales como: sensado químico el cual determinará el tipo de sustancia, una plataforma robótica móvil que servirá para el desplazamiento por el entorno, un brazo robótico con

capacidad de aproximar los sensores hacia el objeto, además un sistema de visión que ayudará al operario a manejar la plataforma móvil.

Para la identificación de las diferentes sustancias se realizará un sistema de sensado, implementado en una caja de medición que captará los gases del entorno mediante una bomba de succión de aire. Esta caja constará de sensores químicos de la familia Fígaro TGS para determinar la concentración de sustancias principalmente acetona y tolueno, además, se usarán otros sensores para complementar la información de la etapa de sensado y determinar la temperatura interna de la caja de medición y la existencia de metales en el objeto de interés.

El sistema estará sobre la plataforma robótica móvil Dagu Wild Thumper que posee seis llantas con tracción independiente en cada una de ellas, para lo cual, se implementará un sistema de control y potencia, el tamaño presupuestado del móvil es 42 x 30 x 13 cm, la carga útil máxima de 5kg. La etapa de procesamiento, comunicación y control se lo hará utilizando una Raspberry, mientras que para las señales de control usadas en la etapa de potencia y para captar las señales del sensado se utilizará un microcontrolador.

Se diseñarán las etapas de control y potencia para el diseño de un brazo robótico llamado Robotic arm with 6 DOF el cual es *Open Design*, cuya función será la de aproximar los diferentes sensores al objeto de interés y permita la manipulación del mismo. Este dispositivo constará de seis grados de libertad para que el efector tenga mayor alcance.

En base a la información que provee la banda myo gesture control armband se caracterizará comandos gestuales provenientes de la extremidad superior derecha, para lo cual se utilizará movimientos específicos que están enfocados en gestos de manos y combinados con el movimiento, también cuenta con un acelerómetro, giroscopio, un magnetómetro y tiene

retroalimentación háptica. Mediante la caracterización de gestos se controlará la plataforma móvil robótica y el brazo robótico.

Debido a que la plataforma es un sistema teleoperado a distancia es necesario un medio por el cual se pueda visualizar el camino, para que el operario lo pueda movilizar en el entorno evadiendo obstáculos, por tal motivo se implementará un sistema de video basado en cámara IP fija.

Una vez que los sistemas se encuentren desarrollados individualmente se procederá a integrarlos sobre la plataforma móvil la cual contendrá todos los subsistemas. Se creará una interfaz gráfica para que el usuario interactúe directamente con la plataforma robótica.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

- Elaborar un sistema capaz de detectar y manipular sustancias peligrosas, empleando sensores químicos, un sistema robótico teleoperado, un sistema de visión remota; mediante comandos de movimiento provenientes de la extremidad superior para controlar la plataforma robótica.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Determinar las etapas de control y potencia de la plataforma y brazo robótico móvil, para que pueda manipular sustancias y desplazarse en entornos controlados.
- Identificar posibles sustancias nocivas que afecten la integridad del ser humano.
- Caracterizar un grupo de comandos gestuales básicos, provenientes de la extremidad superior del operario para controlar el sistema robótico.

- Establecer un sistema de visión remota, que permita la navegación teleoperada del sistema robótico en entornos distantes y sin línea de vista para aislar al operario de entornos peligrosos.
- Operacionalizar los subsistemas de sensado, manipulación, y visión sobre la plataforma robótica móvil.

## CAPÍTULO II

### ESTADO DEL ARTE

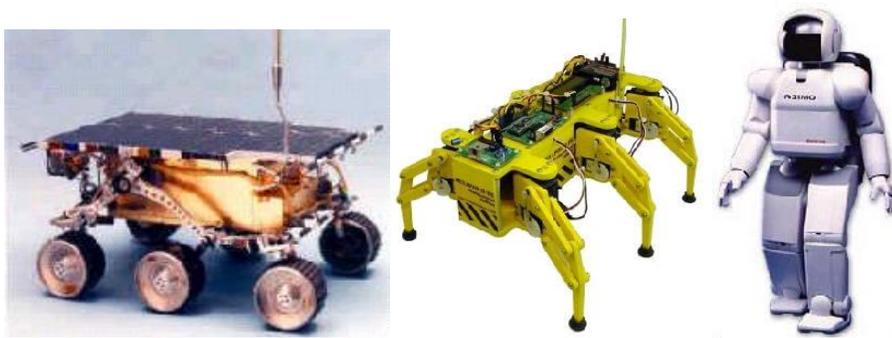
#### 2.1 Sistemas Robóticos

La robótica, es una de las ciencias encargadas de crear y generar herramientas para las personas, reemplazando y aislando el factor humano; manteniéndolo en un entorno seguro a distancia, además, existen diferentes robots que por sus características físicas desempeñan papeles específicos como son los robots: manipuladores, móviles y los híbridos que son una mezcla de los nombrados anteriormente (Cerón Correa, 2005).

##### 2.1.1 Clasificación de robots

La clasificación de robots varia de autor en autor dependiendo de parámetros como su locomoción, geometría, aplicación, forma de control, etc. es así que por la temática de la investigación se menciona principalmente a los robots móviles, manipuladores y teleoperados.

- **Móviles:** Son una plataforma mecánica, con un sistema de locomoción que depende del ambiente en el cual se va a movilizar; sus aplicaciones son diversas y extensas, sin embargo, se los utiliza principalmente en actividades riesgosas o nocivas para la salud humana. Una característica importante de este tipo de robots es que puede portar cargas sobre su plataforma, permitiéndole llevar accesorias extras para poder caracterizar su entorno (Bambino, 2018). Un robot móvil no necesariamente posee ruedas, también puede ser zoomórfico, con orugas, volador y acuático (ver Figura 1).



**Figura 1.** Diferentes tipos de robots móviles.

Fuente: (Colta, 2018)

- Manipuladores: Un robot manipulador mueve objetos, herramientas especiales o dispositivos mediante un conjunto de movimientos. Dentro de los diferentes tipos de robots manipuladores se encuentran los brazos articulados, que dependiendo de su configuración posee más grados de libertad. Su aplicación se centra principalmente en la industria, medicina (ver Figura 2) y en la actualidad como sistema de apoyo a los robots móviles.



**Figura 2.** Robot manipulador “Da Vinci”.

Fuente: (Espinoza, 2018)

- Robots teleoperados: Son robots controlados a distancia por medios físicos o inalámbricos; este tipo de robots requiere de una persona que los controla mediante una interfaz de control, por tal motivo no son automáticos. Las interfaces de control (ver Figura 3) de este tipo de robots son principalmente joysticks, pantallas táctiles o dispositivos móviles que en ocasiones tienen una retroalimentación con el usuario que los maneja.



**Figura 3.** Robot teleoperado.  
Fuente:(Richard, 2018)

## 2.2 Robots móviles

Un robot móvil por sus características de traslación y su capacidad de llevar: controladores, sensores, actuadores y otros sistemas, son considerados como plataformas robóticas móviles. Por su versatilidad y funcionalidad en diversos campos se los emplea para: trasladar objetos, recreación, exploración, acercamiento a lugares de interés, etc. En el ámbito de la exploración este tipo de plataformas han incursionado desde búsquedas locales hasta búsquedas en otros planetas, con el fin de lograr atravesar terrenos agrestes y de difícil acceso para la recolección y análisis de muestras. Un claro ejemplo de esta tecnología está descrito en el trabajo de Arvidson *et. al.* que habla sobre la plataforma espacial Curiosity (ver Figura 4), movilizándose a través de llanuras

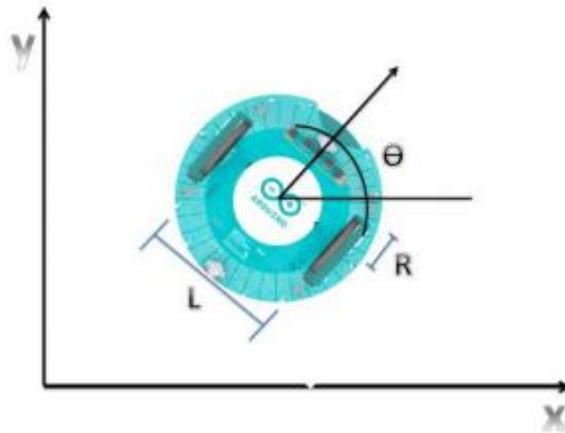
cubiertas de rocas y arena, provocando que su desplazamiento fuera difícil, sin embargo, los factores adversos no fueron impedimentos para que la sonda espacial no cumpliera su objetivo de recolectar muestras (Arvidson et al., 2017).



**Figura 4.** Plataforma móvil Curiosity en las llanuras de Marte.

Fuente: (Arvidson et al., 2017).

Uno de los principales problemas de las plataformas móviles es la locomoción, si bien se sabe que el robot debe moverse, se debe escoger la manera más eficiente; es por esto que en la investigación de Sosa *et. al.* Ha desarrollado nuevas técnicas para solucionar problemas en cuanto a robots móviles con tracción diferencial (ver Figura 5), centrándose principalmente en el control de posición y velocidad del robot (Sosa & Rodriguez, 2015).



**Figura 5.** Variables inmersas en el movimiento de un robot diferencial.

Fuente: (Sosa & Rodríguez, 2015).

La robótica móvil presenta problemas comúnmente relacionados a la posición, navegación, y control del robot; estos factores influyen en la eficiencia del robot y necesita de sistemas o algoritmos para solventar estos problemas. En el trabajo de García se da a conocer el uso de algoritmos de posicionamiento, sistemas de control y navegación que permiten mejorar el sistema de exploración de una plataforma móvil. La finalidad de aplicar estos sistemas sobre las plataformas móviles, tiene por objetivo la detección de minas antipersonales, además, los sensores metálicos permiten posicionar dichas minas con mayor precisión (García, 2008).

### 2.3 Manipuladores robóticos

Los manipuladores robóticos teleoperados empezaron su desarrollo en 1940 con la finalidad de elaborar o recrear la manipulación de materiales radiactivos. Los avances de la tecnología permitieron producir sistemas maestro esclavo, en los cuales el brazo maestro se encuentra acoplado mecánicamente en un brazo remoto y de geometría similar (Montañez & Pinto, 2017). Inicialmente los manipuladores robóticos eran funcionales, pero el avance de la tecnología y la

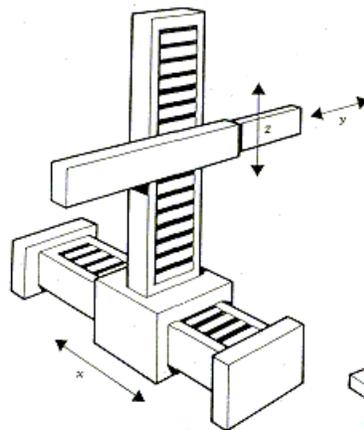
miniaturización de los componentes electrónicos, los transformó en obsoletos. Debido a que los manipuladores fueron más compactos, se los pudo ubicar como subsistemas en sistemas más complejos.

Para que los brazos robóticos realicen una tarea específica de posicionamiento se pueden considerar dos métodos, realizando el análisis de cinemática directa y cinemática inversa (Montañez & Pinto, 2017). Siendo la cinemática directa el proceso de encontrar las coordenadas del efector en el espacio, a partir de los ángulos de rotación. Y la cinemática inversa es encontrar los ángulos de rotación, a partir de las coordenadas del efector en el espacio.

### 2.3.1 Tipos de robots manipuladores.

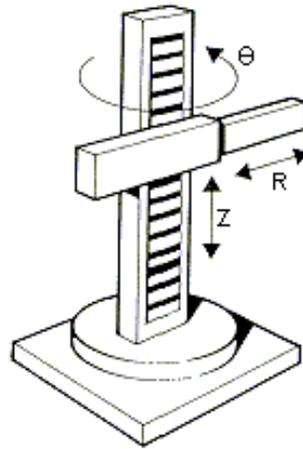
Dentro de la clasificación de los robots manipuladores, existe un apartado que los agrupa por su geometría teniendo así:

- Robot cartesiano: Este tipo de robot tiene tres ejes lineales perpendiculares entre sí (ver Figura 6).



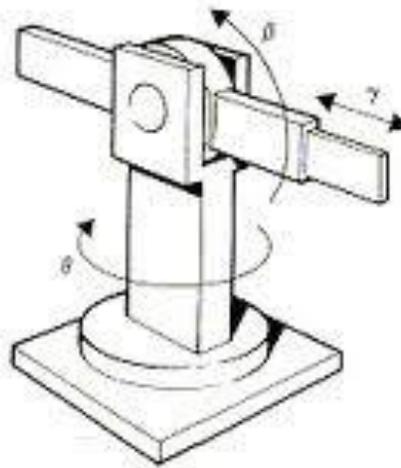
**Figura 6.** Robot cartesiano.  
Fuente: (Enríquez, 2018)

- Robot cilíndrico: Robot que rota en la base y posee dos ejes lineales perpendiculares (ver Figura 7).



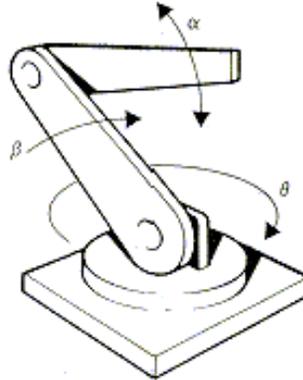
**Figura 7.** Robot cilíndrico.  
Fuente: ( Enríquez, 2018)

- Robot Polar: Este robot posee dos ejes rotacionales y uno lineal (ver Figura 8).



**Figura 8.** Robot polar.  
Fuente: ( Enríquez, 2018)

- Robot angular: posee más de tres ejes rotacionales, comúnmente este tipo de robot también se lo conoce como antropomórfico (ver Figura 9).



**Figura 9.** Robot angular.  
Fuente: ( Enríquez, 2018)

### 2.3.2 Manipuladores teleoperados.

Los manipuladores robóticos siguen evolucionando con el pasar del tiempo, pero mantienen su principal objetivo de realizar actividades o tareas a distancia que no pueden ser realizados por el usuario directamente. Al ser teleoperados, permite aislar a los usuarios u operadores de los medios peligrosos. Realiza actividades de alto riesgo, como la revisión de líneas de alta tensión, manejo de desperdicios, manejo de químicos, etc. En la investigación realizada por C. Peña *et. al.* que habla sobre un robot manipulador y teleoperado aplicado a la agricultura para un ambiente conocido (ver Figura 10), realizando actividades como sembrar, fumigar, etc. (Peña, Riaño, & Mejía, 2016).



**Figura 10.** Robot manipulador en tareas agrícolas.  
Fuente: (Peña & Mejía, 2016).

Los manipuladores robóticos son herramientas trascendentales en diferentes áreas como: la industrial, médica y de seguridad humana. Para controlarlos remotamente se necesitan de ciertos parámetros que aseguren que su respuesta sea la esperada y en tiempo real. En la investigación de Gutiérrez *et. al.*, se hace una recopilación de diferentes métodos de control para manipuladores teleoperados, además, de una comparativa con métodos convencionales de control (Gutiérrez Carvajal & Castillo Estepa, 2006).

La sociedad actual genera una gran cantidad de desperdicios, sin embargo, dependiendo de su origen son más nocivos para la salud de las personas, un método para sobrellevar este problema es la clasificación de los desechos, pues facilita su manipulación y tratamiento. Existe un tipo de desperdicio que se lo categoriza como especial, puesto que las personas que los manipulan corren un alto riesgo biológico. En la investigación de Cesar *et. al.* trata una solución para esta problemática reduciendo gastos que implica el equipo especial para el personal y reduciendo los riesgos laborales de los mismos. La solución planteada en esta investigación es la implementación de un sistema de manipulación de residuos biológicos (ver Figura 11), con la ayuda de un manipulador teleoperado en tiempo real (Cesar et al., 2016).



**Figura 11.** Robot manipulador de residuos biológicos.  
Fuente: (Cesar et al., 2016).

### **2.3.3 Manipuladores robóticos aplicados a la robótica móvil**

Un robot manipulador móvil es aquel que puede tomar y trasladar objetos de un lugar a otro, también conocido como robot híbrido debido a que es la mezcla entre los robots móviles y los manipuladores. Este tipo de robots no se limitan a un espacio fijo de trabajo y puede ampliar su campo de acción (Sosa & Rodríguez, 2015). Esta clase de robots son utilizados principalmente para la exploración en campo, toma de muestras y traslación de objetos peligrosos; por su gran versatilidad y mando a distancia este tipo de robots son empleados en el ámbito militar y espacial (ver Figura 12).



**Figura 12.** Manipulador móvil “Curiosity”.  
(Arvidson et al., 2017)

El desarrollo de robots para salvaguardar la seguridad de personas ha ido incrementando notablemente en Ecuador, es así que en la actualidad se crean plataformas robóticas especializadas en determinadas acciones, como, por ejemplo: la detección de minas antipersonales, robots con sistemas de visión para inspecciones de seguridad y robots detectores de bombas es así que en la investigación de Córdor *et. al.* estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, realizaron la repotenciación de un sistema anti bombas llamado Robín 1 (ver Figura 13), el cual es empleado en el Grupo de intervención y rescate de la Policía Nacional del Ecuador. Este robot es una combinación de un robot móvil y un brazo manipulador antropomórfico con una pinza como efector, además, de sistemas de visión en tiempo real y un sistema disruptor de agua para la neutralización de explosivos. (Córdor Zapata & Martínez Herrera, 2017).



**Figura 13.** Robot “Robin 1”.  
Fuente: (Cóndor Zapata & Martínez Herrera, 2017)

#### **2.4 Sistemas de control para plataformas robóticas móviles.**

Existen varios métodos de control sobre las plataformas robóticas como: sistemas inalámbricos y sistemas cableados. Los primeros robots manipuladores teleoperados fueron controlados por palancas, requiriendo sistemas mecánicos complejos. En la actualidad se utiliza sistemas cableados más pequeños como: sensores de presión, potenciómetros, joystick, etc. En el caso de los sistemas de control inalámbricos como: dispositivos móviles, pantallas táctiles y un método novedoso como es el control por gestos.

En la actualidad el control de los sistemas robóticos se centra en comandos de movimiento. El reconocimiento gestual se lo puede hacer de distintas maneras, siendo algunos como: el uso de sensores extensiométricos sobre un guante, reconocimiento de imágenes, adquisición de señales musculares (Shin, Lee, & Son, 2016) entre otras. La caracterización de gestos (ver Figura 14) en la robótica se utiliza para la identificación de movimientos, que son ejecutados por el robot, previamente a una configuración establecida.



**Figura 14.** Control por gesticulación.

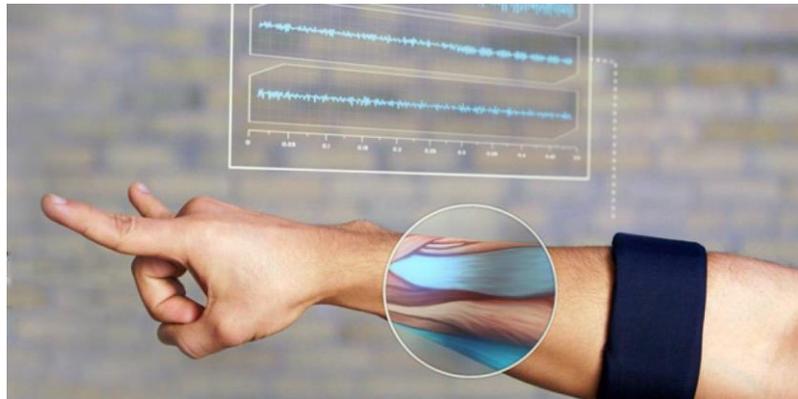
Fuente: (Ruiz, 2018)

Particularmente se trabaja con señales biomédicas para el control. La biomédica, estudia las señales eléctricas generadas por el cuerpo humano, además, el estudio de las señales provenientes de los músculos se las conoce como electromiografía o EMG. Permite determinar el grado de activación de los diferentes músculos en zonas específicas, mediante electrodos especiales para captar dichas señales y utilizarlas posteriormente.

