



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN GEOCIENCIAS
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES,
UNIDAD MORELIA

*“Diseño e implementación de una plataforma
tipo Rover para exploración planetaria”*

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
LICENCIADA EN GEOCIENCIAS

P R E S E N T A:

Stephany Ortuño Chanelo

DIRECTORES DE TESIS:

Dr. Armando Carrillo Vargas

Dr. Luis Antonio Domínguez Ramírez

ESCUELA
NACIONAL
DE ESTUDIOS
SUPERIORES

UNIDAD MORELIA

Morelia, Mich.

Febrero, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA
DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 10** del **H. Consejo Técnico** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **10 de octubre de 2018**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno (a) **Stephany Ortuño Chanelo** de la Licenciatura en **Geociencias**, con número de cuenta **414105089**, con la tesis titulada: "Diseño e implementación de una plataforma tipo Rover para exploración planetaria.", **bajo la dirección como tutor del** Dr. Armando Carrillo Vargas **y como co-tutor el** Dr. Luis Antonio Domínguez Ramírez. El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente:	Mtro. Gerardo Cifuentes Nava
Vocal:	Dr. Gabriel Vázquez Castro
Secretario:	Dr. Armando Carrillo Vargas
Suplente 1:	Dr. Sinhué Amos Refugio Haro Corzo
Suplente 2:	Mtro. Pablo Villanueva Hernández

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Morelia, Michoacán a, 31 de enero de 2019.



DR. VÍCTOR HUGO ANAYA MUÑOZ
SECRETARIO GENERAL

CAMPUS MORELIA
Aportado Postal 27-3 (Santa Ma. De Guido), 58090, Morelia, Michoacán
Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701. Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3502 y (55)56.23.73.02, Extensión Red UNAM: 80503
www.enesmorelia.unam.mx

Agradecimientos

A la máxima casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme brindado la oportunidad de una formación profesional.

A la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia, que a lo largo de mi carrera ha sido un segundo hogar.

Al Laboratorio de Electrónica del Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán por las facilidades amplias para usar los diversos equipos, herramienta e instrumentación, y al Dr. Carrillo-Vargas por financiar enteramente el proyecto. Además, agradezco a mis compañeros de laboratorio por el apoyo durante el diseño, implementación y pruebas del ROVER: Juan Pablo Álvarez, Carlos Ramuco, Marco Anyelo Cazares y Osiris Sandoval.

Al Laboratorio de Innovación y Evaluación de Estufas de Biomasa del Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, en especial al M. C. Juan Carlos Vázquez Tinoco por su apoyo en la calibración del sensor de gas.

Al Dr. Armando González Sánchez del Instituto de Ingeniería de la UNAM por su colaboración en la calibración del sensor de gas dentro de las instalaciones del laboratorio de ingeniería ambiental.

Al equipo de Exploración Geofísica de la Facultad de Ingeniería, UNAM por permitir darme la oportunidad de calibrar en sitio los sensores del ROVER durante la práctica de campo realizada en Teotihuacan.

A mis asesores, el Dr. Armando Carrillo Vargas y el Dr. Luis Antonio Domínguez Ramírez, por su apoyo, paciencia y contribuciones para el desarrollo de este trabajo.

Al comité sinodal; M. C. Gerardo Cifuentes Nava, Dr. Gabriel Vázquez Castro, al Dr. Sinhué A. R. Haro Corzo y al M. C. Pablo Villanueva Hernández por sus contribuciones y sugerencias para la mejora y enriquecimiento de este proyecto.

A la Mtra. Samira Torres de la ENES Morelia y a la Mtra. Araceli Jacobo por ser mi guía en la revisión de versiones en otro idioma.

Al M. C. Neftalí Razo Pérez y a la C. Nancy Velázquez Reséndis, por su apoyo, entrega y dedicación a lo largo de este proyecto.

En general, a todas las instituciones, organismos, archivos y bibliotecas que contribuyeron para alcanzar los objetivos trazados en esta tesis.

Dedicatoria

A mis padres, **Josefina** y **José**, con quienes estaré eternamente agradecida por la oportunidad de vida que me dieron (nunca lo hubiera logrado sin vuestro material genético), por ser el motivo de inspiración y superación personal cada día. Por enseñarme con el ejemplo la fortaleza para vencer cualquier reto, por su fe sin límites y su amor infinito.

A mi hermano, **Edgar**, agradezco el apoyo que me brindó en esta aventura. Gracias por ser mi fuente de inspiración y por estar conmigo siempre.

A mis sobrinos, **Oliver** y **Vladimir**, por alimentar mi curiosidad y mi espíritu incluso en los días difíciles.

A mi querido compañero, **Oscar**, por enseñarme esta intensa valoración de lo breve y preciosa que es la vida. En la vastedad del espacio y en la inmensidad del tiempo, mi alegría es compartir un planeta y una época contigo.

A **Rosy** y **Pau** por demostrarme que una gran amistad tiene dos ingredientes, uno el descubrimiento de lo que nos hace similares y otro el respeto por lo que nos hace diferentes. Infinitas gracias por ser mis cómplices y amigas.

A mi amiga fiel, **Brownye**, porque te dí mi corazón y me diste el tuyo. Por hacerme sentir así, pura y especial... extraordinaria.

A **Ernesto** gracias por empujarme cuando tenía miedo de seguir mis sueños.

Al pequeño-gran **PROMETEO** por sus grandes batallas. Gracias por los dolores de cabeza, por la euforia y la desesperación, pero sobre todas las cosas por crecer juntos.

Resumen

Debido al gran alcance de los robots y atendiendo a la necesidad de desarrollar tecnología propia para explorar lugares de difícil acceso, surge la idea de la presente tesis, cuyo principal objetivo es el diseño y la implementación de una plataforma móvil de exploración terrestre, capaz de navegar guiado por teleoperación o de manera autónoma por medio de estímulos sensoriales. Para cubrir el objetivo anterior, se formula una arquitectura de control por medio de bloques, donde se integran componentes que cumplen con una función particular y su interacción en conjunto permite cumplir con los objetivos generales para los cuales fue diseñada la plataforma. Asimismo, se desarrollaron códigos especializados que permiten el funcionamiento en conjunto (control de motores, sensores e interfaz).

Por otra parte, los sensores implementados en este proyecto son eficaces para la exploración de diversos ambientes, ya que miden factores elementales (temperatura, humedad, presencia y concentración de gases) y la información visual permite la detección de estructuras de interés.

Adicionalmente, este sistema de inspección transmite los datos obtenidos por los sensores hacia una estación de control, por medio de módulos XBee, para desplegar gráficamente el monitoreo a distancia y guardar la información para un posterior procesamiento y análisis. La cual permite potencializar el sistema, debido a que posibilita una interacción continua y activa entre el usuario y el móvil.

El desarrollo de esta plataforma utiliza tecnologías recientes y de software libre con la finalidad de formar un sistema dirigido a la adaptabilidad, es decir capaz de adecuarse al ambiente que se desea explorar y de permitir correcciones o mejoras futuras.

El sistema desarrollado es abierto y flexible, lo que lo convierte en una herramienta útil para la realización de exploración controlada por retroalimentación visual. En general, se han conseguido alcanzar los objetivos propuestos al inicio del proyecto y con base en los resultados obtenidos se concluye que la arquitectura planteada es una alternativa práctica para el desarrollo de este tipo de plataformas. Dicha arquitectura ha mostrado, en las pruebas realizadas, su fiabilidad y adecuado desempeño, al permitir realizar todas las funciones para las que fue concebida.

Abstract

Due to the great scope of the robots and considering the need to develop their own technology to explore places of difficult access, the idea of this thesis arises, whose main objective is the design and implementation of a mobile platform for terrestrial exploration, able to navigate guided by teleoperation or autonomously through sensory stimuli.