En la actualidad, la innovación de la tecnología ha permitido dar un paso más en el accionamiento de diferentes sistemas electrónicos, es por esta razón que el estudio de las señales electromiográficas, como fuente de información para controlar diferentes sistemas, se ha incrementado notablemente y no solo como un diagnóstico para personas con problemas de salud, sino, también en aplicaciones de control de sistemas

Los gestos aplicados en la robótica, son referidos en su mayoría, por gestos provenientes de las manos y brazos a través de electromiografía superficial. Cada persona es diferente por las condiciones físicas, como la cantidad de grasa bajo la piel o la impedancia de la misma. Las señales

obtenidas por el EMG (ver Figura 15) son sensibles al ruido por lo tanto se requiere procesos de filtrado y amplificación para su estudio. Al introducir un acelerómetro se obtiene mayor información de los movimientos y esto permite reconocer mejor los gestos (Kim, Lee, & Jung, 2015) (Shin, Lee, & Son, 2016).



**Figura 15.** Reconocimiento Gestual por EMG.  
Fuente: (Curtis, 2018)

En la investigación realizada por G. Naik *et. al.* se realizó un electromiograma superficial de cuatro canales y se logró identificar seis gestos. Se obtuvo los mejores resultados con la técnica de análisis de componentes independientes que comprende un método computacional para encontrar datos ocultos en variables aleatorias (Naik, Kumar, & Palaniswami, 2008).

El trabajo de Riaño *et. al.* hacen referencia al diseño, control y programación de un brazo robótico en un ambiente virtual, controlado mediante las señales electromiográficas del brazo de un usuario, además, deja abierta la posibilidad de emplear dicho control en prototipos físicos utilizando la misma tecnología (Peña, Riaño, & Mejía, 2016).

En el trabajo de Avila da a conocer la caracterización de señales provenientes del antebrazo (ver Figura 16), para lograr controlar un robot móvil mediante 4 movimientos establecidos de la mano que han sido clasificados mediante la implementación de una red neuronal (Avila, 2017)



**Figura 16.** Sistema de caracterización de gestos.

Fuente: (Avila, 2017)

## 2.5 Detección de sustancias químicas

En procesos experimentales básicos con químicos muchas veces se espera un resultado observado en eventos anteriores, con ello establecen las seguridades del entorno y del personal que ejecuta dichos procesos. Cuando la experimentación es más compleja o de índole científica esta se apoya en otros sistemas tales como electrónicos y computacionales, que en la mayoría de aplicaciones son encargados de monitorear los eventos en la experimentación, controlar cantidades, establecer tiempos y relacionar estos valores de acuerdo a la necesidad del personal que lleva a cabo el experimento (Añazco, 2015).

Varios son los riesgos existentes por el manejo de sustancias peligrosas, en un entorno laboral se deben tomar todas las precauciones para cuidar de los trabajadores, pues la exposición continua a sustancias nocivas, podrían desencadenar en problemas de salud como dificultades respiratorias, irritación ocular, etc. De Paz Menéndez en su proyecto de fin de carrera, desarrolló un prototipo para la detección de dióxido de carbono como sustancia peligrosa y como variables auxiliares la temperatura y oxígeno, y para no entrar en contacto con el entorno contaminado (dióxido de

carbono) utiliza la comunicación inalámbrica de la caja de medición con la estación de control o PC (De Paz Menéndez, 2015).

La contaminación del aire no solo es generada por procesos industriales o experimentales, sino también por los desperdicios generados por las ciudades y desencadena en problemas o afecciones en la salud, esta contaminación se propaga por el viento puesto que las bacterias se dispersan en este. Generalmente el sistema de monitoreo se compone de un arreglo de sensores, y se utiliza distintos métodos para el análisis de los datos, en el trabajo de investigación de J.de Jesús *et. al.* utiliza el arreglo de sensores y redes neuronales, en el cual logra sensor y analizar las sustancias químicas en tiempo real sobre un prototipo portable y pequeño (J. de Jesús et al., 2016).

### **2.5.1 Robótica aplicada a la detección de sustancias**

Las sustancias químicas como acetona, éter, ácido sulfúrico, etc. son conocidas como precursores y son la base para la producción de drogas. La policía se ayuda de los canes y otros procesos para detectar estas sustancias. Los canes policiales pueden detectar explosivos aún si la emisión de olor es baja, pero se requiere entrenamiento y cuidados especiales. Como alternativa D. Gaibor *et. al.* en su investigación se desarrolló un robot para detectar la fuente de olor en un ambiente conocido (ver Figura 17), se utilizó una matriz de sensores con ventiladores para la absorción de aire (Gaibor et al., 2016).

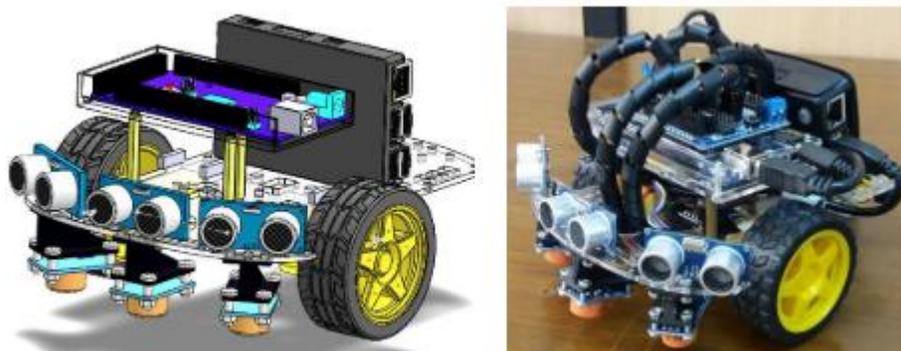


**Figura 17.** Detectores de olor en ambiente conocido.

Fuente: (Gaibor Jara & Mediavilla Flores, 2016)

Usar sensores de olor inteligentes, sobre robots móviles, ayudan a la localización de fuente de olor, así lo realizó J. Acosta en su trabajo, que posee la nariz electrónica y hace que los robots se dirijan a la fuente de concentración el olor, esto de manera autónoma y envía los datos a la estación central de manera inalámbrica (Acosta, 2013).

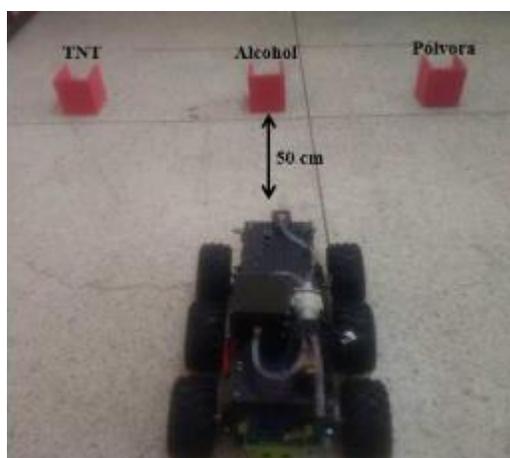
La investigación de detección de sustancias químicas, también se la está realizando en el Ecuador. En la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, existen trabajos de titulación que mencionan la detección de sustancias químicas (ver Figura 18), empleando sistemas robóticos; teniendo como ejemplo el trabajo de titulación de López *et. al.* que utilizan la robótica móvil cooperativa para la búsqueda y detección de sustancias químicas. Emplean algoritmos que permiten optimizar la búsqueda de fuentes de olor en entornos controlados, mediante sensores químicos MQ-3 (López Goyez & Sandoval Vizuite, 2017)



**Figura 18.** Sistema de detección de sustancias químicas.

Fuente: (López Goyez & Sandoval Vizuete, 2017)

La investigación de sustancias químicas en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, va creciendo con el pasar del tiempo, es así que en el trabajo de Alejandro *et. al.* integran una nariz electrónica autónoma en un sistema robótico (ver Figura 19), con la finalidad de identificar sustancias explosivas. Para recrear la denominada nariz electrónica, se creó una cámara de sensado para aislar factores ambientales circundantes, además, este sistema fue colocado sobre una plataforma móvil con visión remota y controlada remotamente por una aplicación web. (Alejandro Espinosa & Venegas Villacis, 2017)



**Figura 19.** Nariz electrónica autónoma.

Fuente: (Alejandro Espinosa & Venegas Villacis, 2017)

## CAPÍTULO III

### DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL

#### 3.1 Descripción del sistema

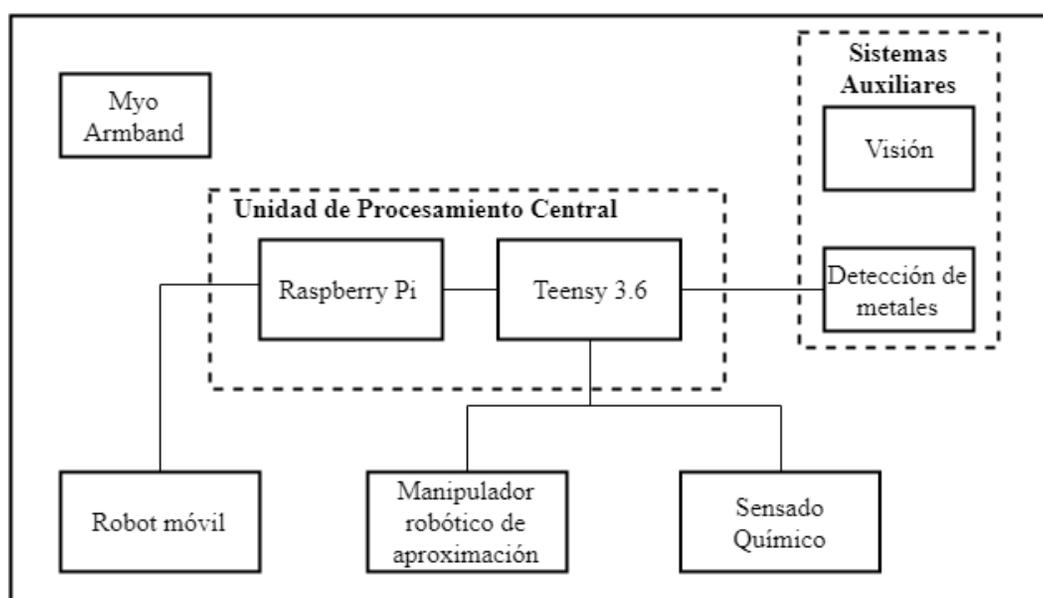
Este capítulo describe el diseño e implementación de los sistemas robóticos requeridos para cumplir los objetivos detallados en el Capítulo I. Las características establecidas del sistema, requieren que la plataforma robótica se pueda: desplazar, aproximar a la fuente de olor y determinar la presencia de una sustancia química.

El control de los sistemas robóticos se lo realiza a través de comandos gestuales, el dispositivo a utilizar es Myo Armband puesto que es asequible y cumple con los requerimientos para esta investigación, además, no necesita acondicionamiento extra. Este dispositivo sirve para determinar los gestos que realiza el operador y comandar a la plataforma robótica móvil. Dagu Wild Thumper es el robot móvil que se utiliza para desplazarlo y ubicarlo cerca a la fuente de olor.

Sobre el robot móvil está ubicado el manipulador robótico de aproximación, que tiene como función acercar el sistema de sensado a la fuente de olor, posee seis grados de libertad para que su aproximación sea más fina. El sensado químico posee sensores de la familia Fígaro porque sirven para determinar la existencia de diferentes sustancias químicas (tolueno, acetona, TNT, etc.) en el entorno que se realiza la medición. Los sistemas auxiliares se conforman por: detección de metales y visión; con el primero se logra determinar si en la medición se encuentra un metal, mientras que el de visión permite la aproximación y ubicación de los sistemas robóticos en el entorno al punto de interés.

Los sistemas requieren una unidad central de procesamiento, la cual se encarga de leer y procesar las señales de acuerdo a parámetros establecidos, además, permite activar o desactivar los actuadores.

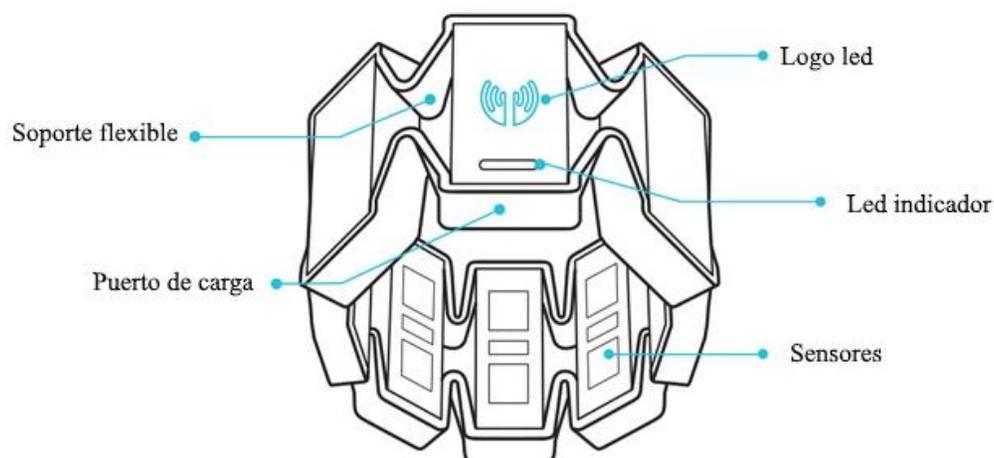
Se describe la estructura y materiales utilizados para desarrollar cada subsistema que conforman la plataforma robótica móvil. En la Figura 20 se indica el diagrama de bloques de todo el sistema referente al hardware, como están relacionados los sistemas con la unidad de procesamiento central. Los bloques de Myo Armband y Visión están enlazados inalámbricamente con el sistema.



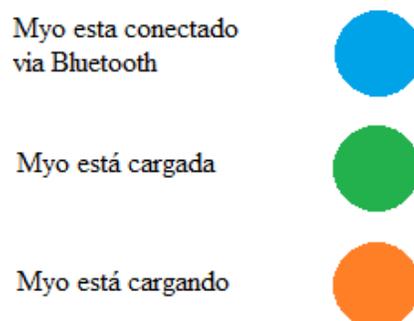
*Figura 20.* Diagrama de bloques Hardware.

### 3.2 Hardware de control por gestos

El control de las plataformas móviles se lo realiza en base a comandos de movimiento, mediante el uso de Myo Armband (ver Figura 21). Posee un conjunto de ocho sensores distribuidos en el contorno de la banda, cuenta con un conector USB para cargar su batería y de un indicador led de varios colores (ver Figura 22) que muestra el estado de la banda.



**Figura 21.** Partes de la banda Myo Armband.  
Fuente: (Curtis, 2018)



**Figura 22.** Indicadores LED y su significado.

Las piezas de esta banda están sobre una carcasa expandible, que se pueda sujetar a diferentes circunferencias de brazos, ampliable entre 19 y 34 centímetros, tiene un peso de 93 gramos y un espesor de 0.45 pulgadas. Los sensores musculares se sujetan al brazo de la persona y comienza a sensar las señales eléctricas generadas por los músculos del usuario. Se puede reconocer cinco diferentes gestos preestablecidos en la configuración de la banda, que son: flexión de los dedos, flexión de la muñeca, extensión de la muñeca, extensión de los dedos, y chasqueo de los dedos.



**Figura 23.** Gestos captados por Myo Armband.  
Modificado de: (Curtis, 2018)

Myo Armband posee herramientas de desarrollo de software (SDK, por sus siglas en inglés *Software Development Kit*), permitiendo el flujo de datos desde la banda hasta la computadora host. La comunicación entre estos dispositivos es a través de Bluetooth 4.0, esta tecnología permite que sea un sistema de bajo consumo de potencia.

Los gestos reconocidos por la banda se envían a la computadora, y se asigna a cada gesto una cadena de caracteres como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.**  
*Asignación de cadena de caracteres en el SDK*

Gesto	Cadena asignada
Flexión de los dedos	'Fist'
Flexión de la muñeca	'Wavein'
Extensión de la muñeca	'Waveout'
Extensión de los dedos	'Fingersspread'
Chasqueo de los dedos	'Doubletap'

También cuenta con la unidad de movimiento inercial (IMU, por sus siglas en inglés *Inertial Measurement Unit*), el cual sirve para determinar la orientación y movimiento del brazo del usuario, Este tipo de datos se los conoce como datos espaciales, se obtienen a través de un

giroscopio, acelerómetro y magnetómetro que conforman el sistema inercial. En la Tabla 2 se muestra las características de los datos espaciales.

**Tabla 2.**

*Característica de los datos espaciales*

Datos espaciales	
Dato espacial	Característica
Orientación	Corresponde a la manera en que apunta el brazalete y se puede representar como una matriz de rotación o ángulos de Euler
Vector de aceleración	Corresponde a la aceleración en los ejes x, y, z que experimenta la banda en un momento específico

### 3.3 Unidad de procesamiento central de los sistemas robóticos.

La unidad de procesamiento central de la plataforma robótica se compone de dos dispositivos. La Raspberry Pi y la Teensy 3.6. Estos sirven para procesar las señales de control a las que se registrarán los sistemas robóticos (Dagu Wild Thumper 6WD y brazo robótico de aproximación) y el sistema de sensado.

La Raspberry Pi 3 modelo B se eligió para este trabajo, es considerada como computadora de bolsillo y de bajo costo. Su software es *open source* conocido como Raspbian basado en Linux, aunque existe una versión de Windows. Puede ser utilizada como computadora de escritorio, pero se limita por su hardware y el rendimiento será mucho menor. Existen varios modelos, el modelo B posee las características que se muestran en la Tabla 3, consta de 40 pines de entrada/salida de propósito general (GPIO, por sus siglas en inglés *General Purpose Input/Output*) que son programados por el usuario, estos pines trabajan a un voltaje de 3.3v.

**Tabla 3.***Características Raspberry Pi 3 modelo B*

Descripción	Especificación
CPU	Quad Core 1.2GHz Broadcom BCM2837
RAM	1GB
Puertos USB 2.0	4
Salida de Video	HDMI
Salida de audio	HDMI, conector 3.5mm
Almacenamiento	Micro SD
Conectividad a la red	10/100 Ethernet RJ-45 Wifi 802.11 Bluetooth 4.1
Consumo de energía	800mA (4 W)
Fuente de energía	5V
Dimensiones	85.60mm x 53.98mm

El robot móvil debe desplazarse en el entorno, por lo cual los movimientos que realiza son: adelante, atrás, izquierda y derecha. El controlador que se utiliza para comandar los movimientos del robot móvil es la Raspberry Pi, que se emplea para recibir la cadena de caracteres transmitidos desde el host y así obtener la información de los gestos realizados por el operador, además permite enviar las señales de control a los puentes H para el movimiento del robot móvil.

Otro controlador que se utiliza en este trabajo es la Teensy 3.6, que servirá para: ejecutar las acciones de control sobre el brazo, leer las señales de los sensores y accionar a los actuadores del sensado químico. Esta tarjeta tiene características descritas en la Tabla 4 .

**Tabla 4.***Especificaciones técnicas Teensy 3.6*

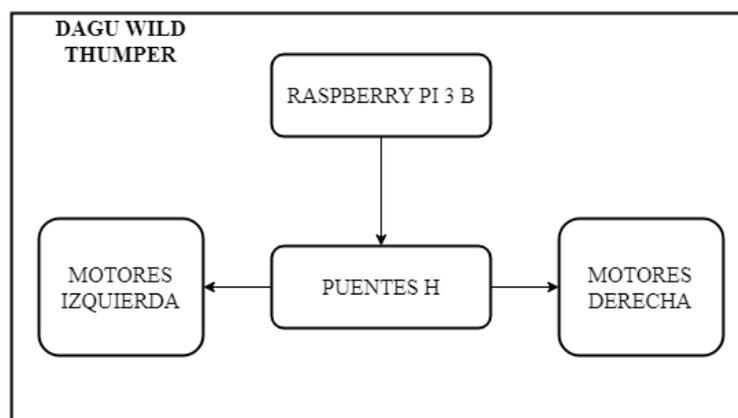
<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Procesador	Cortex M4F 180
RAM	256Kb
E/S digitales	58 a 3.3v
Entradas / Salidas Analógicas	25 / 2
Puerto USB	12Mbit/s

El manipulador robótico de aproximación y el sensado químico se rigen a las acciones programadas en la tarjeta controladora Teensy. El manipulador es de seis grados de libertad y a cada uno de ellos se asocian los servomotores, estos hacen que las articulaciones suban, bajen, giren a la izquierda o derecha, dependiendo al grado de libertad que estén asociados. Por otro lado, en la Teensy se realiza la conversión analógica a digital para la etapa de sensado, la cual consta de seis sensores que a su salida poseen una señal analógica. De igual manera esta tarjeta envía las señales al módulo relé para controlar la activación de: el calentador de los sensores, los ventiladores y la bomba de succión.