To cover the previous objective, a control architecture is formulated by means of blocks, where components that fulfill a function are integrated and their interaction allows to comply with the general objectives for which the platform was designed. In addition, specialized codes will be developed that allow the operation of the platform as a whole (control of motors, sensors and interface).

On the other hand, the sensors implemented in this project are effective for the exploration of different kinds of environments, since they measure elementary factors (temperature, humidity, presence and concentration of certain gases) and visual information allows the detection of structures of interest.

Additionally, this inspection system transmits the data obtained by the sensors to a control station, through XBee modules, to graphically display the remote monitoring and save the information for further processing and analysis. This allows to potentiate the system, as it allows a continuous and active interaction between the user and the mobile.

The development of this platform uses recent technologies and free software in order to create a system designed to at adaptability, ie able to adapting to the environment you want to explore and allowing future corrections or improvements.

The developed system is open and flexible, which makes it a useful tool for conducting controlled exploration by visual feedback. In general, the objectives proposed at the beginning of the project have been achieved and, based on the results obtained, it is concluded that the block-based control architecture is a practical alternative for the development of this type of platform. This architecture has shown, in the carried out tests, its reliability and adequate performance, by allowing all the functions for which it was designed.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Motivación y aportaciones	3
1.2. Generalidades	4
1.3. Antecedentes de la robótica espacial y perspectivas futuras	6
1.4. Antecedentes en México	13
1.5. Objetivos	14
1.5.1. Objetivo general	14
1.5.2. Objetivos particulares	14
1.6. Organización del documento	15
2. Diseño estructural	16
2.1. Sistema de locomoción	17
2.1.1. Geometría del sistema de locomoción	17
2.1.2. Características de motores	20
2.2. Sistema de dirección	24
2.3. Sistema de suspensión	27
2.3.1. Análisis del sistema de suspensión	29
2.4. Sistema de alimentación	33
2.5. Sección de carga útil	36
3. Bloques de control	41
3.1. Bloque teleoperado	42
3.1.1. Sistema de radiocontrol	45
3.1.2. Funcionamiento general del sistema de radio control	48
3.2. Bloque autónomo	49
3.2.1. Microcontroladores	50
3.2.2. Arduino	52
3.2.3. Sensado de ambiente	54
3.2.4. Controlador de motores	57
3.2.5. Algoritmo de control	59

4. Sistema de sensado	61
4.1. Adquisición de variables ambientales	62
4.1.1. Temperatura y humedad	62
4.1.2. Concentración de gases	63
4.1.3. Posición	66
4.2. Digitalización de variables	68
4.3. Transmisión de variables ambientales	69
4.3.1. Transmisión inalámbrica de datos	71
4.3.2. Información visual	78
4.4. Almacenamiento de datos	80
4.5. Despliegue de variables	84
5. Pruebas y resultados	89
5.1. Calibración de sensores	90
5.1.1. Calibración de sensor de CO	90
5.1.2. Calibración del sensor de H_2S	93
5.2. Pruebas de rendimiento de los sistemas	95
5.2.1. Sistemas de alimentación	95
5.2.2. Pruebas de rendimiento del vehículo	96
5.2.3. Calibración del bloque autónomo	100
5.3. Adquisición de datos en campo	102
5.3.1. Prueba de alcance de telemetría	106
6. Conclusiones	108
6.1. Ventana de oportunidades	110
6.2. Trabajo a futuro	111
A. Tablas de especificaciones	112
A.1. Especificaciones de motores	112
A.2. Sistema de radio control	113
B. Configuración de XBee en modo AT	114

C. Códigos	116
C.1. Códigos ARDUINO	116
C.1.1. Transmisión de datos por medio de XBee	116
C.1.2. Almacenamiento de datos en módulo SD	118
D. Consideraciones económicas	121
Bibliografía.	125

Índice de figuras

1.1. Vehículo Lunokhod	9
1.2. Línea del tiempo vehículos tipo Rover.	11
1.3. Rover Mars 2020.	12
2.1. Diagrama de fuerzas ejercidas en el neumático	18
2.2. Geometría y dimensiones del sistema de locomoción	19
2.3. Componentes de un motor de corriente directa	20
2.4. Dimensiones del Planetary Gear Motor	23
2.5. Configuraciones mecánicas de los vehículos eléctricos.	25
2.6. Diagrama de conducción de la plataforma rover	27
2.7. Sistema de suspensión	28
2.8. Geometría del sistema de suspensión	30
2.9. Gráfica carga-velocidad	37
2.10. Planos de sección de carga útil.	38
2.11. Distribución de carga útil	40
3.1. Comparación entre señales PWM y PPM	43
3.2. Cuadro de mandos del radiocontrol	45
3.3. Distribución de controles de la emisora	46
3.4. Receptor de radiocontrol R9D	47
3.5. Diagrama de conexión del sistema remoto a bordo	47
3.6. Señal de RC	48
3.7. Diagrama de Arduino UNO	53
3.8. Diagrama de flujo para programa en Arduino IDE	54
3.9. Funcionamiento del sensor US	55
3.10. Método de triangulación del sensor IR	56
3.11. Disposición de sensores ultrasónicos	56
3.12. Diagrama de pines del Shield de motores V2.3	57
3.13. Diagrama de puente H	58
3.14. Diagrama de flujo de modo autónomo	60

4.1. Sensor de temperatura y humedad DHT22	63
4.2. Diagrama de sensor electroquímico	65
4.3. Trilateración satelital	67
4.4. Módulo GPS	67
4.5. Reconstrucción digital de la señal analógica original	68
4.6. Diagrama de conexión de Shield de sensores V5	70
4.7. Interfaz XCTU	73
4.8. Configuración modo AT	75
4.9. Diagrama de conexiones de sensores y módulo SD	76
4.10. Diagrama de flujo para transmisión de datos	77
4.11. Transmisión de imágenes.	79
4.12. Formato del comando de 48 bits para una tarjeta SD.	80
4.13. Conexiones de sensores y módulo SD	81
4.14. Diagrama de flujo para almacenamiento de datos	83
4.15. Diagrama de flujo de código en Processing	85
4.16. Interfaz gráfica del proyecto	86
4.17. Diagrama de flujo de la interfaz gráfica	88
5.1. Calibración estándar de sensor MQ7	90
5.2. Comparación de sensores de CO	91
5.3. Comparación de sensores de CO calibrados	92
5.4. Calibración estándar de sensor MQ136	93
5.5. Comparación de sensores de H_2S	94
5.6. Comparación de sensores de H_2S calibrados	95
5.7. Diagrama de pendiente máxima	97
5.8. Gráfica velocidad vs pendiente	98
5.9. Pruebas de rendimiento en laboratorio	99
5.10. Calibración sensor SHARP	101
5.11. Calibración del tiempo de giro	102
5.12. Disposición de los nodos de toma de datos en la malla A.	103
5.13. Datos obtenidos por el GPS del Rover tomados a lo largo de la malla A.	104
5.14. Datos obtenidos por los sensores en la malla A	105

5.15. Mapa de alcance del bloque teleoperado 106

Índice de tablas

2.1. Especificaciones motor Planetary Gear Motor (638280)	23
2.2. Componentes y distribución de la carga útil	39
4.1. Valores de exposición para gases y sus respectivos niveles de seguridad asociados	64
4.2. Configuración de los parámetros en los módulos XBee-PRO S3B. . .	74
5.1. Rango dinámico y resolución de los sensores de gas	95
5.2. Resultados de las pruebas de rendimiento de los sistemas de alimen- tación.	96
5.3. Pendiente promedio de estructuras volcánicas.	100
5.4. Alcance de sistemas de transmisión de información	107
A.1. Especificaciones motor Planetary Gear Motor (638280)	112
A.2. Especificaciones de la emisora AT9 de Radiolink	113
A.3. Especificaciones del receptor R9D	113
B.1. Configuración de los parámetros en los módulos XBee-PRO S3B. . .	115
D.1. Consideraciones económicas del proyecto.	122