El computador se comunica con la Raspberry a la cual llega toda la información, y esta a su vez la remite a la Teensy para el control. De igual manera, la información recolectada por la Teensy se envía a la Raspberry y esta al computador. Es decir, poseen comunicación bidireccional. Es por ello que estos dispositivos están conectados mediante un cable USB a micro USB. Los protocolos y como se enlazan se detallará en el Capítulo IV.

### 3.4 Robot móvil

En el Capítulo I se determinó que el robot móvil a utilizar en base a las especificaciones de requerimientos en el desarrollo de este trabajo es el Dagu Wild Thumper 6WD. Tendrá como objetivo desplazarse y aproximar toda la plataforma hacia la fuente de olor. El robot móvil inicialmente solo posee la base, las ruedas y los motores, por lo tanto, se tuvo que implementar la fuente de energía, los puentes H y el controlador. Las señales de control que comandan a este sistema serán enviadas desde la tarjeta Raspberry Pi hacia el módulo relé de cuatro canales, que se configuró como dos puentes H. En la Figura 24 se muestra el esquema general de los elementos que están inmersos en este sistema.



**Figura 24.** Esquema de la plataforma robótica móvil.

#### 3.4.1 Materiales y dimensiones de diseño.

El robot móvil Dagu Wild Thumper 6WD (ver Figura 25) posee una estructura de aluminio con agujeros, seis motores de corriente continua con caja de engranes de 75:1. Sus ruedas tienen un diámetro de 120mm y poseen labrado de 0.4mm para mayor fijación con el suelo, además, tiene suspensión independiente para cada rueda. En la Tabla 5 se muestran otras características.



**Figura 25.** Dagu Wild Thumper.  
Fuente: (Pololu, 2018).

**Tabla 5.**

*Características de Dagu Wild Thumper 6WD.*

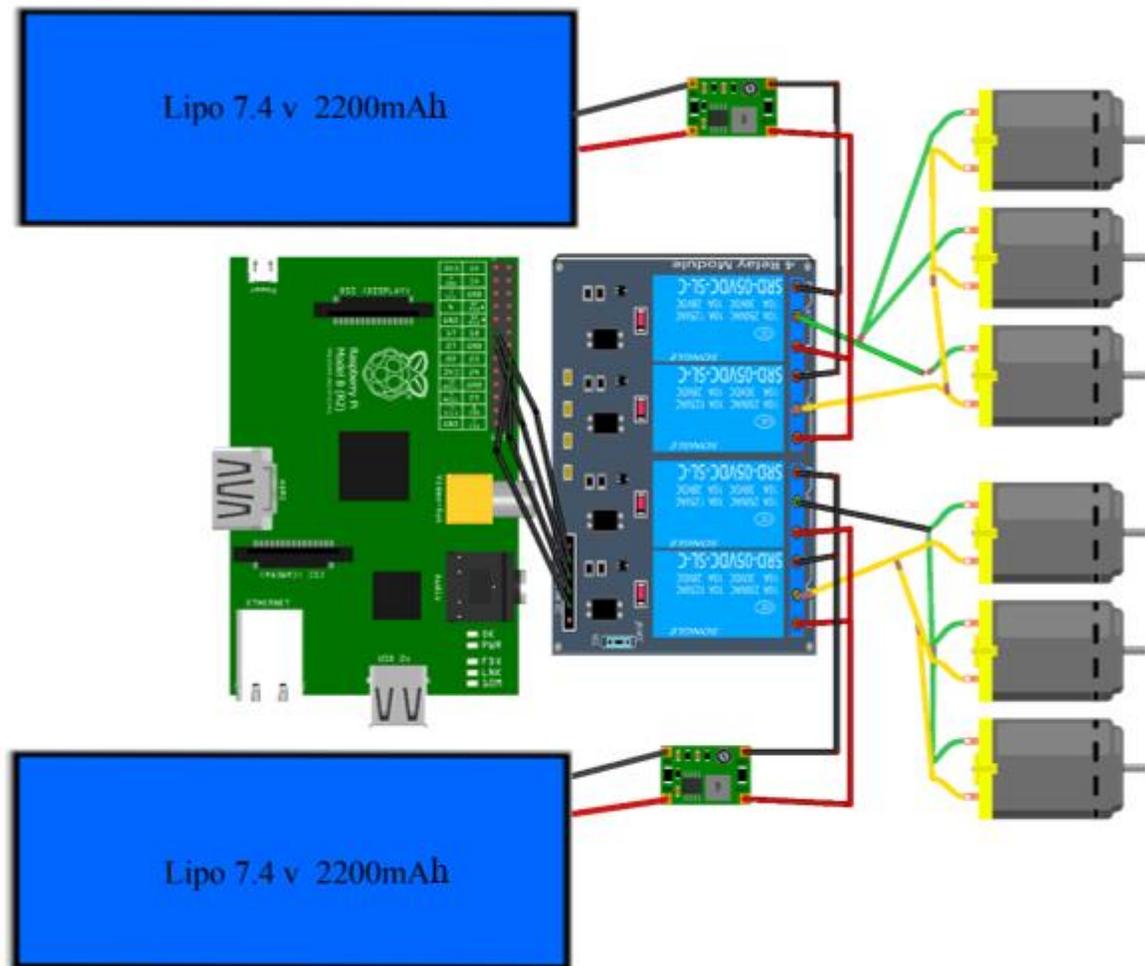
Descripción	Valor
Tamaño	420 x 300 x130 mm
Peso	2.7 kg
Distancia al suelo	60mm
Carga útil máxima	5 kg
Voltaje del motor	2 – 7.5 v
Corriente sin carga	420mA (a 7.2v) c/motor
Corriente de bloqueo	6.6 A (a 7.2v) c/motor
Velocidad sin carga	160 RPM (a 7.2v)

### 3.4.2 Diseño de la etapa de potencia

Se diseñó la etapa de potencia para que los componentes del robot móvil puedan accionarse.

Los dispositivos de hardware que componen el robot móvil se presentan en la Figura 26 y son:

Baterías lipo 7.4v, conversores Buck DC-DC, Raspberry Pi B, módulo relé 4 canales, seis motores DC (Dagu Wild Thumper 6WD).

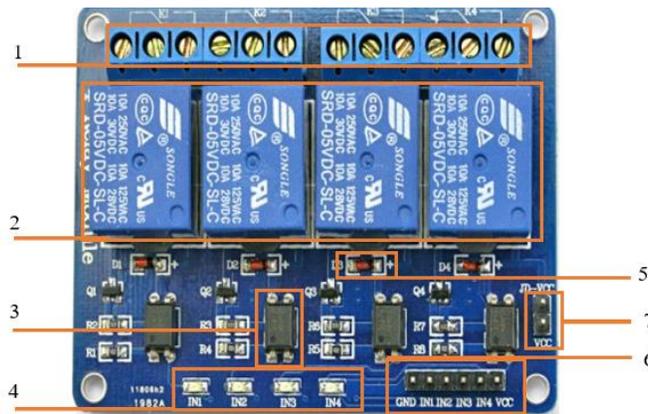


*Figura 26.* Esquema de conexiones del robot móvil.

La tarjeta Raspberry Pi 3 es la que envía las señales para controlar el robot móvil. Se requiere una etapa de acondicionamiento de las señales puesto que el voltaje de operación de la tarjeta controladora es de 3.3v, mientras que, a los motores se suministra la tensión de 6v. Es necesario dos puentes H para el cambio de giro de los motores, esto se logra con la activación y desactivación de los canales del módulo relé.

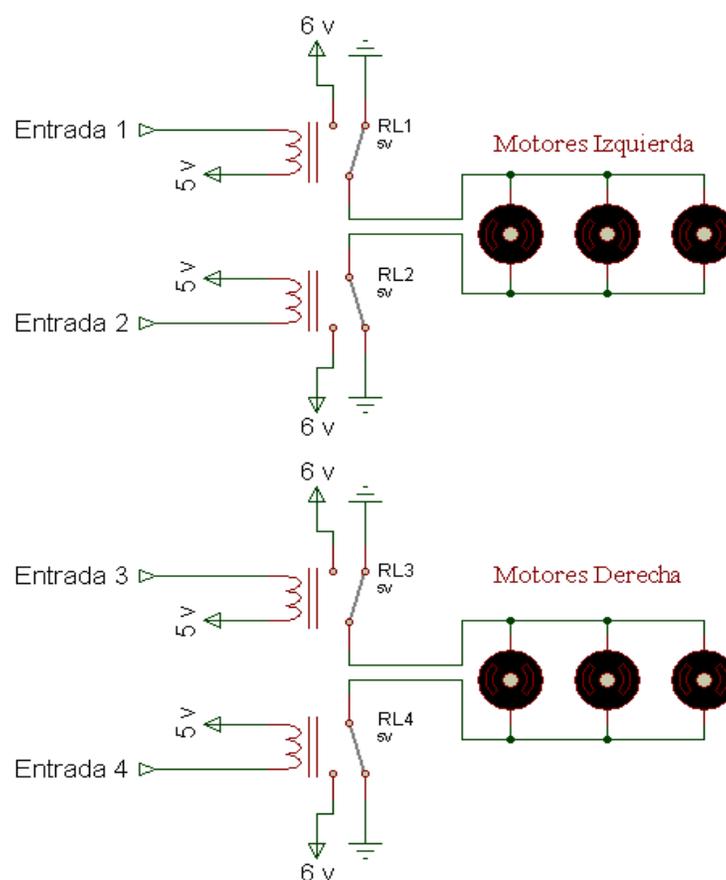
El módulo relé es utilizado para controlar cargas que requieren voltajes diferentes a los que se tienen en las entradas, se pueden usar con cargas hasta de 150 v a 10 A. Cuenta con optoacopladores para aislar la entrada con la salida de los relés. En la Figura 27 se observa el módulo que consta de las siguientes partes:

1. Cuatro borneras de tres contactos: normalmente abierto, cerrado, común.
2. Cuatro relés que se activan con 5v.
3. Optoacoplador x 4.
4. Cuatro leds, indican la activación de cada entrada.
5. Diodo de protección x 4.
6. Conectores de las cuatro entradas y alimentación (Vcc, Gnd).
7. Jumper, selecciona la alimentación a los relés (aísla el control y la potencia).



**Figura 27.** Módulo Relé de cuatro canales con optoacopladores.

El módulo relé se configuró como dos puentes H, esto se requiere para realizar las acciones de movimiento: adelante, atrás, izquierda y derecha. En la Figura 28 se observa la configuración del módulo relé y los seis motores del robot móvil. También se muestran las cuatro señales de entrada provenientes de la tarjeta Raspberry Pi 3.



**Figura 28.** Configuración del módulo relé como puentes H.

Las señales enviadas desde la tarjeta controladora tienen un voltaje de 3.3v, consideras como un uno lógico, pero el módulo trabaja con lógica inversa, por lo tanto, lo tomará como cero lógico y viceversa. En la Tabla 6 se indica la relación entre los comandos gestuales con los movimientos que realiza el robot móvil, así como los valores de voltaje que se tienen en las entradas del módulo relé.

**Tabla 6.***Movimientos del robot móvil con el módulo Relé*

Gesto	Movimiento	Entrada 1	Entrada 2	Entrada 3	Entrada 4
Flexión de los dedos	Adelante	3.3 v	0 v	3.3 v	0 v
Extensión de los dedos	Atrás	0 v	3.3 v	0 v	3.3 v
Flexión de la muñeca	Izquierda	3.3 v	0 v	0 v	3.3 v
Extensión de la muñeca	Derecha	0 v	3.3 v	3.3 v	0 v

### 3.4.2.1 Fuente de Alimentación

Se tuvo que analizar el consumo de corriente de la plataforma móvil, para seleccionar la fuente de alimentación que abastezca al sistema. Se debe tomar en cuenta el consumo energético de cada elemento que irá conectado a esa fuente, por lo tanto, para los motores de la plataforma móvil se conoce que el consumo de corriente nominal es de 420mA y se tiene para cada lado tres motores. Por lo tanto, al usar la ecuación 1 se obtiene la corriente de consumo.

$$I_c = \sum_{i=1}^n i \quad (1)$$

Donde,  $I_c$  es la corriente de consumo,  $n$  corrientes totales e  $i$  la corriente de consumo de cada dispositivo. Para lo cual la corriente de consumo es:

$$I_c = 420mA \times 3motores = 1260mA$$

Por esta razón, se ha elegido dos baterías Lipo de 7.4v – 2200mAh, y de tamaño 8.5 x 3.3 x 2.5 cm. El tiempo de operación está dada por la ecuación 2.

$$T_{operación} = \frac{mAh_{batería}}{mA_{requerido}} \quad (2)$$

Para la cual se tiene que el tiempo de operación será:

$$T_{operación} = \frac{2200mAh}{1260mA} = 1.75 h$$

Al realizar las pruebas con el voltaje de alimentación de los motores con 7.4v, se determinó que la plataforma móvil adquiere una velocidad elevada que no es adecuada para los ejercicios de aproximación. Por ello se decidió utilizar un convertor Buck DC-DC LM2596 de características detalladas en la Tabla 7. Con este se reduce la tensión a 6v la cual permite reducir la velocidad de desplazamiento, y a su vez una mejor aproximación a los objetivos.

**Tabla 7.**  
*Características del módulo LM2596.*

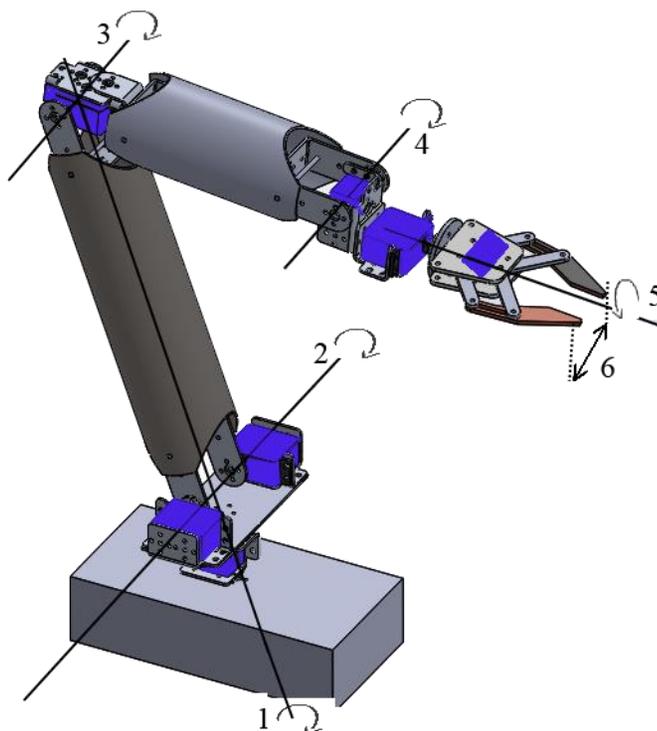
Descripción	Valor
Voltaje de entrada	4.5 – 40 V
Voltaje de salida	1.5 – 35 V (variable)
Corriente de salida (máx)	3 A
Frecuencia de switching	150 KHz

### 3.5 Manipulador robótico de aproximación

Complementario al robot móvil, este fue equipado con un manipulador, el cual permite una mejor aproximación del sistema de sensado al área de interés. Además, sirve para mover pequeños obstáculos que interrumpen en el sensado. Este manipulador tiene seis grados de libertad y posee una pinza como efector.

El manipulador posee seis articulaciones, y cada articulación provee de un grado de libertad. Por lo tanto, se tienen seis movimientos posibles que se indican en la Figura 29. Además, sirven para

unir los eslabones que son elementos estructurales que conforman al manipulador, las articulaciones se describen en la Tabla 8.



**Figura 29.** Grados de libertad del manipulador robótico.

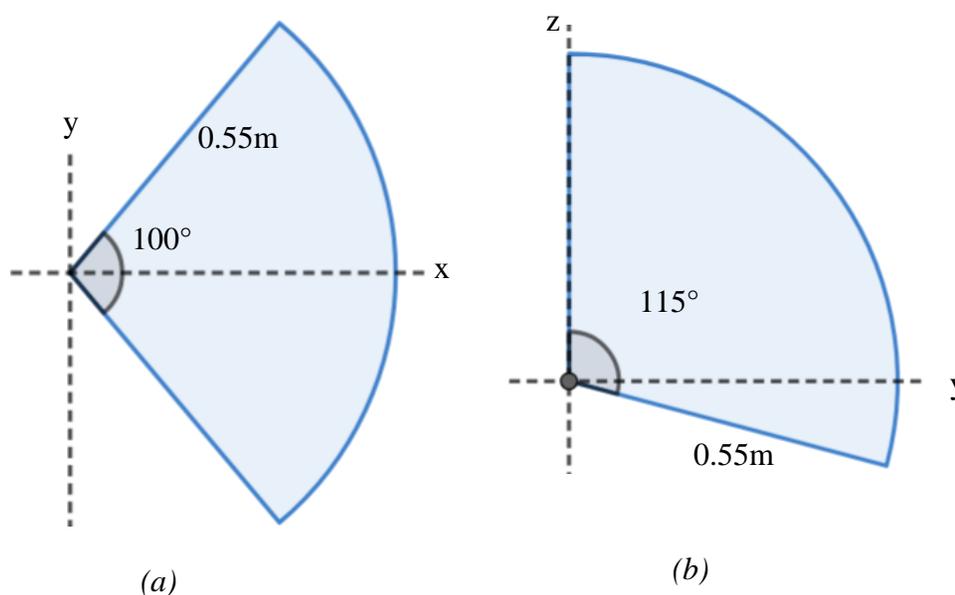
**Tabla 8.**

*Descripción de las Articulaciones*

Articulación	Nombre	Descripción
1	Base	Base del manipulador
2	Hombro	Estructura entre las articulaciones 2 y 3
3	Codo	Estructura entre las articulaciones 3 y 4
4	Muñeca V	Estructura entre las articulaciones 4 y 5
5	Muñeca G	Estructura entre las articulaciones 5 y 6
6	Efector	Efector

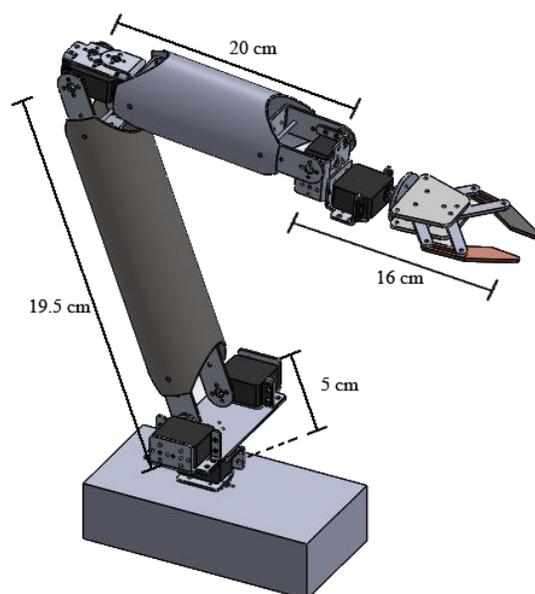
El manipulador robótico puede alcanzar distintos puntos, a esto se le conoce como espacio de trabajo. Esto permite conocer el área a la que podrá acceder el manipulador. En la Figura 30 se muestra el espacio de trabajo utilizado en esta investigación.

El movimiento en el plano horizontal (ver Figura 30 (a)) su valor máximo de rotación es  $100^\circ$  y de alcance es de 0.55m, puesto que el manipulador no requiere girar más allá de este valor. Por otro lado, el desplazamiento en el plano vertical (ver Figura 30 (b)) el valor máximo de elevación es de  $115^\circ$  y de alcance es de 0.55m, puesto que el punto máximo que alcanzará será cuando el manipulador se encuentre extendido y perpendicularmente al robot móvil.



**Figura 30.** Espacio de trabajo del manipulador móvil. Plano: (a) horizontal y (b) vertical.

Las dimensiones de los eslabones se muestran en la Figura 31. La base tiene una longitud de 5cm, este no se considera para determinar su alcance máximo puesto que funciona como base de todo el manipulador. Desde el hombro hasta el efector su longitud es de 55cm.



**Figura 31.** Dimensiones del manipulador robótico.

El movimiento del manipulador se da por servomotores ubicados en cada una de las articulaciones, que a su vez permiten el movimiento de los eslabones. Este movimiento se relaciona con los comandos gestuales realizados por el operador, tal como se muestra en la Tabla 9, en esta también se indica el rango en grados que puede moverse cada articulación. En esta tabla se indica los términos *yaw*, *pitch* y *roll*, que son los ángulos calculados por el sistema inercial de la banda Myo para determinar el movimiento del brazo del operador.