Siglas

4WD Four Wheel Drive. 16

ADC Analog Digital Converter. 53

API Application programming interface. 74

AT Application transparent. 74

CPU Central Processing Unit. 50

DC Corriente Directa. 19

DH Destination Address High. 75

DL Destination Address Low. 75

EEPROM Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory. 51

ESC controlador electrónico de velocidad. 46

GPS Global Positioning System. 66

IC Integrated Circuit. 48

IDE Integrated Development Environment. 53

INAH Instituto Nacional de Antropología e Historia. 13

IP Internet Protocol. 78

IPN Instituto Politécnico Nacional. 13

JRA Japan Robotics Association. 4

LRV Lunar Roving Vehicle. 8

- MAC** Mandatory Access Control. 75
- MER** Mars Exploration Rovers. 9
- MISO** Master-In Slave-Out. 80
- MOSI** Master-Out Slave-In. 80
- NASA** National Aeronautics and Space Administration. 8
- NMEA** National Marine Electronics Association. 66
- PEMS** Portable Emissions Monitoring System. 91
- RAM** Random Access Memory. 51
- RC** Radio Control. 41
- ROM** Read Only Memory. 51
- RTC** Real Time Clock. 81
- RUR** Universal Robots of Rossum. 4
- SCK** Serial Clock. 80
- SH** Serial Number High. 75
- SL** Serial Number Low. 75
- SPI** Serial Peripheral Interface. 80
- SS** Slave Select. 80
- UNAM** Universidad Nacional Autónoma de México. 13
- URSS** Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas. 8
- WLAN** Wireless Local Area Network. 71, 78

WMAN Wireless Metropolitan Area Network. 71

WPAN Wireless Personal Area Network. 71

XCTU Configuration and Test Utility. 72

CAPÍTULO 1

Introducción

Contenido

1.1. Motivación y aportaciones	3
1.2. Generalidades	4
1.3. Antecedentes de la robótica espacial y perspectivas futuras	6
1.4. Antecedentes en México	13
1.5. Objetivos	14
1.5.1. Objetivo general	14
1.5.2. Objetivos particulares	14
1.6. Organización del documento	15

Los robots son la integración de partes mecánicas, electrónicas y software, desarrollados con un propósito específico, principalmente la manipulación de objetos o la exploración de ambientes.

A partir de la década de los sesenta, la investigación y diseño de robots móviles creció de manera exponencial, con áreas originales de estudio y desarrollo militares e industriales. Las cuales dieron impulso a aplicaciones en otras áreas como la agricultura, la medicina, la exploración submarina, aplicaciones domésticas, de entretenimiento, entre otras.

A partir de esto, la ciencia ha incursionado con bastante éxito en el desarrollo de estas plataformas colocando diversos sensores, lo que ha permitido reducir el costo de recolección de datos de alta calidad. Estos robots han sido desarrollados con base en las especificaciones de la tarea a realizar y de las condiciones del ambiente de trabajo.

Lo anterior les permite lograr sus objetivos de manera eficiente y segura, por lo cual estos vehículos representan una herramienta para la exploración de ambientes inaccesibles para el ser humano.

Una de las principales características que le permiten lograr su objetivo es que debe ser capaz de desplazarse libremente entre un punto de partida y su destino, evitando colisiones con objetos dentro del medio en el que se mueve [Mariscal, 2005]. Debido a esto, la teleoperación y sus elementos constitutivos han sido de interés para los desarrolladores desde que fue necesario sustituir al humano en este tipo de ambientes.

Un ejemplo claro y extremo se encuentra en la exploración espacial, donde hay fuertes razones para utilizar la teleoperación como técnica de manipulación remota. Algunas de estas razones son que las operaciones espaciales son de alto riesgo, además de que el equipo necesario para los humanos es más costoso y pesado que un sistema de teleoperación. Otro factor importante es que las misiones requieren de varios años para lograr sus objetivos, lo que hace que estas sean más viables sin tripulación humana.

Por otra parte, el afán de entender la naturaleza es un impulso primario de nuestra especie que ha permitido el desarrollo de la civilización. Además, proporciona nuevo conocimiento que genera una infinidad de descubrimientos. Aparte de los beneficios puramente económicos, se han derivado también una gran cantidad en los ámbitos científicos y tecnológicos, se han creado nuevos sistemas e incluso nuevos materiales y con esto se han revolucionado áreas como la robótica, informática, meteorología y hasta la medicina. Está claro que la exploración espacial ha producido un impacto en nuestra vida cotidiana mayor del que se cree. Es por ello, que actualmente el desarrollo y avance de estas áreas estratégicas de la ciencia, se encuentran sumamente ligadas a la evolución de tecnología en la robótica móvil, de ahí la importancia de buscar nuevas técnicas y herramientas para optimizar el desempeño y aplicación de estas plataformas.

Entonces, a través del tiempo, la tecnología ha ayudado a conquistar las barreras de la comunicación, a mejorar procesos e implementar nuevas herramientas. Sin embargo, la implementación de la misma ya no es un lujo sino una necesidad fundamental que permite a los grandes y pequeños países un desarrollo con opciones más competitivas. Debido a lo anterior y atendiendo a la necesidad de desarrollar tecnología propia para explorar lugares de difícil acceso, surge la idea de la presente tesis, donde se desarrolla un prototipo de robot móvil capaz de realizar exploración terrestre.

1.1. Motivación y aportaciones

Dada la fragilidad del ser humano para realizar prospección en entornos difíciles (zonas de desastre, volcanes activos, manejo de material nuclear y exploración espacial in situ) la alternativa más lógica y a nuestro alcance para explorarlos es el desarrollo de robots móviles. Los cuales deben desenvolverse en un entorno de condiciones físicas complejas, en el que las características del terreno, las limitaciones de consumo energético, las condiciones atmosféricas y muchos otros factores dificultan enormemente su autonomía. Esta dificultad ha justificado el empleo de la teleoperación para definir las acciones a realizar, pero los retrasos en las comunicaciones asociados a las importantes distancias entre la estación de mando y el robot impiden un control directo. La mayor parte de las funciones de los vehículos que actualmente realizan exploración planetaria se centran en mantener las comunicaciones, seguir la ruta planeada y realizar lecturas en sus sensores. En este sentido, la autonomía de estas plataformas se encuentra limitada.

Sin embargo, elaborar un robot de este tipo, no es una tarea sencilla, ya que requiere un adecuado balance entre la mecánica, electrónica y la programación de control para un óptimo funcionamiento de la plataforma diseñada. Es por lo que, en esta tesis, se formula una arquitectura de control distribuido por medio de bloques (teleoperado y autónomo), la cual plantea una solución factible dependiendo del ambiente a estudiar. En ésta se integran un grupo de componentes y subsistemas

que cumplen con una función particular, pero su interacción en conjunto permite desempeñar las tareas programadas y por ende lograr los objetivos planteados en cada misión de exploración.

En específico, el diseño de los sistemas de locomoción se centra en mejorar la estabilidad, maniobrabilidad y tracción, permitiendo la movilidad incluso por terrenos con suelo irregular o con pendientes y logrando la evasión de obstáculos; lo cual se traduce en un mayor campo de aplicación, ya que con esto se logra acceder a diversos objetivos de exploración.

De la misma forma, dado que los sensores implementados en este proyecto (temperatura, humedad y detección de gases), permiten medir variables elementales, son eficaces para la exploración de diversos tipos de ambientes. Además, al instalar las herramientas adecuadas; cámaras, escáneres ambientales y dispositivos basados en láseres es posible detectar estructuras de interés geológico (determinación de fallas, pliegues y fisuras) o histórico (objetos tallados y pinturas murales).

1.2. Generalidades

El término robot proviene de la palabra checa *robota*, que significa trabajo obligatorio, el cual fue empleado por primera vez en la obra teatral de 1921 *Universal Robots of Rossum (RUR)* por el novelista y dramaturgo checo Karel Capek. Las primeras definiciones de robot se introdujeron a principios de los años sesenta sin que el concepto llegara a una definición oficial. Por otra parte, la Japan Robotics Association (JRA) define el robot como "un manipulador multifuncional que puede ser programado para la realización de tareas muy variadas".

Actualmente, el concepto de robot es muy amplio que se extiende desde los clásicos robots industriales hasta los robots autónomos. A pesar de esto, un robot está constituido por los elementos básicos siguientes:

- **Estructura mecánica:** La conforma la estructura del robot, que le confiere la resistencia necesaria para transportar la carga útil.
- **Actuadores:** Son los elementos que permiten el movimiento del robot.
- **Elementos terminales:** Estos elementos vienen condicionados por los objetivos a alcanzar por el robot.
- **Unidad de control:** Constituida por el computador que proporcionan la capacidad de ejecutar los programas para cumplir los objetivos de cada tarea.
- **Sensores del entorno:** Estos sensores permiten la detección de obstáculos en el entorno y proporcionan información que permite al robot adaptar el programa de control a la situación real.
- **Interfaz de usuario:** Es el elemento que permite la supervisión de la tarea realizada por el robot.

El conjunto de estos elementos definirá sus principales características, así como sus aplicaciones. Por otra parte, los robots tienen múltiples clasificaciones de acuerdo con su generación, a su nivel de control, a su nivel de inteligencia, pero para fines de esta tesis pueden clasificarse de la siguiente manera:

- **Fijos:** Se utilizan para mejorar la producción en la industria realizando tareas repetitivas y se encuentran anclados al lugar de trabajo.
- **Móviles:** Tienen la capacidad de desplazarse con ayuda de múltiples sensores que les permiten visualizar de manera indirecta su entorno y moverse a través de él.

La robótica móvil merece una revisión más amplia ya que el robot propuesto en esta tesis entra dentro de esta categoría. La robótica móvil es un área de la robótica que se encarga de estudiar a aquellos robots que no tienen ningún eslabón anclado a un medio físico. Existen tres tipos de robots móviles; aéreos, submarinos y terrestres.

En específico, estos últimos son robots capaces de operar sobre terrenos no preparados (exploración planetaria, agricultura, aplicaciones militares, entre otros). Los robots móviles terrestres pueden distinguirse con base en el sistema de locomoción que utilizan los robots para desplazarse: ruedas, orugas y patas.

De los robots móviles terrestres, los utilizan llantas para desplazarse, son la solución más simple y eficiente para la movilidad en terrenos duros y no deslizantes. Su ventaja se debe principalmente a su eficiencia mecánica y a su bajo consumo de energía. Constan en su mayoría de un chasis en el que se encuentran montadas las llantas, los sensores, los actuadores, los elementos que proveen energía al sistema, los circuitos de control y el sistema de comunicación.

Los robots móviles terrestres pueden ser controlados de manera remota por medio de cables o por sistemas de teleoperación, también se consideran robots móviles los que operan de forma autónoma, los cuales integran un sistema multisensorial. La información proveniente de los sensores debe ser procesada utilizando ciertos algoritmos o teorías, de tal manera que el robot sea capaz de controlar los elementos que rigen su cinemática, que normalmente es la orientación y/o velocidad de sus ruedas, para poder desarrollar tareas específicas.

1.3. Antecedentes de la robótica espacial y perspectivas futuras

El siglo XX fue extraordinariamente prolífico en descubrimientos científicos y desarrollos tecnológicos, cuyas aplicaciones han tenido un impacto profundo en las condiciones de la vida contemporánea. Uno de los hechos más relevantes, fue la exploración espacial. Aunque desde el siglo XVII, se establecieron las bases teóricas para la conquista del espacio, se hacía necesario resolver un conjunto de problemas fundamentales en el ámbito tecnológico, tales como el desarrollo de aeronaves, cohetes capaces de situarlas en órbita y que fueran capaces de realizar las misiones para las que fueron diseñadas. Por lo que fue necesario esperar al desarrollo de motores

capaces de impulsar vehículos fuera de la atmósfera para poder hablar de una verdadera conquista del espacio. Sin embargo, después de la Segunda Guerra Mundial se generó un cúmulo de conocimiento que favoreció el logro de este destacable evento, principalmente el desarrollo de la teledetección aérea, la creación de nuevos sensores, mejoras en los sistemas de telecomunicación y especialmente la mejora notable de la aeronáutica.

Pero, fue hasta 1957 que la conquista del espacio fue una realidad, al ponerse en órbita el primer satélite artificial, Sputnik I; la nave obtuvo información sobre la densidad de las capas altas de la atmósfera y la propagación de ondas de radio en la ionosfera. No obstante, en 1959, a pesar de que la misión del Explorer 6 fue la de estudiar la radiación del entorno espacial, los rayos cósmicos galácticos, la propagación de ondas de radio en la atmósfera superior y el flujo de micrometeoritos, también se probó un dispositivo para fotografiar la capa de nubes de la Tierra [Sobrino et al., 2000], transmitiendo así la primera fotografía desde el espacio. Lo que dio paso al florecimiento de una gran diversidad de tecnologías propias de la ingeniería espacial, durante los años consecutivos.

El desarrollo acelerado de la carrera espacial entre Estados Unidos y la entonces, Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas, culminó con la exitosa llegada del hombre a la Luna. Y así, la conquista del espacio se reveló como un medio eficaz de observar nuestro propio planeta de forma global, el sistema solar y mucho más allá.

En la segunda mitad del siglo XX los avances en electrónica e informática dieron lugar a una expansión en la tecnología y la robótica. En este periodo nacieron una gran cantidad de grupos de investigación y empresas que desarrollaron una enorme cantidad de tecnología aplicada a la exploración espacial. Para entender mejor los intereses que la sociedad demanda en lo referente al campo de la robótica en la exploración, y, por tanto, las complejidades inherentes a dicha disciplina, será conveniente realizar una pequeña mención histórica de su evolución.

Desde las primeras naves espaciales, los aportes brindados por las sondas han sido muy numerosos. Alimentadas en su mayoría por energía solar, son de tamaño compacto y viajan a lugares programados impulsadas por cohetes. Estas están equipadas con cámaras, sensores, espectrómetros y múltiple instrumentación sofisticada que les permiten estudiar con sumo detalle los cuerpos celestes. Existen dos tipos principales de sondas espaciales, las sondas orbitales y las sondas tipo Rover. Siendo estas últimas de gran interés para los objetivos de esta tesis.

Una plataforma tipo Rover es un vehículo robótico de exploración espacial diseñado para moverse a través de la superficie de un planeta u otro objeto astronómico. A lo largo de la historia, algunos han sido robots parcialmente o totalmente autónomos. Sus principales ventajas sobre las sondas orbitales son que pueden hacer observaciones más detalladas y además realizar experimentos físicos. Sin embargo, una de las desventajas más importantes es que abarcan una menor distancia de exploración en tiempos prolongados.

En la Figura 1.1 se muestra el Lunokhod 0, lanzado en 1969, el cual pretendía ser el primer Rover teleoperado que explorara la Luna, pero se estrelló en el lanzamiento. Un año más tarde, Lunokhod 1 aterrizó en la Luna, siendo así el primer robot en aterrizar en un cuerpo celeste. Este último, envió más de 20,000 imágenes y realizó más de 500 pruebas del suelo lunar durante aproximadamente 10 meses, poseía 8 ruedas con 8 motores independientes, 2 antenas para comunicaciones, 4 cámaras y dispositivos especiales para la prospección del suelo lunar y realización de determinadas medidas. El robot era teleoperado desde la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS).