**Tabla 9.**

*Relación entre los comandos gestuales y las articulaciones.*

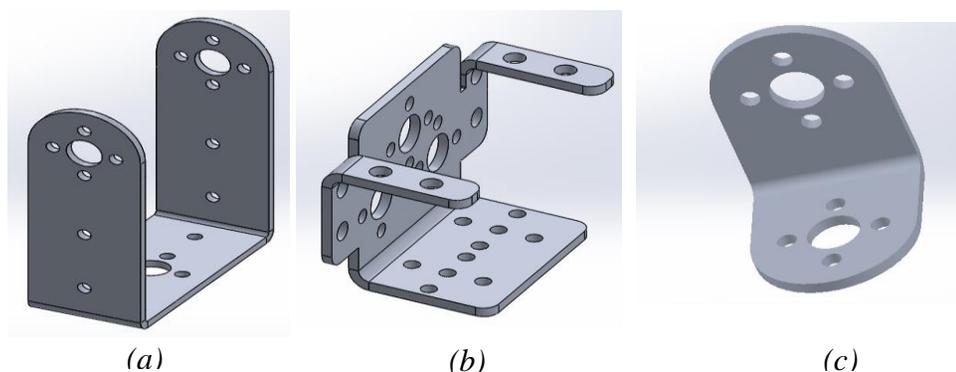
Articulación	Comando Gestual		Rango de movimiento
	Subir	Bajar	
Base	<i>Yaw +</i>	<i>Yaw -</i>	70° - 110°
Hombro	<i>Pitch +</i>	<i>Pitch -</i>	50° - 110°
Codo	Flexión de dedos	Extensión de dedos	10° - 110°

CONTINÚA ➔

Muñeca V	Flexión de muñeca	Extensión de muñeca	90° - 170°
Muñeca G	<i>Roll +</i>	<i>Roll -</i>	2° - 90°
Efactor	Double tap		80° - 150°

Para la construcción del brazo se utilizó varios materiales: acrílico, aluminio, acero y ácido poliláctico (PLA, por sus siglas en inglés *Polyactic Acid*) material que se usa en la impresión en 3D, la selección se la realizó en base a los pesos que debe levantar cada articulación, tomando en cuenta el peso y la resistencia.

En los eslabones se decidió utilizar acrílico de 2mm de espesor, puesto que se requiere que sean livianos y resistentes. Mientras que los soportes de los eslabones (ver Figura 32 (a)), deben ser rígidos para que no se doblen ni se desvíen con el peso, por tal motivo se escogió aluminio de 1mm de espesor. En cambio, los soportes de los servomotores (ver Figura 32 (b)), están impresos en 3D. Mientras que la articulación del codo es el punto donde mayor esfuerzo se realiza, por lo tanto se requiere una mayor resistencia del material, para lo cual esta unión (ver Figura 32 (c)) está hecha de acero de 3mm de espesor. Para completar el ensamble se requiere fijar las uniones, eslabones, soportes y base. Por ello se utilizó tornillos de 2mm de diámetro con arandelas y tuercas.



**Figura 32.** (a) Soporte eslabón, (b) Soporte servos, (c) Unión eslabón.

### 3.5.1 Dimensionamiento de motores.

Para el movimiento de cada grado de libertad, se utilizó servomotores DC y con un ángulo de giro se puede controlar su posición en un intervalo de 0 a 180°: Estos motores tienen engranes reductores con el fin de aumentar el torque y reducir la velocidad, también poseen un sensor de desplazamiento y un circuito de control.

Los servomotores se diferencian por el material de sus engranes, el torque y sus dimensiones. Para este trabajo se requiere realizar el dimensionamiento de los mismos, para lo cual se calcula el torque necesario para mover cada eslabón. El torque está dado por la ecuación 3.

$$M = F * d \quad (3)$$

Donde,  $F$  es la fuerza que para este caso está dada por el peso (ver ecuación 4), mientras que  $d$  es la distancia, la cual está representada por la longitud de los eslabones.

$$P = m * g \quad (4)$$

Donde,  $m$  es la masa y para este trabajo es aquella que debe mover cada articulación, mientras que  $g$  es la gravedad y tiene un valor constante de  $9.8 \text{ m/s}^2$ .

En la Tabla 10 se presentan los valores que fueron calculados en base a las ecuaciones 3 y 4. De esta manera se obtuvo el torque necesario que debe calcular cada articulación.

**Tabla 10.**

*Torque para el movimiento de las articulaciones.*

Articulación	Peso (kg)	Distancia (cm)	Torque (kg-cm)
Base	1.04	5	5.55
Hombro	0.91	19.5	17.74
Codo	0.57	20	11.4

CONTINUA 

Muñeca V	0.23	5	3.67
Muñeca G	0.09	5	0.89
Efector	0.045	6	0.27

Una vez calculado el torque para el movimiento de cada articulación del manipulador, se debe elegir correctamente el actuador que cumpla con estos requerimientos. En la Tabla 11 se detallan los servomotores seleccionados, el torque requerido y el torque que suministran los servos. Para el eslabón 2, se requiere el torque de 17.74 kg-cm por lo tanto se usó dos servomotores de 10 kg-cm, y para el resto de articulaciones es solo uno.

**Tabla 11.**

*Selección de servomotores.*

Articulación	Torque requerido (kg - cm)	Servo	Torque del servo (kg - cm)	Descripción
Base	5.55	MG995	10	
Hombro	17.74	MG995 (2)	20	Engranés metálicos y tensión de 4.8 a 7.2v
Codo	11.4	MG996r	11	
Muñeca V	3.67	HS-311	3.7	Engranés plásticos y tensión de 4.8 a 6v
Muñeca G	0.89	SG90	1.2	
Efector	SG90	6	1.2	Engranés metálicos y tensión de 4.8 a 7.2v

### 3.5.2 Etapa de Potencia

El manipulador robótico utiliza los servomotores como fuente de movimiento, estos poseen tres cables, uno de señal y dos de alimentación. La tarjeta Teensy 3.6 envía estas señales PWM de

tensión 3.3v para controlar el manipulador robótico, por lo tanto, no se requiere una etapa de acondicionamiento. Mientras que a los servomotores se energiza con 6v para obtener el torque medio y de esta manera lograr el mejor desempeño.

La fuente de alimentación se eligió por el consumo energético de los siete servomotores que intervienen en el manipulador. Para lo cual se detalla en la corriente de consumo de cada uno.

**Tabla 12.**

*Corriente de consumo de los servomotores*

Servomotor	Corriente (mA)
MG995	150
MG996r	150
HS-311	160
SG90	100

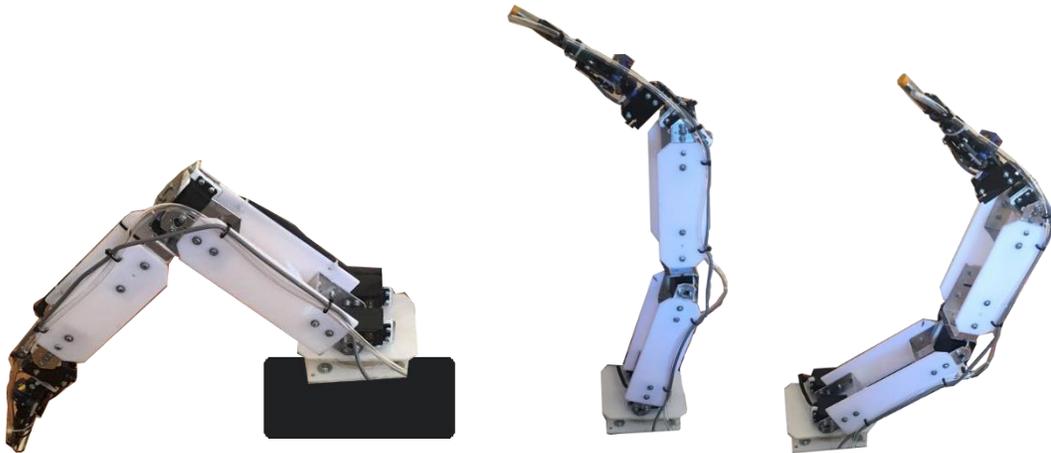
La corriente de consumo se obtiene sumando todas las corrientes de los dispositivos, para lo cual se usó la ecuación 1. Por lo tanto, se tiene:

$$I_c = 150 \times 3 \text{ mA} + 150\text{mA} + 160\text{mA} + 100 \times 2 \text{ mA} = 960\text{mA}$$

Por esta razón la fuente de alimentación que se ha elegido es una batería lipo de 7.4v – 2200mAh y de tamaño 8.5 x 3.3 x 2.5 cm. El tiempo de operación que se obtiene con esta fuente de energía, se obtiene con la ecuación 2 y se obtiene:

$$T_{operación} = \frac{2200\text{mAh}}{960\text{mA}} = 2.3 \text{ h}$$

El manipulador robótico físicamente ensamblado se muestra en la Figura 33.



*Figura 33.* Manipulador robótico ensamblado.

### **3.6 Sistema de Sensado Químico**

El sensado químico es el sistema que sirve para la detección de las diferentes sustancias. Este se ubica sobre la plataforma robótica móvil, consta de cinco sensores de la familia Fígaro y un sensor de temperatura (ver Figura 34). Los sensores estarán distribuidos en una caja que consta de dos sistemas auxiliares, el primero de captación el cual utiliza una bomba de succión y conductos para llevar el aire desde la fuente de olor hacia la caja de sensado. El segundo es de limpieza el cual consta de dos ventiladores, para que los sensores vuelvan a su estado inicial y de esta manera eliminando volátiles dentro de la caja de sensado y de los sensores.

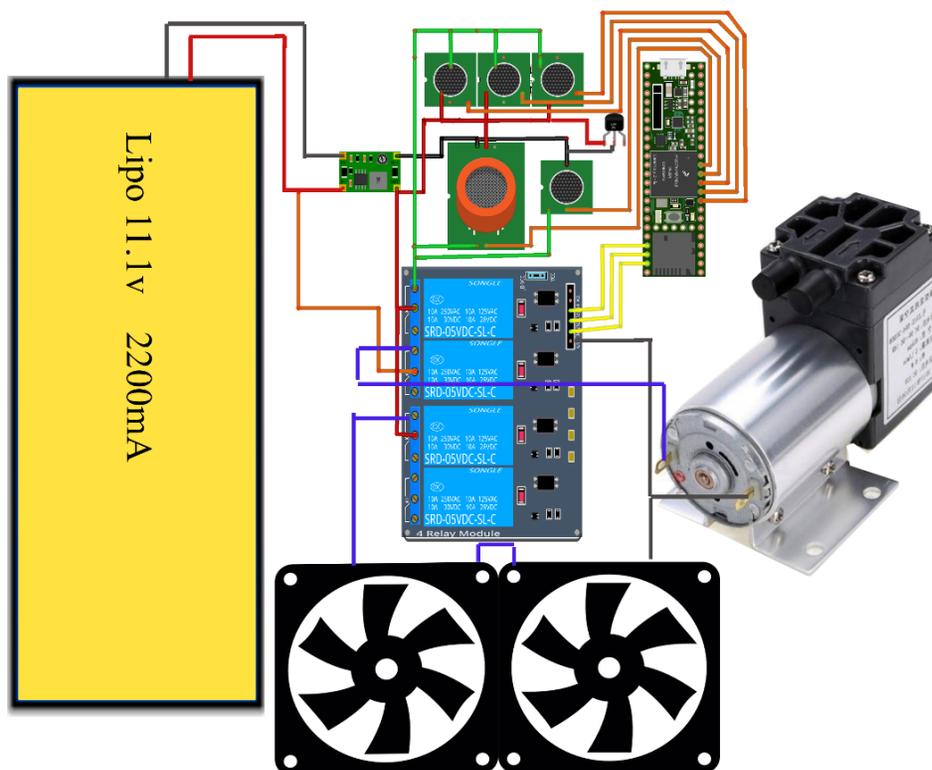


Figura 34. Esquema de conexiones del sensado químico.

### 3.6.1 Especificaciones de los sensores.

Los sensores que se utilizan para esta investigación son de la familia Fígaro, los cuales son de reducido tamaño y la energía que consumen es baja. Además, son de óxido metálico, lo cual interviene en la medición de las sustancias. La concentración del volátil hace que la conductividad del semiconductor del sensor varíe y esta a su vez permita que cambie el valor de la resistencia del sensor en función de la ecuación 5.

$$R_S = A[C] - \alpha \quad (5)$$

Donde,  $R_S$  es la resistencia del sensor,  $A$  es un valor constante por sensor,  $C$  es la concentración del gas y  $\alpha$  es la pendiente de la curva característica del sensor.

Los sensores pueden identificar varias sustancias, siendo más sensibles con ciertas sustancias no se consideran como sensores específicos. En la Tabla 13 se detalla los sensores y las sustancias que identifica cada uno de ellos.

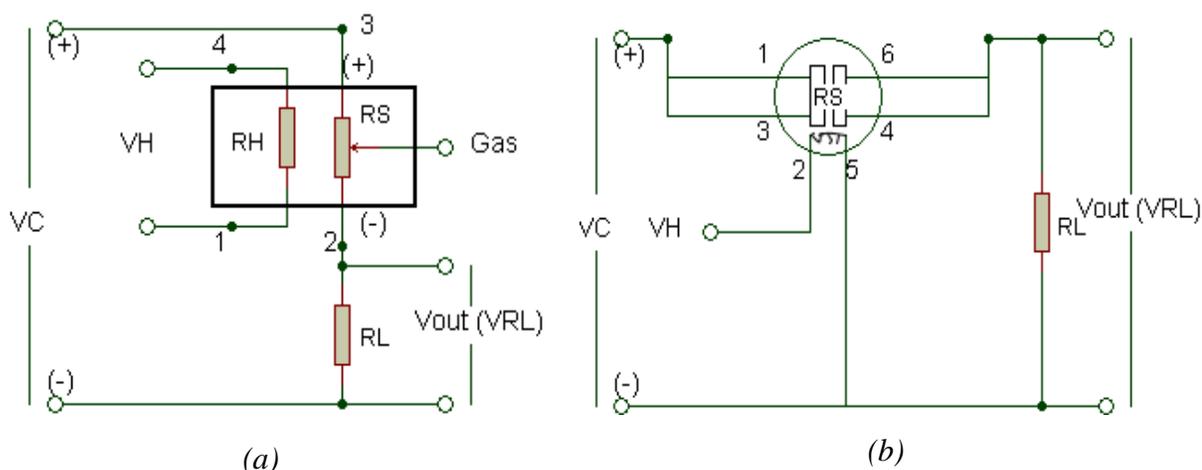
**Tabla 13.**

*Sustancias que identifica los sensores Fígaro.*

Sensor	Sustancias que identifica
TGS 2600	Metano, monóxido de carbono, butano, etanol e hidrógeno.
TGS 2602	Hidrógeno, amoníaco, etanol y tolueno.
TGS 2610	Etanol, hidrógeno, metano, propano.
TGS 822	Metano, monóxido de carbono, iso-butano, benceno, etanol y acetona.
TGS 826	Iso-butano, hidrógeno, amoníaco y etanol.

Los sensores tienen un circuito simple de conexión, su configuración es un divisor de tensión, como se observa en la Figura 35. Donde se tiene la entrada de tensión calentador ( $V_H$ ), cuyo objetivo es mantener el sensor a una temperatura establecida para obtener una medición correcta. La tensión de alimentación es  $V_C$ .  $R_S$  es la resistencia del sensor que varía con la presencia de un gas y  $R_L$  es la resistencia de carga.  $V_{out}$  se obtiene al realizar el divisor de tensión y está dada por la ecuación 6. (Godziszewski, 2018)

$$V_{out} = \frac{V_C * R_L}{R_S + R_L} \quad (6)$$



**Figura 35.** Circuito de conexión de los sensores (a)TGS26xx y (b) TGS82x.

En base a las especificaciones del fabricante y de los esquemas de la Figura 35, en la Tabla 14 se presentan los valores de resistencia y voltaje.

**Tabla 14.**

*Especificaciones técnicas de los sensores*

Sensor	Voltaje del Calentador (VH)	Voltaje de alimentación (VC)	Resistencia de carga (RL)	Resistencia del sensor (RS)
TGS 2600	5v $\pm$ 0.2v (DC)	5v $\pm$ 0.2v (DC)	0.45 k $\Omega$	10 – 90 k $\Omega$
TGS 2602	5v $\pm$ 0.2v (DC)	5v $\pm$ 0.2v (DC)	0.45 k $\Omega$	10 -100 k $\Omega$
TGS 2610	5v $\pm$ 0.2v (DC)	5v $\pm$ 0.2v (DC)	0.45 k $\Omega$	0.68 – 6.8 k $\Omega$
TGS 822	5v $\pm$ 0.2v (AC/DC)	$\leq$ 24v (AC/DC)	0.45 k $\Omega$	1 – 10 k $\Omega$
TGS 826	5v $\pm$ 0.2v (AC/DC)	$\leq$ 24v (AC/DC)	0.45 k $\Omega$	20- 100 k $\Omega$

Para complementar el sistema de sensado, este posee un sensor para captar la temperatura, es el LM35. Este sensor tiene una salida lineal proporcional a la temperatura en grados centígrados desde -55°C a 150°C, en la Figura 36 se muestra la conexión típica para este sensor.



Para la captación de aire de la fuente de olor, se necesitó una bomba de succión de aire, sus especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 15. A esta bomba se conectan dos mangueras de silicona de diámetro 5mm, una de ellas de longitud de 1m desde la bomba hasta el efector del manipulador neumático; mientras que la otra de 20cm desde la bomba a la caja de sensado.

**Tabla 15.**

*Especificaciones bomba succión de aire*

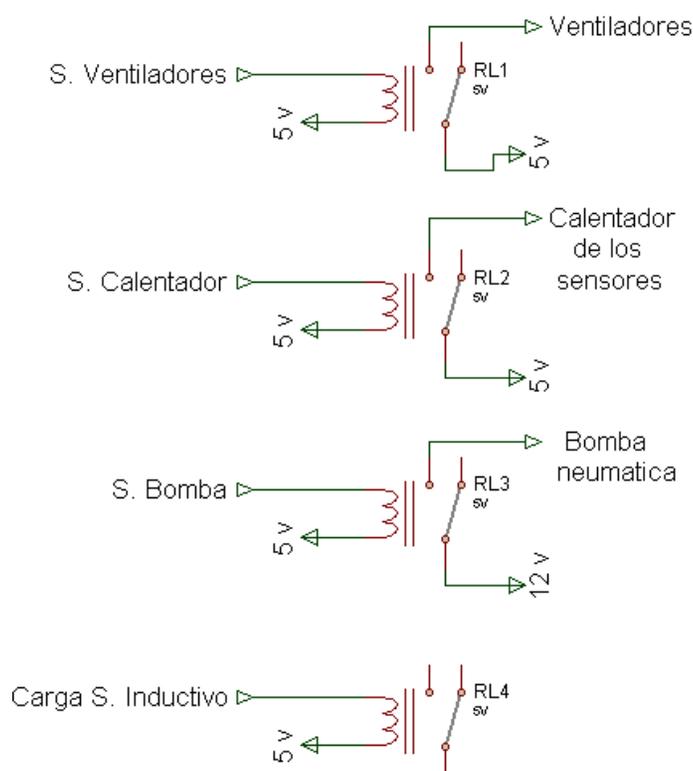
<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Tamaño	8 x 5 x 6 cm
Peso	325g
Voltaje de funcionamiento	9v a 14v
Voltaje nominal	12V
Consumo de corriente	500mA
Capacidad de succión	5 l/min

Mediante el divisor de tensión para la configuración de los sensores y las entradas analógicas de la Teensy 3.6, se capta la variación de voltaje de los sensores. Los valores analógicos a la salida de sensores varían entre de 0.1v en condiciones de baja o nula concentración y 5v cuando la concentración del químico es abundante (mayor a 5ml).