Posteriormente, la National Aeronautics and Space Administration (NASA) incluyó en las últimas tres misiones Apolo, el Lunar Roving Vehicle (LRV), el cual podía transportar uno o dos astronautas, su equipo y muestras lunares. Para 1973, el Lunokhod 2 fue el segundo vehículo no tripulado en la Luna, este fue operado por cerca de cuatro meses y cubrió alrededor de 39 kilómetros de terreno.



Figura 1.1: Vehículo Lunokhod, el cual complementó la serie de misiones Luna que eran misiones de orbitadores y retorno de muestras. Referencia: <https://moon.nasa.gov/resources/37/lunokhod-1/>.

Con respecto a otros cuerpos celestes, las misiones Marte 2 y Marte 3 de la Unión Soviética, lanzadas en 1971, llevaban a bordo un vehículo Rover el cual estaría conectado al módulo de control por medio de un cable, ya que el manejo a control remoto de estos dispositivos desde la Tierra implicaría un tiempo de respuesta muy largo. Sin embargo, debido a los fallos de comunicación de las naves, ninguno de estos vehículos fue desplegado.

Pero el 4 de julio de 1997, la misión Mars Pathfinder de la NASA, aterrizó con éxito en la superficie marciana, esta incluía el vehículo Sojourner el cual envió alrededor de 16,500 imágenes y realizó más de 15 análisis químicos de suelos y factores meteorológicos.

Spirit y Opportunity fueron lanzados en 2003, ambos vehículos de la misión Mars Exploration Rovers (MER) de la NASA, los cuales cuentan con herramientas que les permiten taladrar rocas y tomar muestras del suelo para analizar su composición química. Los Rovers se ubican en lados opuestos del planeta para explorar lugares distintos. La misión tiene como objetivo principal encontrar indicios de presencia de agua en Marte. Se diferencian en varios aspectos de su único predecesor, principalmente en que el Sojourner medía 65 cm de largo y pesaba 10 kg, mientras que los Rovers miden 1.6 m y pesan 174 kg cada uno.

Además, las comunicaciones de Sojourner con la Tierra se realizaban mediante una base fija, mientras que Spirit y Opportunity llevan los sistemas de comunicaciones abordo. Cada vehículo posee seis ruedas motrices y un sistema de suspensión basado en articulaciones en lugar de muelles. Aunque cada robot es teleoperado desde la Tierra, debido a los grandes retardos en las comunicaciones posee cierto grado de autonomía. Tiene un software de navegación, que lo hace capaz de evitar obstáculos, permitiéndole llegar al destino especificado desde la Tierra, trazando su propia ruta.

En 2011, Curiosity, el más grande y capaz rover fue enviado a Marte, este examina el medio ambiente y adquiere muestras de roca, suelo y aire para el análisis a bordo. Este es aproximadamente el doble de largo (3 m) y cinco veces más pesado que los Rovers Spirit y Opportunity (899 kg). Heredó muchos elementos de diseño de ellos, incluyendo seis ruedas motrices, un sistema de suspensión articulado y cámaras montadas en un mástil, para ayudar al equipo de la misión en la Tierra a seleccionar objetivos de exploración y rutas de conducción. A diferencia de los anteriores, Curiosity transporta equipos para recopilar y procesar muestras de rocas y suelos, distribuyéndolos a bordo en cámaras de prueba dentro de instrumentos analíticos. A modo de resumen se presenta la Figura 1.2 que muestra la comparación (dimensiones, distancia recorrida y tiempo de misión) de las generaciones de Rovers desarrollados a lo largo de la historia.

1.3. ANTECEDENTES DE LA ROBÓTICA ESPACIAL Y PERSPECTIVAS FUTURAS 11

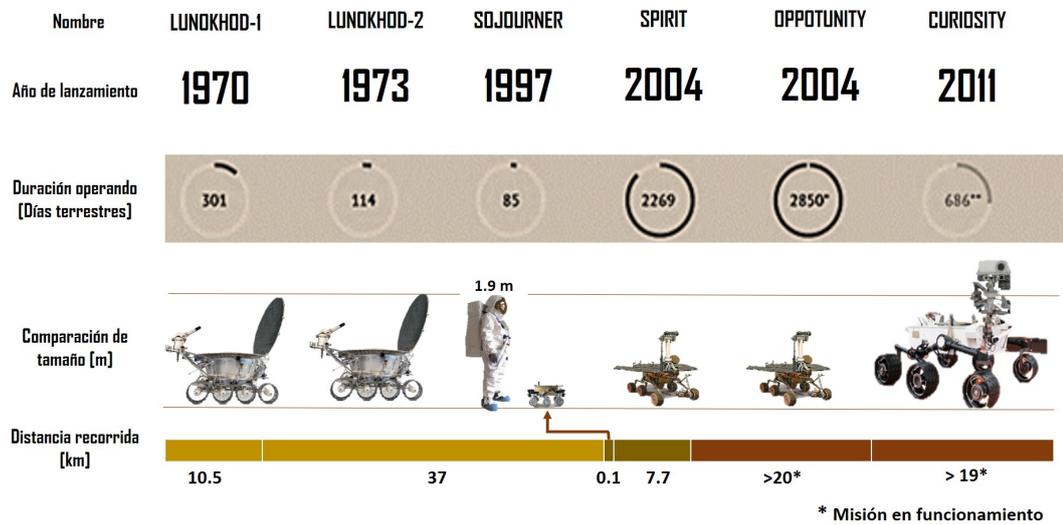


Figura 1.2: Comparación y línea del tiempo de los vehículos Rovers enviados al espacio. Referencia: <http://aegeanastronomy.com/aegeanastronomy>.

Por otra parte, la misión Mars Rover 2020 está programada para julio - agosto del 2020. Esta misión aborda objetivos científicos de alta prioridad para la exploración de Marte, buscando signos de condiciones habitables en el pasado, así como signos de vida microbiana pasada. Para mantener los costos y riesgos de la misión lo más bajo posible, el diseño se basa en la exitosa arquitectura del Curiosity y su sistema de aterrizaje comprobado. Mide aproximadamente 3 m de largo, 2.7 m de ancho y 2.2 m de alto. Pesa 1,050 kg, menos que un automóvil compacto. Sin embargo, el Rover tiene un diseño de rueda nuevo más eficiente para desplazarse en la superficie marciana, entre otras mejoras y por primera vez, lleva un taladro para extraer muestras de rocas y suelo marciano. Además, el Rover Mars 2020, el cual se muestra en la Figura 1.3 ayudará a preparar la futura exploración humana de Marte.

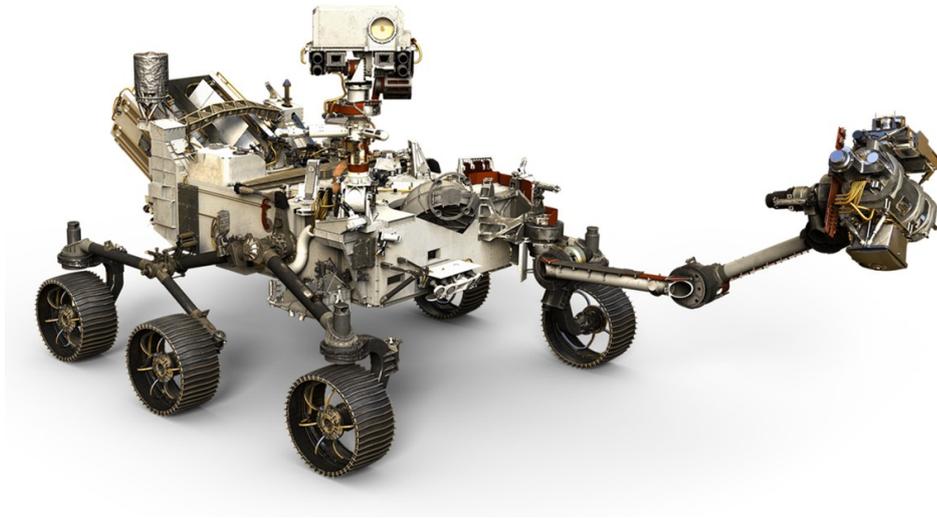


Figura 1.3: El Rover Mars 2020 se basa en la configuración del Rover Curiosity del Mars Science Laboratory. Tiene el tamaño de un auto, mide 3 m x 2.7 m x 2.2 m (sin incluir el brazo). Referencia: <https://mars.nasa.gov/mars2020/mission/rover/>.

La robótica espacial no deja de evolucionar y aunque Curiosity es el más popular, se están desarrollando otros dispositivos robóticos de exploración. Actualmente, se trabaja en vehículos móviles equipados con alternativas a las ruedas y en robots submarinos que serían capaces de investigar los mares helados bajo la superficie de los satélites Encelado y Europa.

También, existe especial interés en el desarrollo de robots que poseen un aspecto humanoide (robonautas), ya que su morfología, su versatilidad y las técnicas de inteligencia artificial aplicadas en ellos, los hacen adecuados para sustituir a los humanos con mayor eficacia. Por lo que no cabe duda de que serán una herramienta de suma utilidad para la exploración del cosmos.

1.4. Antecedentes en México

Los robots para exploración espacial representan un reto tecnológico y científico debido a las condiciones que enfrentan al realizar viajes espaciales. Sin embargo, debido al gran alcance de los robots y atendiendo a la necesidad de desarrollar tecnología propia para explorar lugares de difícil acceso, se han creado un par de proyectos en nuestro país con diferentes objetivos, entre los más relevantes se encuentran:

- **Tlaloque I:** El Instituto Politécnico Nacional (IPN) en colaboración con el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) desarrollaron el pequeño robot Tlaloque I para explorar mediante fotografía y video las cámaras subterráneas de las pirámides de la zona arqueológica de Teotihuacán. Llamado así en alusión a los seres mitológicos como ayudante del dios Tlaloc. Consta de cuatro ruedas con tracción independiente, cuenta con dos cámaras de video, iluminación y tiene dimensiones $30 \times 50 \times 20$ cm. Para la arqueología mexicana, el uso de esta tecnología representa un hito mayúsculo ya que las imágenes captadas por Tlaloque I muestran que el estado del pasaje subterráneo de la Pirámide del Sol es estable. El túnel mide más de 100 m y fue creado hace 2,000 años [Guerra, 2016].
- **Tlaloque II-TC:** Es la versión mejorada del Tlaloque I, el cual fue diseñado por ingenieros del IPN. Cuenta con un sistema de cámaras que se controlan de forma inalámbrica, un escáner para realizar mediciones, así como unos tractores orugas y brazos mecánicos con los que se puede desplazar y librar los obstáculos en su camino [INAH, 2015].
- **UNAM Rover Space:** En la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) existe un desarrollo de este tipo de vehículos espaciales de exploración. Se trata del rover diseñado por UNAM Space, un equipo de jóvenes estudiantes de la Facultad de Ingeniería. El propósito de este rover que es que de forma autónoma busque muestras específicas en un terreno abierto y desconocido, llegar a ellas, recolectarlas y llevarlas a un punto específico haciendo uso de tecnología como inteligencia artificial [UNAM, 2016].

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Diseñar e implementar una plataforma tipo Rover para exploración planetaria, guiada por teleoperación o por medio de un algoritmo de navegación que responde a estímulos sensoriales.

1.5.2. Objetivos particulares

Los objetivos particulares derivados del anterior son los siguientes:

1. Desarrollar la plataforma de control con software libre para permitir su réplica o actualizaciones futuras.
2. Diseño e implementación electromecánica del vehículo.
3. Implementación electrónica de sensores para medir las variables físicas del ambiente.
4. Implementar la red de comunicación inalámbrica entre estación terrena y el robot por medio de una interfaz gráfica.
5. Documentar los aspectos más relevantes para comprender el desarrollo y funcionamiento del proyecto.
6. Analizar los resultados para obtener propuestas sobre posibles actualizaciones del proyecto.

1.6. Organización del documento

En esta sección se presenta sintetizada la estructura de la actual tesis, con lo que se pretende dar un mejor entendimiento de lo que se presenta en esta. Fundamentalmente, el manuscrito de esta tesis está dividido en seis capítulos.

En el capítulo inicial se describen las causas por las cuales surge el interés de esta tesis. Así como dar a conocer los antecedentes más notables respecto a este tema de investigación. De igual manera, se plantean los objetivos que se desean alcanzar y lo que se pretende a hacer para lograrlos. En el capítulo dos se describe el diseño estructural y las modificaciones realizadas al chasis para mejorar el rendimiento del vehículo en terrenos irregulares, así como las características principales (materiales, peso y tamaño) y los dispositivos base (motores) que permiten su movimiento. El tercer capítulo describe los dispositivos y la teoría necesaria que permiten el movimiento del vehículo en sus dos modos (teleoperado y autónomo). La recopilación y transmisión de los datos obtenidos por el sistema de sensores se describe en un cuarto capítulo. En donde se exponen cada uno de los sensores y la teoría básica detrás de su funcionamiento. En este capítulo también se plantea el desarrollo de la interfaz gráfica que permite observar las variables obtenidas por los sensores e interactuar con ellas. Además, se hace una breve descripción del software utilizado para su elaboración y funcionamiento, con el fin de brindar un mejor entendimiento al lector. En la última parte del manuscrito se presentan las conclusiones obtenidas a partir de los resultados de las pruebas de rendimiento y se plantea una sección de trabajos a futuro, en la cual se mencionan puntos a considerar con el fin de obtener un sistema más robusto y completo.

CAPÍTULO 2

Diseño estructural

Contenido

2.1. Sistema de locomoción	17
2.1.1. Geometría del sistema de locomoción	17
2.1.2. Características de motores	20
2.2. Sistema de dirección	24
2.3. Sistema de suspensión	27
2.3.1. Análisis del sistema de suspensión	29
2.4. Sistema de alimentación	33
2.5. Sección de carga útil	36

El diseño estructural de un Rover surge a partir del balance eficiente entre las funciones propias que los materiales utilizados pueden cumplir, a partir de sus características naturales específicas y sus capacidades mecánicas. Por lo tanto, diseñar el chasis de un robot no es una cuestión trivial. Hay varios factores a considerar (la forma, el tamaño, el peso, el material de fabricación, la distribución del peso, la separación de las ruedas, entre otros) ya que todos estos factores influyen en el movimiento del robot. Además, esta estructura deberá soportar cada uno de los componentes del vehículo, aportando un soporte rígido sobre el cual montar el resto de los sistemas que componen la plataforma.

Para desarrollar este proyecto de tesis se partió del chasis *Four Wheel Drive (4WD) Mantis*, que tiene una estructura de canal con caja de 18", el cual proporciona una red troncal rígida de aluminio con opciones de personalización (incluye neumáticos, amortiguadores y motores). Este es un chasis lo suficientemente robusto

para proteger todos los componentes mecánicos y electrónicos del robot, mientras es capaz de desplazarse por una variedad amplia de entornos, debido a los motores potentes seleccionados. Desde el punto de vista de la electrónica, brinda un equilibrio entre versatilidad de funciones y facilidad de programación que le permita disponer de gran cantidad de sensores y todo ello programable desde cualquier PC.

Sin embargo, para permitir cumplir con los objetivos de una misión de exploración, se requirió implementar modificaciones al chasis, las cuales se desarrollan en las siguientes secciones, buscando que todo el conjunto una vez montado permita hacer configuraciones, ampliaciones, y cambios de componentes de forma sencilla.

2.1. Sistema de locomoción

El sistema de locomoción es el responsable de la traslación del robot a través del ambiente a explorar. Desde el punto de vista de la tracción, la robótica puede clasificarse en dos grandes grupos: los basados en movimiento por actuadores o piernas y los basados en movimiento por rodadura.