### **3.6.3 Diseño de la etapa de potencia**

Para el calentador de los sensores, la bomba succión de aire para la captación de aire y los ventiladores que realizan la limpieza de la caja de sensado. Se requiere utilizar voltajes diferentes al que maneja la Teensy. El calentador de los sensores y los ventiladores trabajan a 5v y la bomba succión de aire trabaja a entre 9v y 14v, mientras que la tarjeta controladora a 3.3v. Por esta razón

se decidió utilizar el módulo relé de 4 canales, ya descrito en la etapa de potencia del robot móvil. En la Figura 38 se muestra el diagrama para los ventiladores, el calentador y la bomba succión de aire. El cuarto canal del módulo relé, se utilizó para el sistema de detección de metales, que se explicará en el apartado de Sistemas Auxiliares.



**Figura 38.** Diagrama del módulo relé en la etapa de sensado.

### 3.6.3.1 Fuente de Alimentación

Los dispositivos que intervienen en el sistema de sensado requieren para su funcionamiento diferentes valores de tensión.

Los sensores utilizados para el sistema de sensado requieren que su voltaje de trabajo sea de 5v, y tienen un consumo de corriente de 270mA. Mientras que los ventiladores utilizados para la

limpieza de los volátiles, su tensión es similar a los sensores, pero su corriente de consumo es de 100mA.

En cambio, la bomba succión de aire para su funcionamiento requiere una tensión entre 9v y 14v. Al existir comercialmente baterías de 11.1v, se eligió esta tensión de alimentación, con el cual el consumo de corriente es de 500mA.

La fuente de alimentación para esta debe considerarse por la tensión máxima que requiera un dispositivo. Además, se calculó el consumo de corriente de todos los elementos mediante la ecuación 1 y se tiene:

$$I_c = 6 \times 270mA + 2 \times 100 \text{ mA} + 500mA + 300mA = 2620mA$$

La corriente de consumo es de 2420mA, y la tensión mínima requerida es de 11.1v. Por esta razón la fuente de alimentación que se eligió, es una batería lipo de 11.1v – 2200mAh de tamaño 10.5 x 3.3 x 2.5 cm, por lo tanto, el tiempo de operación se calculó con la ecuación 2, y se tiene:

$$T_{operación} = \frac{2200mAh}{2620mAh} = 0.83 \text{ h}$$

Excluyendo a la bomba succión de aire, la tensión suministrada a los dispositivos es de 5v, por lo tanto, se requiere el uso del conversor Buck DC-DC.

El sistema de sensado ensamblado se muestra en la Figura 39.



**Figura 39.** Sistema de sensado ensamblado.

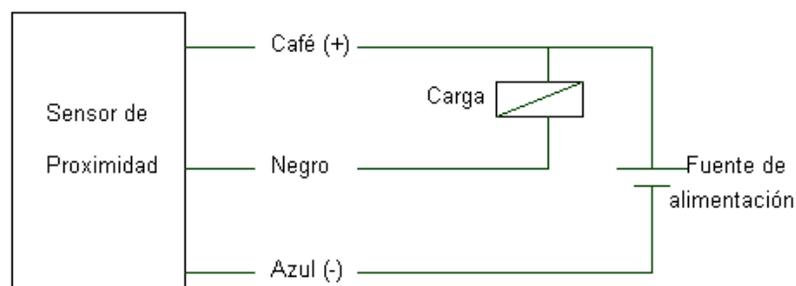
### 3.7 Sistemas Auxiliares

Los sistemas auxiliares servirán de apoyo a los sistemas principales, los cuales se enfocan en colaborar con la evasión de obstáculos, tanto para el desplazamiento de la plataforma como para la aproximación del manipulador. Se tiene un sistema de detección de metales, para determinar si en la medición se encuentra algún tipo de metal, y un sistema de visualización, para identificar el entorno mientras se desplaza por el mismo.

#### 3.7.1 Detección de Metales

Su objetivo es determinar la presencia de metales al momento de realizar el sensado en la fuente de olor. Está ubicado sobre el efector, y paralelamente al conducto de aire del sistema de sensado.

Para cumplir con esto se utilizó el sensor inductivo LJ12A3. El cual tiene como rango de tensión los valores entre 6 a 36  $V_{dc}$ , la corriente de consumo es de 300mA. Este puede detectar hasta los 4mm de distancia. Su diagrama de conexión requiere una carga, tal como se muestra en la Figura 40. En este trabajo la carga que se utiliza es la bobina 4 del módulo relé utilizado en el sistema de sensado, además la tensión que se suministra al sensor es de 5v.



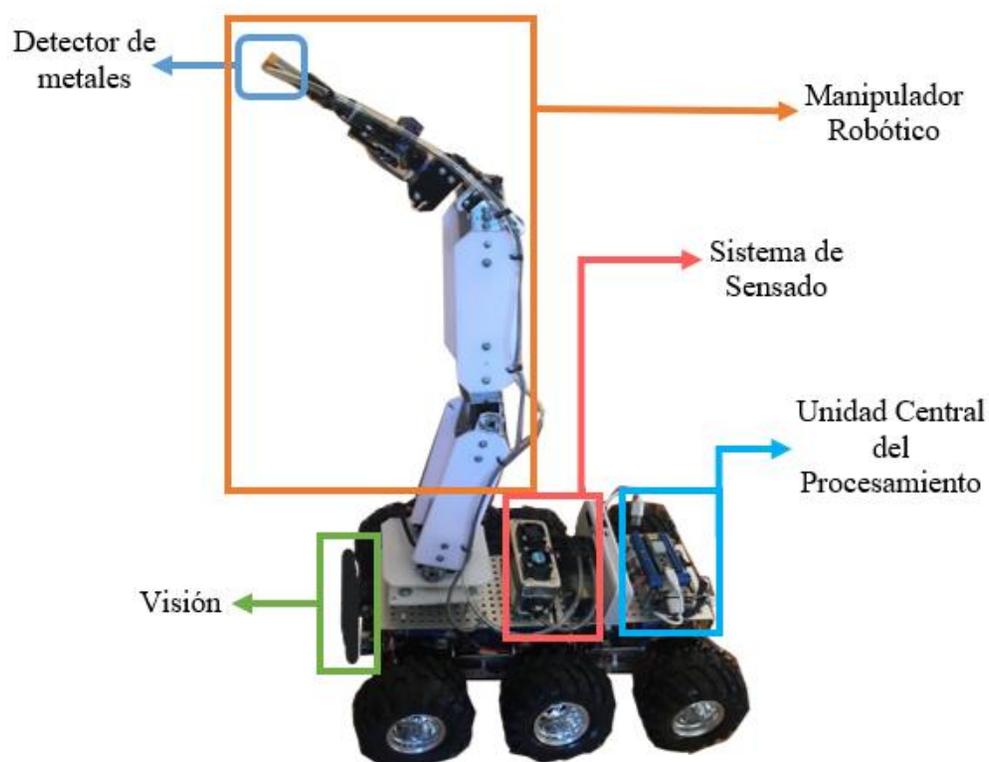
**Figura 40.** Conexión del sensor inductivo.

### 3.7.2 Visión remota

Este sistema tiene la función de visualizar el entorno por el que se desplaza el robot móvil. El teléfono móvil Samsung S4 es utilizado como cámara IP mediante el programa IpWebcam que será detallado en el Capítulo IV, la resolución de la cámara es de 13 megapíxeles.

### 3.8 Integración de hardware

Especificados y ensamblados todos los subsistemas de manera independiente, se procedió a integrarlos sobre la plataforma móvil. La disposición de cada sistema se muestra en la Figura 41:

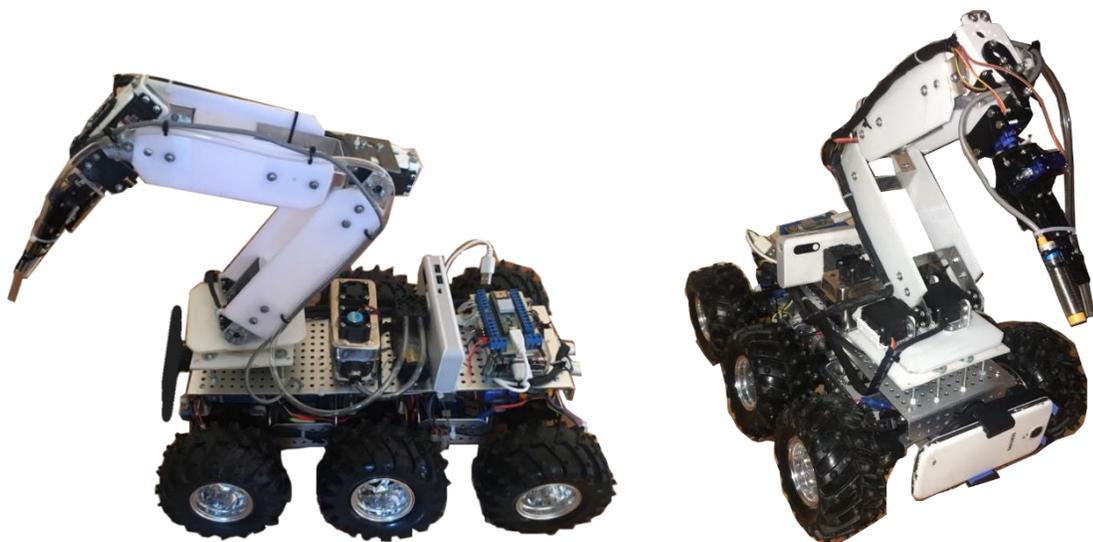


*Figura 41.* Plataforma robótica integrada.

El sistema de visión remota se encuentra en la parte frontal de la plataforma móvil, con la finalidad de visualizar el entorno que se encuentra al frente del robot. La cámara está enfocando a nivel del suelo para observar de mejor manera el objetivo.

En el efector del manipulador robótico, se ubica el sensor que detecta la existencia de metales, de esta manera, al aproximarse a la fuente de interés, se puede captar si este contiene o no metales en su composición. Además, a lo largo de toda su extensión, por el lado izquierdo, se encuentra el cable del sensor inductivo que se dirige al módulo relé y un conducto de cuatro milímetros de diámetro, por el cual se absorbe el volátil, mediante el uso de una bomba succión de aire. En la extensión del brazo por el lado derecho, se encuentra todo el cableado correspondiente a los servomotores.

El sistema de sensado químico se encuentra en la parte posterior del manipulador y consta de una caja de acero para aislar los sensores químicos del entorno, además, consta de dos ventiladores para absorber aire limpio y expulsar volátiles que puedan afectar al sistema. La bomba succión de aire cumple la función de succionar aire por el conductor y enviarla a la caja de sensado.



*Figura 42.* Plataforma móvil robótica.

## CAPÍTULO IV

### SOFTWARE DE CONTROL Y COMUNICACIÓN

#### 4.1 Introducción

El software, permite la integración de todos los componentes del sistema, con la finalidad de que trabajen en colaboración uno con el otro. Debido a que cada componente es diferente y maneja un lenguaje de programación propio, esta investigación se desarrolló en diferentes plataformas. Las cuales están interconectadas por diferentes tipos de comunicación ya sean alámbricas e inalámbricas.

Al tener diferentes entornos de programación, la comunicación entre sistemas se tornó compleja y se necesitó de una herramienta que permita interconectar todas las plataformas. Por tal motivo se empleó un mecanismo de comunicación llamado sockets, que tiene una topología cliente - servidor en una red y su función es la de crear una conexión entre todos los dispositivos.

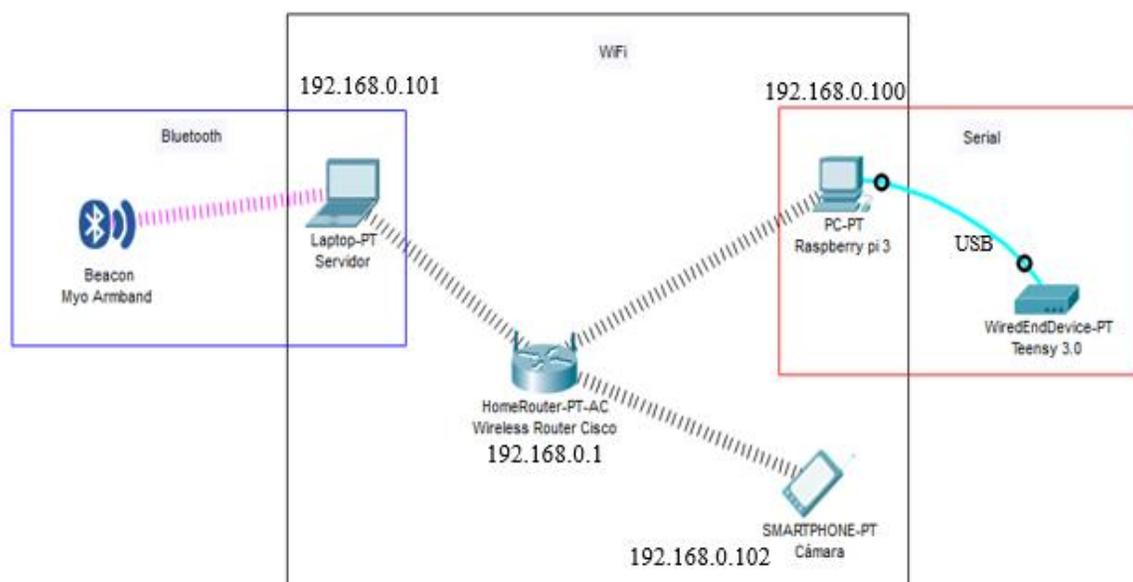
Algunos equipos como: la Raspberry, cámara y el ordenador principal, donde se despliega el entorno de control de la plataforma, tienen la capacidad de conectarse a una red inalámbrica. Estos equipos pueden conectarse e intercambiar información por medio de un concentrador de información o Router y aprovechando la topología cliente – servidor, pueden transmitir la información bidireccionalmente.

#### 4.2 Comunicación de los sistemas.

Para la comunicación de los equipos empleados en esta investigación, se utilizaron diferentes métodos para el envío y recepción de datos. Un tipo de comunicación inalámbrica fue la tecnología

wifi, encargada de conectar al servidor con los diferentes clientes mediante Sockets, para crear un flujo de datos y transmitir la información pertinente a cada dispositivo, además, se tuvo que utilizar tecnología Bluetooth para conectar la banda Myo al ordenador, debido a que es el único tipo de comunicación soporta. Se empleó una comunicación serial alámbrica por medio de un cable USB a mini USB, conectando de esta manera la tarjeta Raspberry con la Teensy, creando un canal de datos entre estos dos dispositivos.

Se estableció como servidor al ordenador, que funciona en la aplicación generada en el entorno Python de Windows denominado Servidor Python. Este servidor se conecta con diferentes clientes que son los encargados de recibir y generar tramas, las mismas que son utilizadas en los diferentes controladores para generar acciones de control. Los clientes con los que cuenta el sistema son: el entorno encargado de receptar los datos de la banda Myo Armband se lo conoce como Cliente Myo y esta desarrollado en visual C++ corriendo en paralelo en el mismo ordenador donde se encuentra el servidor; en la tarjeta Raspberry se encuentra el Cliente Raspberry, su entorno de programación es Python y es el encargado de controlar al robot móvil, receptar la trama del servidor y enviarla a la tarjeta Teensy. La comunicación serial, fue la encargada de transmitir la trama obtenida por la Raspberry hacia la Teensy y enviar de regreso, los valores de los sensores del sistema de sensado. De esta manera, se puede crear un flujo de datos en los diferentes equipos de control. En la Figura 43 se representa un esquema de comunicación entre los diferentes dispositivos.



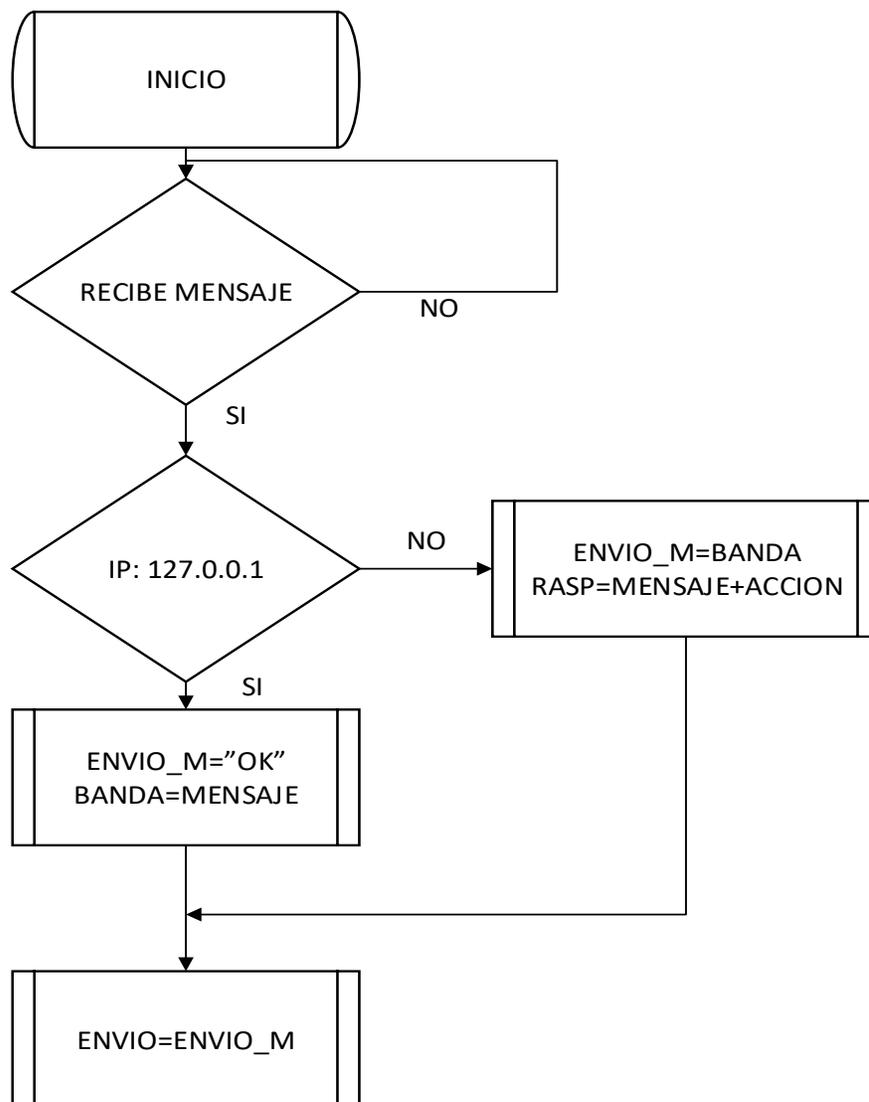
**Figura 43.** Sistemas de comunicación.

#### 4.2.1 Servidor de la plataforma móvil.

Toda la información proveniente de los diferentes dispositivos, se concentra en el servidor, el cual es el encargado de direccionar las tramas según corresponda. El servidor se encuentra en el ordenador principal y está desarrollado en la plataforma de Python para Windows, además se lo denominó Servidor Python. En el entorno de programación Python, es necesario incluir la librería “socket” para crear la clase y utilizar los métodos que permiten recibir, enviar y detectar que cliente es. Además, se necesita de funciones externas que le permitan realizar la conexión a varios clientes.

Para que un servidor pueda atender a varios clientes simultáneamente, necesita crear una lista de conexiones, esto quiere decir, que cuando un nuevo cliente se conecta al servidor, almacena información como la dirección física e IP del cliente que se lo conoce como *Player*. Cada vez que se conecta un nuevo cliente se compara su dirección IP para determinar si es el Cliente Myo o el

Cliente Raspberry, esto se hace con el fin de controlar el flujo de datos (ver Figura 44) y que la información adecuada, llegue al equipo adecuado.