La locomoción mediante ruedas es la solución más simple y eficiente para la movilidad en terrenos duros y no deslizantes. Su ventaja se debe principalmente a su simplicidad mecánica y a su bajo consumo de energía. Además, al utilizar más de tres ruedas el vehículo estará completamente equilibrado.

2.1.1. Geometría del sistema de locomoción

Una de las cuestiones más relevantes en el diseño y control de robots es la distribución de los elementos que componen el sistema de locomoción. La cinemática y dinámica de un sólido rígido no presenta problemas analíticos importantes. El problema aparece cuando consideramos varios de estos sólidos, convirtiendo el conjunto de sistemas sencillos acoplados en un sistema mecánico que puede resultar realmente

complejo. En el caso de los robots móviles se debe conocer el número de ruedas y directrices del sistema, ya que esto determina el tipo y las limitaciones de movimiento que tendrá.

Los neumáticos, como parte de un vehículo, son de gran importancia en el comportamiento dinámico de éste. Todas las fuerzas exteriores que actúan sobre el vehículo, a excepción de las aerodinámicas, son aplicadas a través de los neumáticos [Filippini et al., 2005].

El neumático se considera un cuerpo rígido que responde a dos efectos dinámicos importantes, uno es el rozamiento contra el suelo, y el otro es la reacción a la compresión del mismo. Con respecto al rozamiento, un neumático requiere una cierta cantidad de fricción para que el punto de contacto de la rueda con la superficie no se deslice. Por otra parte, la tracción que se puede obtener está determinada por el coeficiente de fricción estática entre el neumático y el suelo.

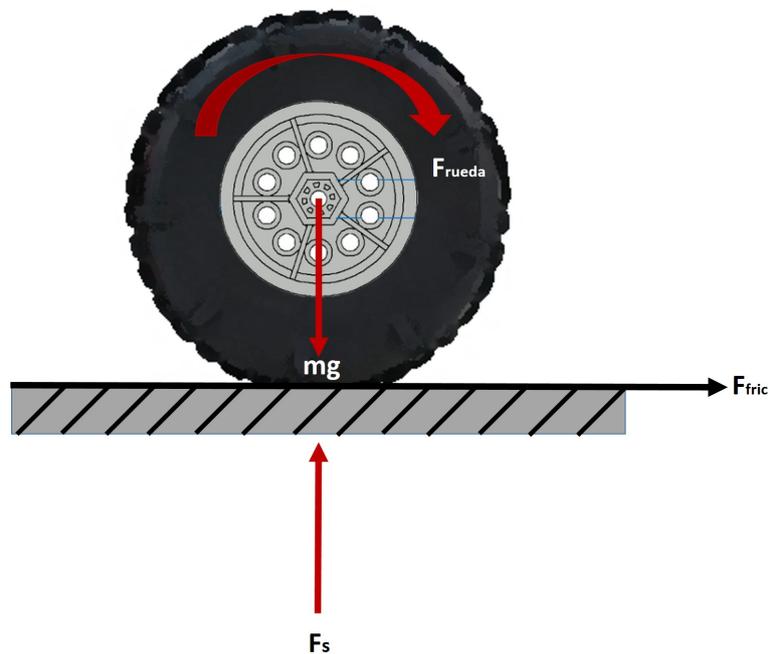


Figura 2.1: Diagrama de fuerzas ejercidas en el neumático.

La teoría de fricción estática dice que la máxima fuerza de fricción que se le puede aplicar a un cuerpo en reposo es proporcional a la fuerza normal [Pytel and Kiusalaas, 2010]. Debido a que se cuenta con cuatro ruedas la fuerza de fricción se distribuye en cada una de ellas, esta relación se puede expresar de la siguiente manera:

$$F_{Tmax} = \mu m_r g \quad (2.1)$$

Donde μ es el coeficiente de fricción, m la masa de la rueda y g la gravedad del sitio. El rover debe tener estabilidad en todas direcciones, así que se busca colocar las ruedas lo más lejos del centro de gravedad que sea posible y con un espaciamiento simétrico entre ellas. Con dichas consideraciones, se concluye que cuatro ruedas colocadas a 5 cm de los vértices del chasis, como se puede observar en la Figura 2.2, son la configuración ideal.

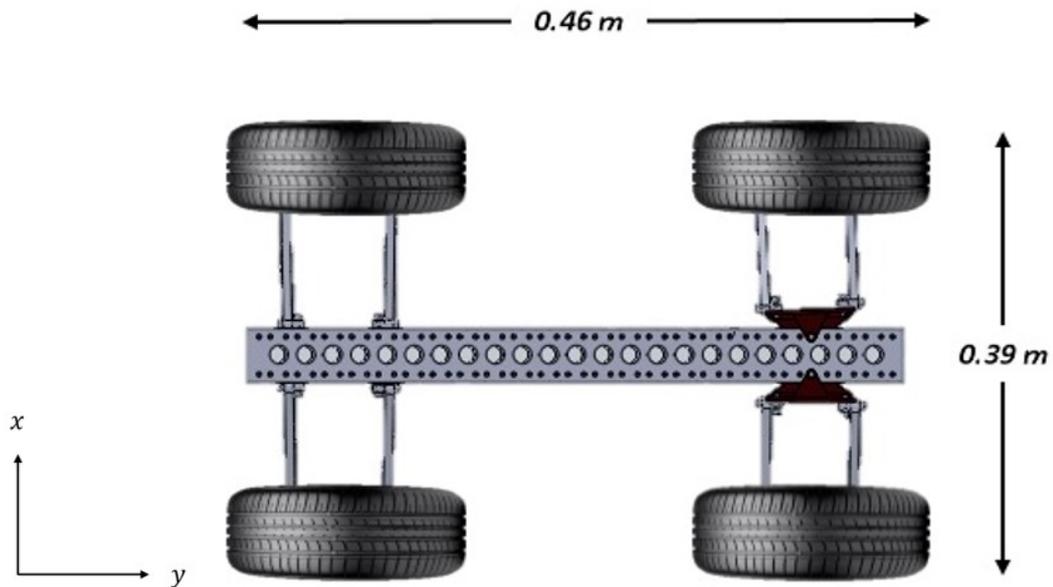


Figura 2.2: Geometría y dimensiones del sistema de locomoción, el cual consta de cuatro ruedas colocadas en los vértices del chasis.

2.1.2. Características de motores

El motor de corriente continua Corriente Directa (DC) es una máquina que convierte energía eléctrica en mecánica, provocando un movimiento rotatorio, gracias a la acción de un campo magnético. Desde el punto de vista mecánico, un motor está constituido por:

- **Circuito de campo o estrator:** Situado al rededor del rotor, es un electroimán fijo, cubierto con un aislante.
- **Circuito de armadura o rotor:** Pieza giratoria cilíndrica, un electroimán móvil con salientes laterales, que llevan al rededor un embobinado.