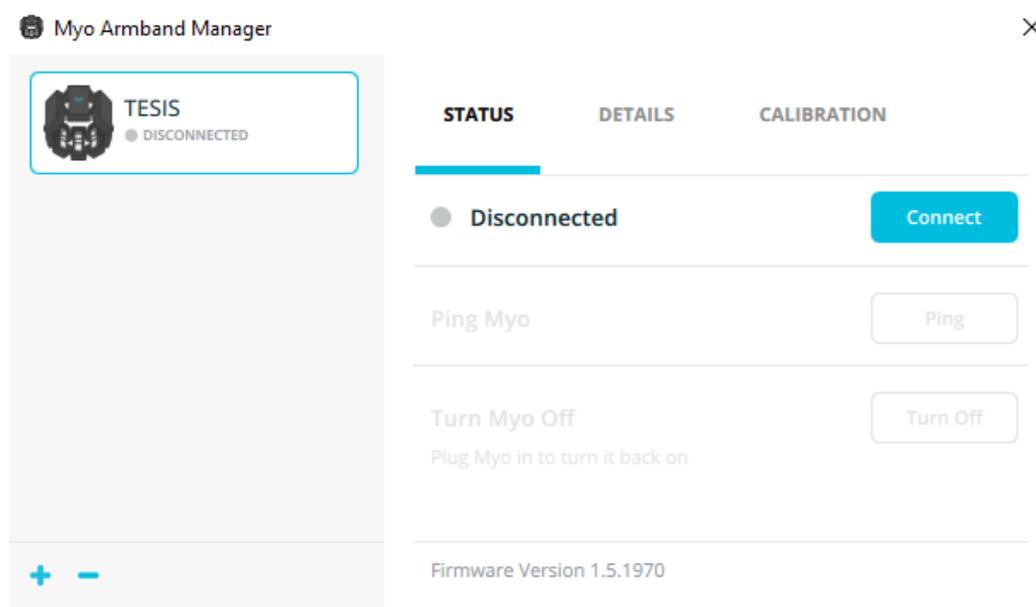
**Figura 44.** Flujo de datos del servidor.

Establecido el flujo de datos, el servidor capta mensajes del Cliente Myo y Cliente Raspberry y responde a quien le haya enviado un mensaje. Si el Cliente Myo envía un mensaje con la información de la banda, el servidor responde con un “ok”, como acuse de recibido. Por otro lado, si el Cliente Raspberry envía un mensaje solicitando datos, el servidor se encarga de enviar la trama

más la acción que el usuario quiere controlar. Esta acción corresponde, al control del sistema móvil o del manipulador robótico. Ya creada la nueva trama se la envía hacia la Raspberry, para procesarla y crear acciones de control sobre los actuadores.

#### 4.2.2 Cliente Myo

La Myo Armband, utiliza los controladores provistos por el SDK propio de la banda, para enlazarla con el adaptador Bluetooth 4.0, de esta manera enviar información, de la Myo Armband al entorno Visual C++. Una vez instalado los controladores de la banda, en el ordenador al cual se va a comunicar, se debe inicializar el sistema (ver Figura 45) en el centro de control de la Myo Armband. En esta aplicación se puede realizar algunas tareas como: conectar la banda al ordenador, realizar un *ping* para rastrearla, conocer el estado de la batería, apagarla y realizar calibraciones según el usuario que la va a poseer.



**Figura 45.** Centro de control de la Myo Armband.

Establecida la comunicación entre la banda y el ordenador, se procedió a enviar la trama, que contiene el gesto y los diferentes ángulos usados para el control de los sistemas. Para enviar la trama, se tuvo que implementar el mecanismo de comunicación en el entorno de programación Visual C++. Para esto se debe crear un objeto tipo socket, definir el tamaño del buffer de llegada, asignar una dirección IP y un puerto, por el cual se envía y recepta toda la información. En este caso se envía la trama al Servidor Python y tiene los siguientes datos de configuración para crear el socket del Cliente Myo:

- IP: 127.0.0.1 (servidor)
- Puerto: 8982
- Tamaño de buffer: 1024

Al ser una comunicación bidireccional, el cliente debe conocer cuando el servidor recibió la trama, por tal motivo no se envía otra, hasta que el acuse de recibido haya llegado.

#### **4.2.3 Cliente Raspberry.**

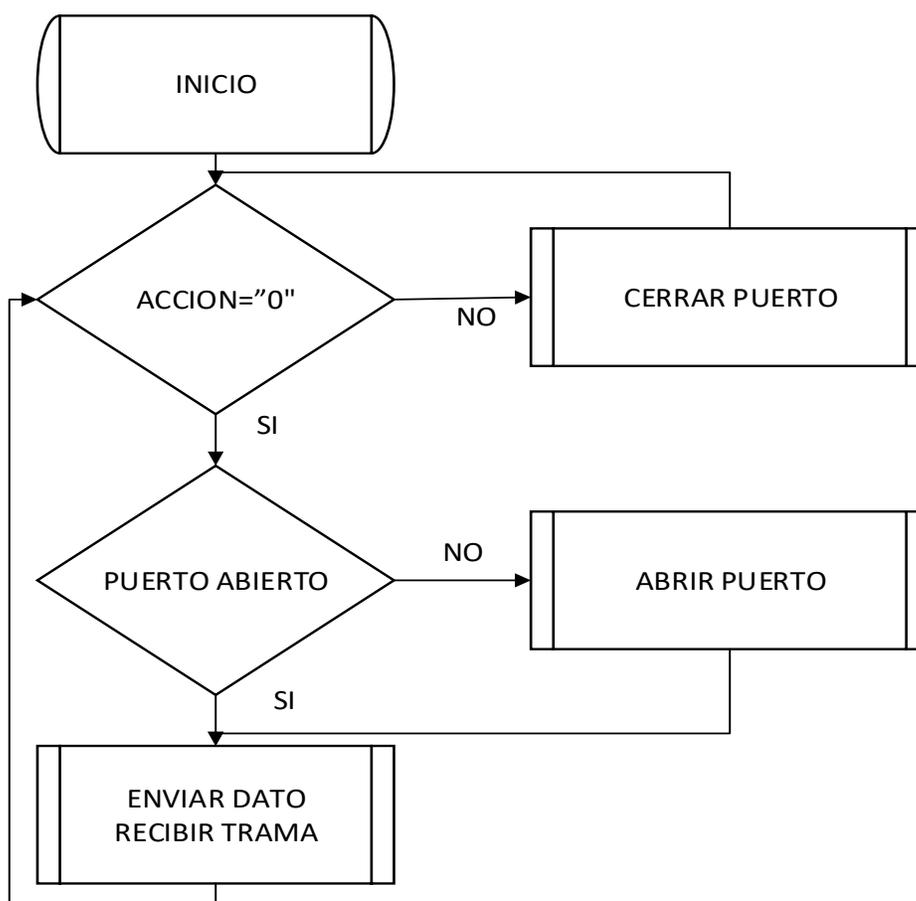
Al igual que la distribución en Windows, Python para Raspbian, necesita incluir la librería “*socket*”. Con la diferencia que, en los parámetros de configuración, la dirección IP sea la del servidor, de esta manera se tiene:

- IP: 192.168.0.101 (servidor)
- Puerto: 8982
- Tamaño de buffer: 1024

Este sistema, además de comunicarse mediante sockets con el servidor, también se comunica mediante un medio físico, con otra tarjeta Teensy. Esta comunicación se la conoce como serial y es el puente de comunicación entre la Raspberry y la Teensy. Para crear este enlace se debe agregar

la librería “serial”, y crear una clase cuyos parámetros sean: el nombre del puerto de comunicación y la tasa de transferencia de bits también denominada “baudios”, que comúnmente se utiliza de 9600. Creada la clase, se procede a validar si el puerto está abierto o no, para que comience la transferencia de datos.

En el caso particular de esta investigación solo se abre el puerto de comunicación, cuando se desee controlar el manipulador robótico, caso contrario, se procederá a cerrar el puerto establecido. En la Figura 46 se observa el diagrama de flujo asociado a la apertura y cierre del puerto de comunicación. Creados los puertos de comunicación, se procedió a enviar la trama recibida de la tarjeta Teensy y del servidor, a sus respectivos destinos.



**Figura 46.** Apertura y cierre del puerto serial.

#### **4.2.4 Comunicación Servidor – Cámara.**

Para que el sistema de visión remota, despliegue la imagen en la aplicación del servidor, es necesario importar la librería “cv2”. Esta librería permite crear un canal de recepción de imágenes, mediante la utilización de la dirección IP del teléfono móvil. Para que el teléfono móvil, cumpla las funciones de cámara IP, es necesario instalar una aplicación llamada IP Webcam. Esta aplicación crea un servidor en el teléfono, que transmite el video que capta la cámara del dispositivo móvil.

IP Webcam posee opciones de visualización como: editar el tamaño de video, contraste, enfoque, etc. se puede habilitar un canal bidireccional de audio, está habilitada la opción de visualizar en navegadores web, en donde existe opciones avanzadas como: prender el led del dispositivo móvil, realizar zoom a la cámara, tomar instantáneas (“IP Webcam - Aplicaciones en Google Play,” 2018).

Para acceder al video desde el servidor, se debe crear una clase utilizando la librería “cv2”, además, dentro de su configuración se debe especificar la dirección IP del servidor de la cámara, en este caso la dirección IP es 192.168.0.102. Creado el canal de comunicación de video e inicializado el servidor en el dispositivo móvil, el video se desplegada en la interfaz gráfica del operador, para que pueda observar el entorno por donde se desplaza la plataforma robótica móvil.

### **4.3 Software de control**

Como se indicó en la introducción, los diferentes sistemas no poseen un software de control similar, por tal motivo, esta sección se enfocó en detallar los diferentes entornos de programación y como se los utilizó para emplearlos en esta investigación.

### 4.3.1 SDK Myo Armband.

El Kit de desarrollo de software (SDK por sus siglas en ingles *Software Development Kit*), reúne un conjunto de herramientas que permite desarrollar una aplicación para un sistema específico. Sus funciones se centran en la de comunicación y adquisición de información de la Myo Armband con el lenguaje de programación C++. El SDK de este sistema consta de los siguientes directorios que se mostraran en la Tabla 16 (“Myo SDK 0.9.0: Getting Started,” 2018).

**Tabla 16.**  
*Directorios del SDK*

Directorio	Contenido
Bin	La biblioteca de enlace dinámico (DLL por sus siglas en ingles dynamic-link library).
Docs	Documentación del SDK.
Drivers	Controladores para el uso del Bluetooth incluido.
Include	Encabezados C y C++
Lib	Archivos .lib para vincular con el SDK
Samples	Ejemplos de programas

La parte fundamental de la SDK, es la biblioteca *libmyo*, permitiendo una comunicación entre el brazalete y el lenguaje de programación o aplicación. Consta también con diferentes eventos, que proporciona datos como: espaciales, gestuales. Los eventos gestuales son asíncronos, esto quiere decir que ocurren de manera irregular. Los eventos espaciales son eventos síncronos y se ejecutan en un periodo fijo.

En los archivos provistos por el SDK, existen ejemplos en los cuales ya están plasmadas todas las librerías, eventos, etc. necesarias para implementar un programa. El ejemplo, “*hello-myo.cpp*”, se ajusta a los requerimientos de la investigación, salvo ciertos parámetros que deben incluirse como: la comunicación y el acondicionamiento de la cadena de caracteres, que posteriormente se envía al servidor.

#### 4.3.2 Obtención de información de la Myo Armband.

Indicados los gestos y ángulos requeridos (ver Tabla 6 y Tabla 9) para controlar los sistemas como: la plataforma robótica móvil y el manipulador robótico, se analiza cómo se adquiere esa información y como se la procesa para utilizarla. El entorno de programación que se emplea para la comunicación y adquisición de datos desde la Myo Armband es Microsoft Visual Studio 2017 en su versión 15.5.1, utilizando como base el lenguaje de programación C++.

Partiendo del ejemplo *hello-myo.cpp*, se procedió a implementar el mecanismo de comunicación sockets, además, de reordenar en una sola cadena de caracteres, la pose y los tres ángulos (*pitch*, *roll* y *yaw*) separados por una barra “/”. Esto se lo hace con fines prácticos para su posterior procesamiento en la unidad de control de la plataforma.

Si el SDK de la Myo Armband, detecta una banda activa, los eventos gestuales y espaciales comenzaran a ejecutarse y se alteran las siguientes variables que se detallaran en la Tabla 17

**Tabla 17.**

*Variables de interés del SDK*

Variable física	Nombre de la cadena de caracteres
Gesto	poseString
roll	roll_s

CONTINÚA 

pitch	pitch_s
yaw	yaw_s

Identificada la cadena de caracteres, vinculada con la variable física que mide la banda, se procede a crear una trama en la cual se concatena todas las variables de la Tabla 17. La trama resultante es el resultado de combinar una variable física con una barra “/”. Creada la trama se debe realizar un cambio de tipo de variable, de una variable tipo *String* a una tipo *Const\_char*. Este proceso de casteo se lo realiza debido a que los sockets solo permiten este tipo de datos.

$$trama = poseString + "/" + roll_s + "/" + pitch_s + "/" + yaw_s + "/"$$

Llegada la *trama* al Servidor Python, se le agrega un dato más a la cadena, este dato es el encargado de informar al centro de procesamiento, que sistema se va a controlar o si se va a realizar un paro total de todos los sistemas (ver Tabla 18). De esta manera la cadena de caracteres que llega al Cliente Raspberry se denomina *dato*.

$$dato = trama + accion + "/"$$

**Tabla 18.**

*Variable para gobernar las acciones del sistema*

Variable “acción”	Sistema a gobernar
acción=”0”	Manipulator robótico
acción=”1”	Plataforma móvil
acción=”2”	Paro de emergencia

### 4.3.3 Control de la plataforma móvil.

Llegada la trama al Cliente Raspberry se procede a decodificarla, de esta manera se transforma la información en una cadena de caracteres. Para separar los datos gestuales, espaciales y de acción se empleó la función *Split*. Esta se encarga de buscar un carácter en especial, en este caso la barra “/” y cada vez que se lo encuentre crea un vector con el contenido anterior a él.

Por ejemplo, utilizando la trama llamada *dato* se tiene que  $dato\_1 = dato.split("/")$  y el resultado de utilizar esta función es un vector de 5 posiciones descritas en la Tabla 19.

**Tabla 19.**

*Valores del vector aplicado la función Split*

Vector y posición	Variable
Dato_1[0]	Gesto
Dato_1[1]	<i>Roll</i>
Dato_1[2]	<i>Pitch</i>
Dato_1[3]	<i>Yaw</i>
Dato_1[4]	Acción

Una vez separado los datos, se puede crear condiciones para gobernar el sistema móvil. Si la variable acción tiene un valor de “1” según la Tabla 18, se procedió a activar o desactivar los pines de control. En la

Tabla 20 se puede evidenciar que pin se activa con un gesto en particular.

El control de la plataforma móvil se lo realiza en el entorno Python, para esto se agregó la librería *GPIO*, que permite controlar los pines digitales de entrada y salida y de esta manera activar

o desactivar los canales del módulo relé configurado como puente H, permitiendo el giro de las llantas (ver Tabla 6).

**Tabla 20.**

*Activación y desactivación de los pines digitales*

<b>Gesto</b>	<b>Movimiento</b>	<b>GPIO 17</b>	<b>GPIO 27</b>	<b>GPIO 23</b>	<b>GPIO 24</b>
Flexión de los dedos	Adelante	LOW	HIGH	HIGH	LOW
Extensión de los dedos	Atrás	HIGH	LOW	LOW	HIGH
Flexión de la muñeca	Izquierda	LOW	HIGH	LOW	HIGH
Extensión de la muñeca	Derecha	HIGH	LOW	HIGH	LOW
SIN GESTO	Paro y paro de emergencia	HIGH	HIGH	HIGH	HIGH

Establecidas las señales de control, para el sistema móvil, se tuvo que alistar la información que se envía mediante comunicación serial a la tarjeta Teensy. Para esto, se envió el dato receptado del servidor, decodificado en una cadena de caracteres. Además, el dato proveniente de la Teensy se lo debe codificar para utilizarlo en el envío por socket y que de esta manera llegue al servidor los valores de los sensores químicos.

#### **4.3.4 Control del manipulador y sensado en TeensyDuino.**

Para programar a la tarjeta Teensy 3.6, se debió utilizar el entorno de desarrollo integrado (IDE, por sus siglas en inglés *Integrated Development Environment*) de Arduino. Además, de utilizar el IDE de Arduino, también, se empleó el complemento *Teensyduino*, que permite compilar los *sketches* creados para Arduino en la Teensy 3.6. Al utilizar este complemento todas las funciones

básicas como: lectura y escritura de puertos digitales y analógicos, configuración de pines y librerías pueden ser utilizadas normalmente en esta plataforma.

Disponibles, el entorno de programación y el complemento para la Teensy, se procede a configurar las entradas, salidas digitales y puertos analógicos de la tarjeta (ver Tabla 21), además, se incorporó la librería *servo.h*, que permite controlar y modificar la posición de los servos a un ángulo determinado.

**Tabla 21.**

*Configuración de los pines de la tarjeta Teensy*

Pin	Función	Dispositivo	Acondicionamiento
2	PWM	Servo base	---
3	PWM	Servo hombro	
4	PWM	Servo codo	
5	PWM	Servo muñeca 1	
6	PWM	Servo muñeca 2	
7	PWM	Servo efector	
17	Pin digital de salida	Ventilador	
21	Pin digital de salida	Calentadores	
22	Pin digital de entrada	Sensor inductivo	5*1024
23	Pin digital de salida	Bomba	
33	Pin analógico	TGS2610	
34	Pin analógico	TGS2602	
35	Pin analógico	TGS2600	
36	Pin analógico	TGS826	500*1024
37	Pin analógico	TGS822	
38	Pin analógico	Sensor Temperatura	

Establecida la configuración de la tarjeta Teensy, se creó una subrutina llamada *Split*, que permite recibir datos del puerto serial y al igual que la función nombrada anteriormente, crea vectores con la información proveniente de los demás sistemas. Con esta información el sistema

es capaz de condicionar y activar los servomotores, dependiendo al gesto que hizo el operador y los ángulos recibidos. La limitación de los ángulos se puede observar en la Tabla 9.

El sistema, luego de iniciada la aplicación, enciende automáticamente los calentadores y los ventiladores de la caja de sensado químico. Esta previa preparación, alista a los sensores para que su respuesta ante un volátil sea la esperada, además, limpia la caja ingresando y expulsando aire contaminado. La bomba de succión, se enciende únicamente cuando en la interfaz gráfica, el operador seleccione la opción de sensar. En este caso se acciona la bomba de succión y los ventiladores se apagan para que la concentración del volátil sea mayor, permitiendo una mejor captación de los sensores.

Adquiridas las señales análogas de los sensores de temperatura y de la familia fígaro, se realizó un acondicionamiento. Este permitió desplegar los valores obtenidos del sensor de temperatura en grados centígrado y el valor de los sensores químicos en voltaje, en un rango de 0v a 5v (ver Tabla 21). Además, para el sistema auxiliar de detección de metales, se usó un sensor inductivo descrito en el capítulo anterior, cuya señal de activación era digital. Todos estos valores que eran entradas para la tarjeta Teensy, se almacenaron en variables independientes y se construyó una trama llamada *envio*. Esta cadena de caracteres se utilizó en el servidor para la interfaz gráfica del operador.

$$\begin{aligned} \text{envio} = & \text{dato1} + "/" + \text{metal} + "/" + \text{TGS822} + "/" + \text{TGS826} + "/" + \text{TGS2600} + "/" \\ & + \text{TGS2602} + "/" + \text{TGS2610} + "/" + \text{TEMPERATURA} + "/" \end{aligned}$$

## CAPÍTULO V

### INTEGRACIÓN DE LOS SUBSISTEMAS

#### 5.1 Introducción.

El hardware fue integrado con todos sus dispositivos y conexiones establecidas, se procedió a integrar toda la comunicación y sistemas de control descritos en el capítulo anterior. Para esto todos los dispositivos deben inicializar y ejecutarse para que el flujo de datos comience a llegar a todos los dispositivos conectados. No obstante, para inicializar toda la plataforma se debe seguir una secuencia lógica que permita el funcionamiento de manera adecuada y sin problemas.

Como primer paso se tuvo que encender y conectar la banda Myo Armband y el servidor de la cámara del dispositivo móvil, este paso es de gran importancia debido a que son los generados de datos principales en el sistema. Estos dispositivos son la fuente de los datos gestuales y de los ángulos que se utilizan para el control del robot móvil y el manipulador robótico, además, transmite imágenes del entorno para la visualización en la interfaz gráfica.

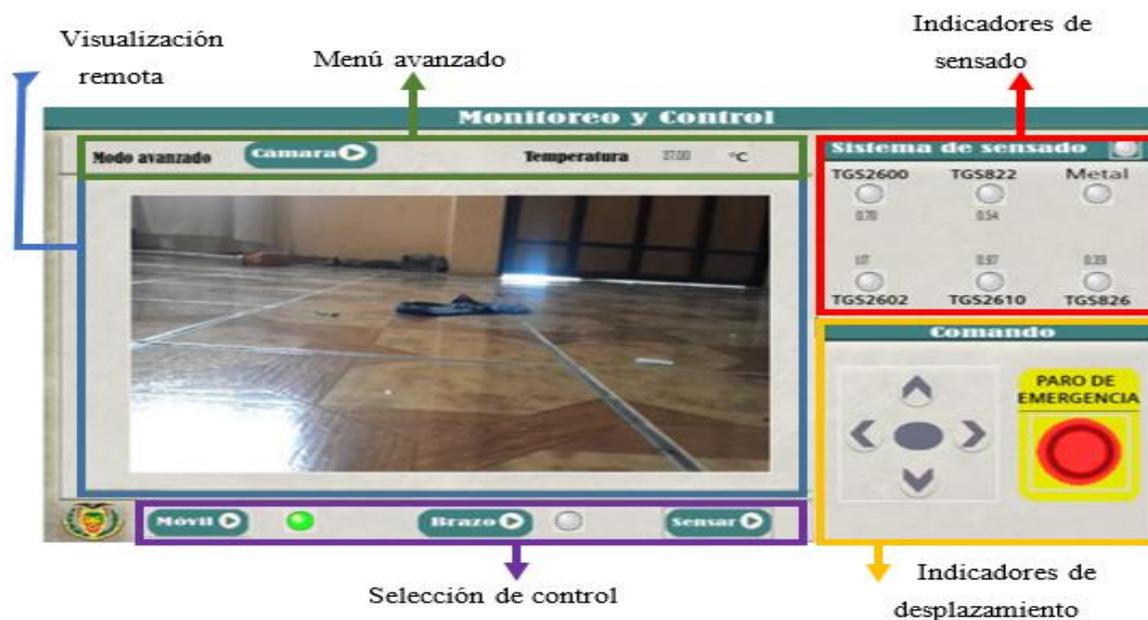
El siguiente paso es iniciar el servidor principal, para desplegar la interfaz gráfica y que el servidor esté a la espera de recibir comunicación de los clientes: Cliente Myo y Cliente Raspberry. Después de inicializar el servidor, se procede a ejecutar la aplicación de Visual C++, encargada de obtener y crear la primera trama. Al realizar este paso, el primer cliente se conecta y transmite información al servidor principal.

Como último paso, se ejecuta la aplicación de la tarjeta Raspberry, encargada de controlar y transmitir información a los sistemas que se encuentran en la plataforma móvil. Al ejecutar este paso, el segundo cliente llamado Cliente Raspberry se conecta al servidor. Como se mencionó

anteriormente el puerto de comunicación serial transmitirá información únicamente cuando se esté gobernando el manipulador robótico.

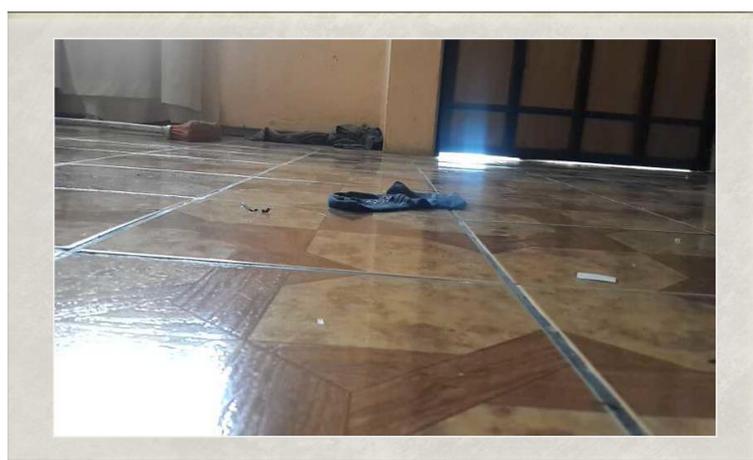
## 5.2 Diseño de la interfaz gráfica.

Establecida la comunicación entre todos los dispositivos y creado el flujo de datos de la información, se procedió a desplegar esa información en una interfaz gráfica. Esta interfaz permite al usuario visualizar (ver Figura 47): el entorno por el cual se moviliza la plataforma, el menú de control donde se elige que dispositivo se va a controlar. La interfaz dispone de una sección de indicadores, que desplegara la activación de los sensores químicos al igual que el sensor inductivo. En la barra de navegación, se visualiza las acciones de desplazamiento del robot móvil, indicando en qué sentido se desplazará, además, de un paro de emergencia para detener todo el sistema. En la parte superior, consta de un menú avanzado, en el cual existe un botón para ingresar a los comandos avanzados de la cámara y de igual manera la temperatura interna de la caja de sensado.



*Figura 47.* Distribución de la interfaz gráfica.

Establecido el servidor de video en la aplicación IP Webcam, se debe realizar configuraciones en la aplicación del servidor en Python. Esta configuración crea el entorno de visualización remota (ver Figura 48), designando un espacio dentro la interfaz, para esto se debe ingresar la dirección IP de la cámara. Debido a que se utiliza la interfaz gráfica de usuario de Python (GUI, por sus siglas en inglés *Graphical User Interface*), se presentaron inconvenientes de visualización y para solventar los mismos, se decidió crear un hilo para que la visualización sea fluida. Un hilo es la ejecución en paralelo al programa principal de una porción de código.



**Figura 48.** Visualización de imagen en la interfaz.

Los botones, que dispone la interfaz gráfica en la selección de control (ver Figura 49), se usan para comandar el robot móvil, manipulador robótico e iniciar el proceso de sensado. Estas funciones son ejecutadas mediante subrutinas en el servidor y guardan una variable tipo bandera, para dar a conocer a la interfaz en que sistema se encuentra. Las variables tipo bandera almacenan estados de los procesos y según sus valores se crean condiciones para el programa.



**Figura 49.** Selección de control de la interfaz.

Los indicadores de los sensores son desplegadas en la parte superior derecha de la interfaz gráfica, esta sección despliega el estado de activación de los cinco sensores químicos y del sensor inductivo (ver Figura 50). Los indicadores se activan cuando el valor de voltaje supera los 3 voltios siendo este el umbral establecido para la activación de los indicadores, mientras que, la activación del indicador del sensor inductivo, está relacionado directamente con la detección de algún metal a no menos de 4mm de distancia. Estos indicadores cambian su estado de encendido o apagado una vez finalizado el proceso de sensado.



**Figura 50.** Indicadores de los sensores químicos e inductivo.

El indicador de desplazamiento, muestra la dirección de movimiento del vehículo, de esta manera, indica cuando el vehículo está: avanzando, retrocediendo y girando tanto para la derecha como la izquierda (ver Figura 51). Consta de un pulsador que detiene todos los dispositivos y cumple la función de un paro de emergencia, ante cualquier amenaza de choque de la plataforma móvil o del manipulado.



**Figura 51.** Indicadores de desplazamiento.

La última barra que posee la interfaz gráfica, es la barra de comandos avanzados (ver Figura 52), en esta se encuentra un botón que permite ingresar a las propiedades avanzadas de la cámara. Estas propiedades permiten al dispositivo móvil realizar acercamientos de cámara, encender el flash del dispositivo, cambiar de resolución de la imagen, activar el canal de audio bidireccional, etc. También despliega la temperatura interna de la caja de sensado, con el objetivo de conocer si la temperatura es la adecuada para el trabajo óptimo de los sensores químicos.



**Figura 52.** Barra de comandos avanzados.

Explicado el diseño de la interfaz gráfica, sus partes y cómo funcionan, se procede a explicar cómo el operador debe usar la interfaz para utilizar la plataforma móvil. También se menciona algunas recomendaciones que debe hacer el operador cuando se hace la transición de móvil a brazo.

Al iniciar el servidor, por defecto, comienza el control en el robot móvil, se realiza esto para asegurar que al mover intencionalmente la mano el manipulador no sufra daños. Tanto en el botón *Móvil* y *Brazo*, existen indicadores que le permite conocer al usuario que dispositivo está

gobernando. Si el operador desea cambiar el control al manipulador, debe seleccionar el botón *Brazo*, inmediatamente el indicador se encenderá y el operador procede a controlar al manipulador.

Para iniciar el proceso de sensado químico, el sistema tiene ciertas validaciones, asegurando que solo comience el proceso cuando el control este sobre el brazo. Esto quiere decir que el operador debe seleccionar la opción *Brazo*, acercarse a la fuente de interés y seleccionar el botón *Sensar*. En este paso, se debe asegurar tener el brazo quieto y flexionado hacia arriba, para garantizar que el manipulador no tenga movimientos bruscos.

### **5.3 Pruebas y Resultados.**

En este apartado se detallará los experimentos que se realizaron para evidenciar el funcionamiento del prototipo realizado en este trabajo de investigación. Los experimentos que se realizaron fueron en base a: distancia de comunicación entre: la unidad central de procesamiento (Raspberry y Teensy) con el concentrador de información, el ordenador con el concentrador de información, y la Myo Armband con el ordenador. Por otro lado, se realizó pruebas del sensado químico, utilizando compuestos químicos comunes y comerciales, que se pueden obtener sin restricción y contengan las sustancias que captan los sensores de la familia Fígaro.

#### **5.3.1 Latencia de la comunicación**

La comunicación entre los sistemas debe ser lo más rápido posible y no presentar retardos, puesto que de ella depende el flujo de datos. La suma de tiempos que se demora en el envío de información de un punto al otro se denomina tiempos de retardo o latencia. En una sección de todo el conjunto de datos, se encuentran los comandos gestuales, que son los que controlan a toda la plataforma robótica móvil. Es por ello que la comunicación no debe presentar retardos. Para esta

experimentación se utilizó tres tipos de concentradores, en un entorno cerrado de dimensiones 4 x 4 x 2.3m. Esta prueba se realizó mediante programación, calculando el tiempo entre en envío y el acuse de recibo.

El primer concentrador es el TP-Link TL-WA850RE, el cual es un repetidor universal, puede llegar hasta una velocidad de 300Mbps en la banda de 2.4Ghz. Con este el retardo de los datos enviados desde el ordenador a la Raspberry es de 7 segundos, lo cual para este trabajo es inapropiado.

El segundo concentrador es el TP-Link TL-MR3220, este es un router inalámbrico, su velocidad de transmisión puede llegar hasta 150Mbps. Este por poseer características de router a diferencia del anterior, el retardo de los datos enviados es de 3s. Con este retardo la plataforma robótica móvil puede ser controlada pero no es lo más eficiente.

Finalmente, se realizó las pruebas con el router Cisco RV130, el cual posee un alto rendimiento, su velocidad de transmisión llega hasta 800Mbps. Con este los datos enviados y por ende el control sobre la plataforma robótica móvil es en tiempo real.

Una vez seleccionado el router se procedió a realizar las pruebas de la distancia máxima de comunicación. Esta prueba fue realizada en un entorno sin barreras y con el router Cisco. Tomando como referencia inicial la ubicación del ordenador, se comanda sin problemas la plataforma robótica móvil a una distancia máxima de 25 metros. Pero puede extenderse hasta 30 metros con posibles fallas, una de estas puede ser que la plataforma robótica ejecute la última acción realizada, antes de que se pierda la comunicación. Esto podría hacer que la plataforma se desplace o gire sin control alguno.

### 5.3.2 Sistema de sensado.

Para el sistema de sensado es necesario conocer el tiempo mínimo requerido para la captación de aire de la fuente de olor (Alejandro Espinosa & Venegas Villacis, 2017). Por esta razón el primer experimento que se realizó fue de captación de aire. Se conocía que la fuente de olor estaba dopada de 5ml de *thinner*, el tiempo inicial de captación de aire fue de 60s, con el cual se saturaron todos los sensores. Se procedió a ir disminuyendo el tiempo y se determinó que el tiempo mínimo requerido para un correcto sensado es de 17s. Por otro lado, se debe realizar la limpieza de la caja de sensado, para lo cual se determinó que los sensores vuelven a sus condiciones iniciales luego de 25s. Para realizar las pruebas del sensado químico se usaron cuatro elementos comerciales. En la Tabla 22 se describe los elementos y las sustancias que los componen.

**Tabla 22.**

*Composición química de los elementos de prueba.*

Elementos de prueba	Componentes químicos
Alcohol	Etanol
<i>Thinner</i>	Tolueno Alcohol metílico Cetonas Hexano Alcoholes Xileno Ésteres
Gasolina	Nafta Butano Butenos Aquilato Etanol
Cemento de Contacto	Tolueno

El experimento se llevó a cabo mediante el sensado de las sustancias a diferentes distancias. Las sustancias se incrementaron 1 ml hasta llegar a 5ml. Tomando en cuenta los tiempos de los experimentos anteriores de captación de aire y la limpieza de la caja de sensado.

La primera prueba que se realizó es colocando el efector a las distintas distancias, pero sin dopar la fuente, con esto se determinó que los valores entregado por los sensores no sobrepasan los 0.8v. Como se muestra en la Tabla 23. Y la temperatura dentro de la caja de sensado fue de 37°C.

**Tabla 23.**

*Pruebas en vacío*

Vacío															
TGS	2600	822	2602	2610	826	2600	822	2602	2610	826	2600	822	2602	2610	826
ml/cm	0					2					4				
0	0,42	0,4	0,15	0,55	0,2	0,42	0,4	0,17	0,57	0,2	0,43	0,4	0,18	0,6	0,2
ml/cm	6					8					10				
0	0,45	0,5	0,19	0,62	0,3	0,5	0,7	0,26	0,65	0,4	0,56	0,8	0,39	0,71	0,7

Los valores de respuesta de los sensores TGS se miden en voltios.

Las pruebas realizadas con el alcohol se muestran en la Tabla 24. Cuando la distancia del efector respecto a la fuente de olor es de 2cm, y la concentración de la sustancia es de 5ml; los sensores TGS2600 y TGS2602 sobrepasan el umbral de detección, este último su valor está a 0.62v de saturarse. Por otro lado, al ubicar el efector sobre la fuente de olor a 0cm de distancia y una concentración de 1 ml, cuatro sensores sobrepasan el umbral de detección, mientras que al usar 5ml a la misma distancia, solo el TGS2602 entra en saturación. Pero todos los sensores sobrepasan el umbral de detección. El valor de temperatura dentro de la caja de sensado fue de 39,75°C.

**Tabla 24.**  
*Pruebas con Alcohol*

Alcohol															
TGS	2600	822	2602	2610	826	2600	822	2602	2610	826	2600	822	2602	2610	826
ml/cm	0					2					4				
1	3,49	3	4,38	3,16	3	0,91	0,7	1,89	1,3	0,8	0,93	0,8	1,91	1,43	0,8
2	3,61	3,1	4,41	3,15	2,9	3,31	2,8	4,24	2,95	2,6	2,43	2	3,57	2,3	1,9
3	3,82	3,2	4,49	3,16	2,8	2,72	2,2	3,76	2,38	1,9	1,37	1,2	2,39	1,5	1
4	3,55	2,9	4,4	2,93	2,5	1,41	1,1	2,45	1,46	0,9	0,94	0,7	1,71	1,11	0,6
5	4,57	3,9	5	3,4	3	3,63	3	4,38	2,94	2,5	2,87	2,2	3,88	2,4	1,9
ml/cm	6					8					10				
1	0,79	0,7	1,69	1,23	0,7	0,68	0,6	1,43	1,13	0,59	0,48	0,4	0,65	1,04	0,4
2	1,17	1	2,21	1,48	0,9	1	0,8	1,96	1,31	0,8	0,89	0,7	1,71	1,22	0,7
3	1,77	1,4	2,88	1,8	1,3	1,53	1,2	2,62	1,58	1	1,21	1,1	2,13	1,44	0,9
4	1,77	1,4	2,91	1,66	1,1	1,32	1	2,5	1,33	0,9	1,06	0,9	1,85	1,25	0,7
5	2,06	1,6	3,28	1,86	1,4	1,57	1,2	2,79	1,48	1	1,36	1	2,41	1,38	0,8

Los valores de respuesta de los sensores TGS se miden en voltios.

Luego se procedió a realizar la experimentación con el *thinner* (ver Tabla 25). De igual manera que con el alcohol, se posiciona el efector respecto a la fuente de olor, a una distancia de 10cm y una concentración de 1 ml; se procedió a sensar con estas condiciones y se observa que el sensor TGS2602 muestra un valor superior al del umbral, además los demás sensores presentan valores más altos respecto a los del alcohol. A diferencia de este, los sensores con el *thinner*, a la distancia de 4cm y con la concentración de 2ml todos los sensores sobrepasan el umbral. Por otro lado, todos los sensores llegan a saturarse cuando el efector está a 0cm y la fuente dopada de 4ml. El valor de temperatura dentro de la caja de sensado fue de 40,58°C.

**Tabla 25.**  
*Pruebas con Thinner*

<i>Thinner</i>															
TGS	2600	822	2602	2610	826	2600	822	2602	2610	826	2600	822	2602	2610	826
ml/cm	0					2					4				
1	5	5	5	4,17	5	4,82	3,9	5	3,4	4,5	3,49	2,3	4,66	2,34	3,1
2	5	5	5	4,24	5	4,61	3,7	5	3,36	4,5	4,28	3,4	5	3,1	4,4
3	5	5	5	4,4	5	5	4,6	5	4,05	5	4,27	3,5	5	3,09	4,1
4	5	5	5	5	5	4,8	3,6	5	3,51	4,5	4,82	3,4	5	3,73	4,5
5	5	5	5	5	5	5	4,1	5	3,76	4,8	4,91	3,9	5	3,65	4,8
ml/cm	6					8					10				
1	3,35	2,3	4,56	2,39	3,2	2,81	1,8	4,19	2	2,6	1,96	1,3	3,37	1,57	1,8
2	3,29	2,3	4,64	2,27	3,1	2,23	1,5	3,81	1,67	2,1	1,71	1,1	3,02	1,34	1,3
3	3,28	2,3	4,7	2,3	3,2	1,83	1,3	3,21	1,46	1,5	1,91	1,2	3,19	1,51	1,5
4	2,69	1,7	4,16	1,84	2,3	2,73	1,9	4,26	2	2,7	2,26	1,6	3,72	1,68	2
5	2,79	1,9	4,07	2,07	2,7	2,79	1,8	4,29	2,1	3	2,64	1,7	4,16	1,98	2,8

Los valores de respuesta de los sensores TGS se miden en voltios.

Otra de las sustancias que se utilizó para realizar las pruebas fue la gasolina, las mediciones se muestran en la Tabla 26. Al posicionar el efector a 10cm de la fuente dopada de 3ml, en estas condiciones se determinó que el sensor TGS2602 supera el umbral de detección. Mientras que a 2cm a la fuente de olor y dopada con 4 ml, todos los sensores sobrepasan en umbral de detección. Por otro lado, al realizar las mediciones a la distancia de 0cm y dopada con 5 ml, solo el sensor TGS2610 no se satura. El valor de temperatura dentro de la caja de sensado fue de 42.06°C.

**Tabla 26.**  
*Pruebas con Gasolina*

<i>Gasolina</i>															
TGS	2600	822	2602	2610	826	2600	822	2602	2610	826	2600	822	2602	2610	826
ml/cm	0					2					4				
1	4,35	3,5	5	3,23	5	3,05	1,8	4,84	2,15	3,7	1,38	0,8	2,57	1,18	1,3
2	4,8	4,4	5	3,78	5	3,96	2,8	5	2,79	4,7	1,47	0,8	2,76	1,17	1,3
3	4,97	4,6	5	3,75	5	3,74	2,7	5	2,6	4,7	2,26	1,4	4,25	1,62	2,9
4	4,96	4,6	5	3,58	5	4,3	3,3	5	3	5	3,01	1,9	4,87	2,11	3,9
5	5	5	5	4,61	5	4,49	3,7	5	3,27	5	3,22	2,1	5	2,28	4,3
ml/cm	6					8					10				

CONTINÚA 

1	1,59	0,8	2,93	1,3	1,5	1,28	0,7	2,21	1,13	1	1,13	0,6	1,91	1,07	0,9
2	1,08	0,7	1,87	0,99	0,9	1,47	0,9	2,87	1,21	1,5	1,24	0,8	2,43	1,1	1,2
3	2,06	1,3	3,81	1,49	2,3	1,9	1,2	3,63	1,42	2,1	1,72	1,1	3,22	1,26	1,7
4	1,93	1,2	3,77	1,39	2,3	1,91	1,3	3,78	1,46	2,4	1,73	1,1	3,31	1,29	1,9
5	2,5	1,7	4,34	1,86	3,3	2,21	1,5	4,01	1,68	2,8	1,76	1,4	3,48	1,37	2,4

Los valores de respuesta de los sensores TGS se miden en voltios.

Para terminar las pruebas con las sustancias se utilizó cemento de contacto, los valores de las mediciones se detallan en la Tabla 27. Posicionando el efector a 10cm de la fuente de olor con concentración de 1 ml; los sensores TGS2602 y TGS826 superan el umbral de detección. Además, el primer sensor en saturarse es el TGS2602 cuando se ubica el efector a 10cm y la concentración de la sustancia es de 3 ml. En cambio, cuando se posiciona el efector a 4 cm de la fuente dopada de 4 ml, todos los sensores superan el umbral de detección y los sensores TGS2602 y TGS826 se saturan. Al igual que en las pruebas con la gasolina, al realizar las mediciones a la distancia de 0cm y dopada de 5 ml, solo el sensor TGS2610 no se satura. El valor de temperatura dentro de la caja de sensado fue de 42,74°C.

**Tabla 27.**

*Pruebas con Cemento de Contacto*

Cemento de Contacto															
TGS	2600	822	2602	2610	826	2600	822	2602	2610	826	2600	822	2602	2610	826
ml/cm	0					2					4				
1	3,08	2,3	4,91	2,06	4,5	2,65	1,9	4,73	1,78	4,2	2,4	1,7	4,57	1,61	3,9
2	4,74	4,1	5	3,55	5	3,15	2,4	4,93	2,13	4,5	2,71	1,9	4,58	1,9	4
3	4,99	4,5	5	3,36	5	4,09	3,5	5	2,83	5	3,9	3,3	5	2,78	5
4	5	4,4	5	3,45	5	4,83	4,3	5	3,29	5	4,76	4	5	3,66	5
5	5	5	5	4,53	5	4	3,1	5	2,91	5	3,79	3,2	5	2,46	5
ml/cm	6					8					10				
1	2,02	1,4	4	1,42	3	2,45	1,7	4,53	1,63	3,7	2,12	1,4	4,18	1,45	3,2
2	2,52	1,8	4,5	1,77	4	2,49	1,7	4,51	1,73	3,8	2,52	1,6	4,39	1,78	3,6
3	3,51	3	5	2,33	5	3,53	2,9	5	2,42	5	3,54	2,9	5	2,47	4,8
4	3,81	3	5	2,57	5	4,15	3,3	5	2,88	5	3,58	2,5	4,97	2,62	4,7
5	3,4	2,8	5	2,26	4,9	3,87	3,3	5	2,46	5	3,79	3,1	5	2,57	4,9

Los valores de respuesta de los sensores TGS se miden en voltios.

### **5.3.3 Autonomía de la plataforma robótica móvil**

Las fuentes de alimentación fueron independizadas, por una parte, se tiene el del robot móvil, y por otra la del manipulador robótico con el sistema de sensado. Esto se lo realizó para que, si en algún momento el manipulador se queda sin energía, este no consuma el del robot móvil y pueda seguir desplazándose hasta el punto de partida.

De igual manera se hicieron las pruebas aisladas, una solo del desplazamiento del robot móvil en un entorno y su tiempo de duración fue de 1.5 horas. Mientras que para el manipulador robótico y el sensado químico, las pruebas se la realizaron posicionando el manipulador hacia la fuente de olor, se procedió a realizar el sensado y a continuación la limpieza de la caja de sensado. Para lo cual en uso continuo la duración fue de 2 horas. Por lo tanto, se selecciona la menor duración de las fuentes, es decir que la autonomía de la plataforma robótica móvil es de 1.5h.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 Plataforma robótica móvil

La plataforma robótica móvil permite desplazarse por el entorno y está compuesto por un conjunto de dispositivos. Uno de ellos es el manipulador robótico, el cual permite la aproximación del conducto del sensado químico a la fuente de interés. El sistema de sensado químico consta de una caja con cinco sensores Fígaro, un sensor de temperatura, la captación de aire y la limpieza de la caja. Además, cuenta con dispositivos de visión y detección de metales. Toda la plataforma se comanda a través de la banda Myo y un HMI los cuales son controlados por el operador.

El desplazamiento sobre un entorno fue imprescindible en esta investigación, puesto que se deben aproximar los dispositivos a la fuente de olor. La plataforma móvil al ser un prototipo base para siguientes trabajos, se seleccionó el robot móvil en función de la capacidad de carga, estabilidad y suspensión. Por esta razón se decidió utilizar la plataforma Dagu Wild Thumper 6WD, que posee suspensión independiente y posee seis motores de alto torque, los cuales permiten que se desplace por entornos agrestes.

El robot móvil al poseer motores de alto consumo de corriente, requieren drivers especiales que en el mercado ecuatoriano no se disponen. Por tal motivo se utilizó un módulo relé de cuatro canales, al cual se lo configuro como dos puentes H; que permiten los movimientos hacia adelante, atrás, izquierda y derecha. Sin embargo, no se tiene control sobre la velocidad de los motores.

Este trabajo de investigación es un prototipo que servirá como base para otras investigaciones, por lo cual se recomienda principalmente mejorar el arranque de los motores de la plataforma

móvil, puesto que el par de arranque inicial no logra superar el par resistente de la carga. Por tal motivo la plataforma no logra desplazarse en algunos terrenos, restringiendo así los entornos de trabajo.

Las fuentes de olor en ocasiones se encuentran posicionadas a diferentes niveles respecto al suelo, y no se puede sentir a esas fuentes. Los manipuladores robóticos permiten alcanzar una mayor área de trabajo (ver Figura 30), y por lo tanto acceder a más zonas para realizar las mediciones. Al realizar el sensado, se observó que al posicionar el conducto del sensado más próximo a la fuente de olor; los valores que se obtienen de los sensores son mayores, esto se puede observar en las Tablas (Tabla 24 - Tabla 27).

Inicialmente se implementó un prototipo del manipulador con toda su estructura impresa en 3D. Con lo cual se observó que no cumplía con los requerimientos de esta investigación. Por lo tanto, se decidió cambiar el material de la estructura y soportes de fijación (excepto de los servos) por otros materiales como acrílico y aluminio, para que el manipulador sea más rígido y estable mecánicamente. Al realizar estos cambios el torque que se requieren en las articulaciones fue mayor. Por lo tanto, se realizó un redimensionamiento de los servomotores, y se usó: dos servomotores metálicos en el hombro y un servomotor en el codo, puesto que son los puntos donde mayor torque requiere el manipulador. De esta manera el manipulador logra realizar las tareas requeridas en este trabajo.

Para esta investigación, el alcance del manipulador fue restringido en cuanto a los movimientos de los servomotores (ver Tabla 9). El manipulador al moverse sin restricción, en ciertas ocasiones se golpea con la estructura de la plataforma, lo cual puede causar daños o recalentamiento en los servomotores y dañar a los sistemas que se encuentren interconectados con ese dispositivo.

La concentración de las sustancias se relaciona directamente con la variación de voltaje, por esta razón se especificó un voltaje umbral de 3v, para determinar la presencia del volátil en la fuente a sensar. Por lo cual en la interfaz gráfica se muestra los valores en voltios e indicadores de activación de los sensores Fígaro. Es por ello que se puede estudiar la posibilidad de desarrollar un sistema de estimación, para determinar el tipo de sustancia mediante el uso de clasificadores.

Los sensores que se encuentran en la caja de sensado, poseen una entrada conocida como *header* o calentador. Este calentador hace que los sensores tengan una temperatura requerida para su correcto funcionamiento. Por tal motivo en esta investigación al ser un prototipo, al *header* se lo activa mediante software para lo cual se utiliza un canal del módulo relé.

## **6.2 Software de control y comunicación**

Los diferentes dispositivos, que se emplearon para desarrollar la plataforma robótica móvil, manejan distintos entornos de programación. Esto hace que la investigación sea un sistema multiplataforma y por lo tanto se tuvo que emplear diferentes tipos de comunicación. Se emplearon tecnologías de comunicación inalámbricas y alámbricas (ver Figura 43), permitiendo de esta manera que todos los sistemas físicos y lógicos trabajen conjuntamente. Además, para integrar la comunicación inalámbrica se creó un servidor que cumple la función de concentrador de datos, y de desplegar la interfaz gráfica que el operador va a visualizar.

Al tener varios dispositivos que comanden los diferentes sistemas, se debe crear un mecanismo de comunicación que permita interconectar a todos estos. El mecanismo de comunicación inalámbrico Sockets, permite crear un servidor que es un concentrador de información, además este permite la conexión de varios clientes. El servidor fue denominado Servidor Python y los clientes Myo y Raspberry, los mismos que fueron direccionados al servidor. Al tener la topología

servidor-cliente, se debe crear condiciones de flujo de datos para que la información correcta llegue al equipo correcto.

Al enviar la información dato a dato a los diferentes clientes, se tenía problemas de retardos y pérdida de información, lo que provocaba que el flujo de datos sea inestable. Para solventar este problema se decidió enviar todos los datos de las diferentes fuentes de información como: datos gestuales, inerciales y de sensado químico; en cadenas de caracteres llamados tramas. Permitiendo enviar toda la información de una sola vez, incrementando la velocidad de comunicación y asegurando la fiabilidad del flujo de datos.

La comunicación serial, al ser un medio físico por el cual se transmite información de manera bidireccional y constante, origina colisiones en el flujo de datos entre la Raspberry y la Teensy que a su vez provoca que se pierda la comunicación. Por tal razón se optó por abrir y cerrar el puerto de comunicación serial siempre y cuando se esté gobernando el manipulador robótico. De esta manera se asegura que el canal no se sature y pueda cumplir con su objetivo de recibir y enviar tramas al servidor.

Al implementar el sistema de visión remota a la interfaz gráfica del usuario, se observó que, por el alto nivel de procesamiento, el visualizador generaba retardos considerables. Haciendo que la visualización del entorno, para el operador no sea óptima para movilizar el sistema. Para solventar este problema, se utilizó programación paralela, permitiendo ejecutar el entorno gráfico en un hilo y la visualización de video en otro. Al utilizar programación paralela se aceleró notablemente la reproducción de video hasta llegar a una visualización en tiempo real.

El hecho de utilizar una sola cámara, en la parte frontal de la plataforma móvil, permite visualizar únicamente la fuente de interés que se va a sensar. Sin embargo, para potenciar el sistema

de visualización, se podría añadir otra cámara que visualice el entorno alrededor de la plataforma teniendo dos puntos de vista de todo el sistema.

### **6.3 Integración de los subsistemas**

Se logró integrar el hardware con el software, los cuales permiten que se controle la plataforma robótica móvil, mediante una aplicación que fue realizada en el entorno gráfico de Python y se conoce como HMI. En esta se encuentran indicadores de los movimientos que realiza la plataforma, indicadores de presencia de las sustancias químicas, visión remota del entorno y botones de control para el robot móvil, el manipulador, la visión y el sistema de sensado.

La interfaz gráfica de usuario al ser realizada en Python requiere el uso de la biblioteca gráfica Tkinter. Esta tiene varias restricciones en cuanto a realizar una interfaz más detallada. Por esta razón se recomienda realizar el HMI en otro entorno de programación que posea mayores prestaciones para el desarrollo de una interfaz gráfica como Java, MatLab entre otros.

La comunicación por sockets permite el direccionamiento a una IP, por lo tanto, se puede estudiar la posibilidad de desarrollar una interfaz HMI en la nube. Permitiendo que se controle la plataforma robótica desde cualquier lugar. Además de que los datos puedan almacenarse en una base de datos en línea. Con esto se pretende integrar este sistema al Internet de las Cosas.

Con la implementación de todos los dispositivos, sistema de comunicación y de control; se logró el objetivo de diseñar e implementar, una plataforma robótica móvil teleoperada, comandada por gestos. También el implementar una interfaz gráfica, que permitió al operador conocer el estado de la plataforma y de los sensores químicos de la familia Fígaro. Además, se cumplió con crear un sistema auxiliar de visión remota y detección de metales que sirvan de soporte a los demás

subsistemas. De esta manera, se cumplió con todos los objetivos planteados, además, del alcance propuesto al inicio de la investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, J. (2013). Diseño e implementación de un algoritmo de estrategias colaborativas entre robots móviles provistos de sensores de olor inteligentes para localizar y posicionar fuentes de olores características., 1–169.
- Alejandro Espinosa, C. E., & Venegas Villacis, C. L. (2017). Optimización e integración de una nariz electrónica autónoma embebida en un sistema robótico para la identificación de sustancias explosivas como TNT y pólvora base doble en ambientes controlados. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/13237>
- Añazco, L. (2015). Diseño del prototipo de un sistema de adquisición de datos para el monitoreo y control de experimentos químicos, mediante el uso de sensores y microcontroladores.
- Arévalo, M., & Pino, M. (2018). Control por voz de un robot explorador tipo oruga. Obtenido de <http://ciecfie.epn.edu.ec/wss/VirtualDirectories/80/PROYECTOS/pdfs/Explorador1.pdf>
- Arvidson, R. (2017). Mars Science Laboratory Curiosity Rover Megaripple Crossings up to Sol 710 in Gale Crater. *Journal of Field Robotics*, 34(3), 495–518. <https://doi.org/10.1002/rob.21647>
- Avila, E. (2017). Caracterización de movimientos de la mano para el control de desplazamiento de un robot móvil.
- Bambino, I. (2018). *Una Introducción a los Robots Móviles Año 2008*. Obtenido de [http://www.aadeca.org/pdf/CP\\_monografias/monografia\\_robot\\_movil.pdf](http://www.aadeca.org/pdf/CP_monografias/monografia_robot_movil.pdf)
- Cerón Correa, A. (2005). Sistemas robóticos teleoperados. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 15(0), 62–72. <https://doi.org/10.18359/rcin.1255>
- Cesar, J., Astete, G. (2016). Sistema Teleoperado aplicado a la manipulación de residuos Teleoperated System Applied to Handling Biohazard, 1(2), 40–47.
- Colta, R. (2018). Clases de robots. Obtenido Agosto 6, 2018, de [http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr\\_0708/archivos/\\_15/Tema\\_5.2.htm](http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0708/archivos/_15/Tema_5.2.htm)
- Cóndor Zapata, A. F., & Martínez Herrera, P. D. (2017). Repotenciación del robot desactivador de bombas con control teledirigido del Grupo de Intervención y Rescate G.I.R perteneciente a la Policía Nacional del Ecuador. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/12783>
- Curtis, S. (2018). Myo Gesture Testing. Obtenido Agosto 14, 2018, de <http://chelmyers.com/research/2015/06/20/myo-gesture-test-pt-01.html>

- Curtis, S. (2018). Myo SDK 0.9.0: Getting Started. Obtenido Julio 26, 2018, de [https://developer.thalmic.com/docs/api\\_reference/platform/getting-started.html](https://developer.thalmic.com/docs/api_reference/platform/getting-started.html)
- Curtis, S. (2018). Thalmic Labs MYO: Un brazalete para controlar gadgets a través del movimiento. Obtenido Agosto 15, 2018, de <https://www.fayerwayer.com/2013/02/thalmic-labs-myo-un-brazalete-para-controlar-gadgets-a-traves-del-movimiento/>
- De Paz Menéndez, A. (2015). Desarrollo De Un Sistema De Sensores Para La Detección De Sustancias Peligrosas, 154. Obtenido de <http://arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20150625AlmudenaDePazMenendez.pdf>
- Eduardo, V., & Machado, Q. (2010). Control de una mano virtual usando señales electromiográficas.
- Emanuel, S., Diego, S., Danilo, C., & Vicente, M. (2017). Esquema Tipo-PD más Impedancia Modificado para Teleoperación Bilateral de nn Robot Móvil considerando Retardos de Tiempo, 38(2).
- Enríquez, B. (2018). El mundo de los robots: Configuraciones de un robot industrial. Obtenido Agosto 8, 2018, de <http://irinayraul.blogspot.com/2012/03/configuraciones-de-un-robot-industrial.html>
- Espinoza P. (2018). El robot Da Vinci. Obtenido Agosto 7, 2018, de [http://www.roboticspot.com/especial/da\\_vinci/da\\_vinci.php](http://www.roboticspot.com/especial/da_vinci/da_vinci.php)
- Gaibor, D., Mediavilla, E., & Guamán, A. (2016). Desarrollo e implementación de un sistema robótico para el análisis de acetona en un ambiente controlado.
- Garcia, L. (2008). Diseño y construcción de un sistema robótico para la exploración de campos sembrados con minas antipersona. *Universidad & Empresa*, 13, 162.
- Garcia, S., Emanuel, S., & Mut, V. (2014). Implementación de sistema de teleoperación multi-operador multi-robot, 827–832.
- Godziszewski, E. (2018). TGS 826-for the Detection of Ammonia. Obtenido de [http://www.figaro.co.jp/en/product/docs/tgs826\\_product\\_infomation\\_rev01.pdf](http://www.figaro.co.jp/en/product/docs/tgs826_product_infomation_rev01.pdf)
- Gutiérrez Carvajal, R. E., & Castillo Estepa, R. A. (2006). Control de manipuladores teleoperados. *Ciencia E Ingenieria Neogranadina*, 16(1), 28–42.

- Ierache, J., Bruno, M., Dittler, M., & Mazza, N. (2018). *Robots y Juguetes Autónomos una Oportunidad en el Contexto de las Nuevas Tecnologías en Educación*. Obtenido de <https://pdfs.semanticscholar.org/e7f1/cde481e99a2935c86dc837691c294d060934.pdf>
- José de Jesús, R., Hernández-Aguilar José, A., Ávila-Camacho Francisco, J., Stein-Carrillo Juan, M., & Meléndez-Ramírez, A. (2016). Sistema sensor para el monitoreo ambiental basado en redes Neuronales. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(2), 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.06.006>
- Kim, Y., Lee, H., & Jung, S. (2015). Line Tracking Control of a Mobile Robot Using EMG Signals de Human Hand Gestures, (URAI), 2015.
- Khlebovich, P. (2018). IP Webcam - Aplicaciones en Google Play Obtenido Agosto 19, 2018, de <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.pas.webcam>
- López Goyez, J. P., & Sandoval Vizueté, P. J. (2017). Implementación y optimización de algoritmos de búsqueda de fuentes de olor basados en robótica cooperativa. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/13795>
- Montañez, J. A., & Pinto, M. L. (2017). Analysis of elements in local area and remote for teleoperation of AL5A robotic arm. *Prospectiva*, 15(1), 53–63. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15665/rp.v15i1.653>
- Naik, G. R., Kumar, D. K., & Palaniswami, M. (2008). Multi run ICA and surface EMG based signal processing system for recognizing hand gestures. 8th IEEE International Conference on Computer and Information Technology, 2008, 700–705.
- Obregon, P. (2016). Seguridad y monitoreo basado en camaras ip para la institución educativa la libertad - huaraz.
- Peña, C., Riaño, C., & Mejía, D. (2016). Avances en la teleoperación de un robot agrícola usando un dispositivo háptico de bajo coste, 243–249.
- Pololu, G. (2018). Dagu Wild Thumper 6WD chasis todo terreno, plata, 75: 1. Obtenido Julio 23, 2018, de <https://www.pololu.com/product/1561>
- Richard L. (2018). Robots: Robots Teleoperadores. Obtenido Agosto 8, 2018, de <http://todor-robots.blogspot.com/2013/01/robots-teleoperadores.html>
- Ruiz, H. (2018). La revolución del reconocimiento gestual. Obtenido Agosto 15, 2018, de <https://www.ruizhealytimes.com/ciencia-y-tecnologia/la-revolucion-del-reconocimiento->

gestual.

- Shin, S., Lee, J. H., & Son, S. H. (2016). A Survey of Approaches for Recognizing Hand Gestures Using EMG Signal. Proceedings - 2016 IEEE 22nd International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, RTCSA 2016, 263. <https://doi.org/10.1109/RTCSA.2016.22>
- Silvia, A., & Ramírez, H. (2016). Modelo de diseño de sistema de vigilancia basado en cámaras ip ubicadas en puntos estratégicos dentro de centro escolar INSA.
- Sosa, C., & Rodriguez, J. (2015). Seguimiento de Trayectoria en Robots Móviles de Ruedas tipo Diferencial. Obtenido Octubre 18, 2017, de <http://www.boletin.upiita.ipn.mx/index.php/ciencia/611-cyt-numero-48/1139-seguimiento>
- Triana, D., Prada, S., & Forero, C. (2015). Desarrollo y control de un brazo robótico mediante la adquisición de datos en tiempo real hacia un espacio no real, (1), 112–117.