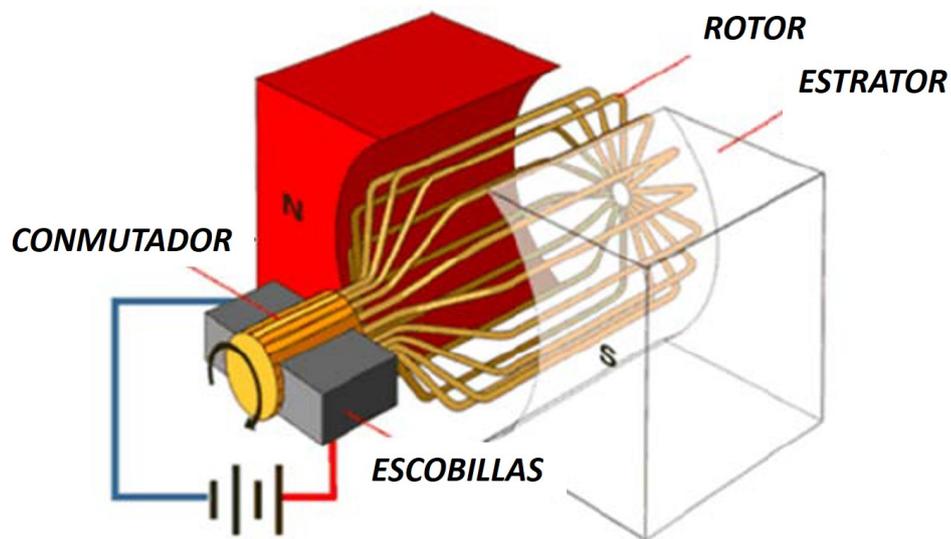


Figura 2.3: Componentes de un motor de corriente directa: rotor, estrator, escobillas y conmutador. Referencia: <https://www.researchgate.net/tipos-motores-CC>.

Su principio de funcionamiento se basa en un conductor moviéndose en un campo magnético con lo cual se crea una fuerza electromotriz inducida (fem). Entonces, cuando la corriente eléctrica circula por la bobina del rotor, el campo electromagnético que se genera interactúa con el campo magnético del imán permanente. Si los polos del imán permanente y del electroimán giratorio coinciden, se produce una repulsión y un torque magnético que provoca que el rotor rompa la inercia y comience a girar sobre su eje. El conmutador se encarga de cambiar, constantemente, el sentido de circulación de la corriente eléctrica a través del enrollado de la bobina del rotor cada vez que completa media vuelta. De esa forma coincidirán, siempre los dos polos magnéticos, lo que permite al rotor mantenerse girando mientras se encuentre conectado a la corriente eléctrica.

Las aplicaciones modernas (exploración, supervisión de estructuras, tareas de búsqueda y rescate) requieren de movimientos complejos, que resultan en cargas dinámicas altas para el motor [Quintero et al., 2006]. Es por ello que la selección de un motor que cumpla los requerimientos del sistema de locomoción es un factor fundamental para lograr los objetivos del proyecto.

Para que el robot se desplace el sistema de tracción debe vencer la fuerza determinada por la ecuación (2.2). El primer término se refiere a la fuerza de rodadura entre las llantas y el suelo, la cual se ve afectada por el ángulo formado entre la pendiente sobre la que se desplaza θ y la horizontal. El segundo término se refiere a la componente del peso del robot y último término corresponde a las fuerzas inerciales debidas a las aceleraciones causadas por el movimiento.

$$F_{req} = \mu mg[(\cos\theta) + (\sin\theta)] + F_{iner} \quad (2.2)$$

Tomando en cuenta lo anterior, el torque que genera cada rueda para mover el robot estará determinado por el primer término de la ecuación (2.2). Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, para transmitir el torque requerido sin deslizar, este debe ser menor al torque máximo tractivo, el cual es determinado por su peso y el coeficiente de fricción μ entre las dos superficies (como se mencionó en la sección

2.2). Entonces, la Ecuación 2.3 puede brindar el valor de la fuerza mínima necesaria para el arranque del vehículo.

$$F_{req} < \mu (mg) \approx 2.52 \text{ kg} \cdot f \quad (2.3)$$

Por otra parte, para calcular el torque en cada rueda es necesario aplicar la ecuación 2.3, donde N indica el número de ruedas del vehículo:

$$T_{req} = \frac{F_{req} R_r}{N} \approx 3.78 \text{ kgf} \cdot \text{cm} \quad (2.4)$$

Entonces, al considerar los valores de peso total del rover ($m = 9 \text{ kg}$) y radio de las ruedas ($R_r = 6 \text{ cm}$), se obtiene que el torque requerido es de aproximadamente $3.78 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$, lo que implica que los motores están calificados para transportar el chasis y su carga útil actual. Es decir, los motores son capaces de transportar cargas útiles de hasta 10 kg, sin mayor dificultad, sin embargo, si se realiza un esfuerzo mayor los motores pueden ser dañados por el consumo excesivo de corriente.

Posteriormente se calcula la velocidad máxima que el motor puede alcanzar, a partir de la información encontrada en la hoja de datos brindada por el proveedor, de la cual se obtiene la velocidad $\omega = 313 \text{ rpm}$ y tomando en cuenta el radio del neumático $R_r = 0.060 \text{ m}$:

$$V = \omega R_r \approx 1.92 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (2.5)$$

Se obtiene una velocidad lineal máxima, sin carga, de aproximadamente 1.92 m/s , la cual se puede modular por medio de los componentes electrónicos para adecuarla a la velocidad necesaria para cada ambiente. Pero al momento de seleccionar un motor, además de su potencia y sus dimensiones, también es importante considerar los límites térmicos y la corriente máxima que soporta de manera continua, ya que, si es-

tos valores se exceden por periodos de tiempo largos, el motor puede sobrecalentarse y dejar de operar correctamente.

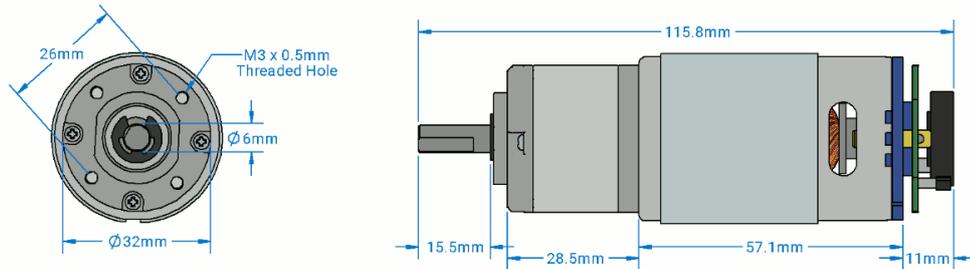


Figura 2.4: Dimensiones del Planetary Gear Motor: El sistema de locomoción del rover está conformado por cuatro de estos motores. Referencia: <https://www.servocity.com/4wd-mantis>.

En la Tabla 2.1, se muestran las especificaciones del motor de mayor importancia para este proyecto, en el **Apéndice A** se puede encontrar la tabla completa.

Características	Valor
Voltaje nominal	12 V
Rango de voltaje	6 - 12 v
Velocidad (sin carga)	313 rpm
Corriente (sin carga)	0.52 A
Corriente (sobrecarga)	20 A
Torque	416.6 oz-in (30 kgf-cm)
Tipo de motor	DC
Temperatura de operación	$-10^{\circ}C$ a $60^{\circ}C$
Peso	330 g (11.64 oz)

Tabla 2.1: Especificaciones motor Planetary Gear Motor (638280)

Se puede observar que la temperatura de operación está indicada desde los $-10^{\circ}C$ hasta los $60^{\circ}C$, lo cual se traduce en un rango de operación amplio no solo en temperaturas sino en variedad de ambientes que pueden ser explorados, como volcanes activos, yacimientos arqueológicos, ductos, etc. Entonces, analizando las características de los motores *Planetary Gear Motors*, se concluye que cumplen con los requerimientos necesarios (velocidad, torque, temperatura de operación) para impulsar la plataforma diseñada en esta tesis.

Una modificación que se realizó respecto a la distribución original del chasis es que los motores fueron conectados en paralelo (eje izquierdo y derecho), para obtener una dirección diferencial. Logrando con esto, disminuir el peso de los componentes necesarios para controlar cada motor y disminuyendo la complejidad de programación y distribución de canales del mando. Sin embargo, es importante mencionar que el chasis permite el control independiente de cada uno de los cuatro motores. Con esta modificación, se requiere un valor de corriente diferente para mover los dos motores en conjunto, la cual incremento al doble (13,000 mA), equivalente a sumar la corriente requerida para cada uno de los motores de manera independiente.

2.2. Sistema de dirección

Otros de los aspectos a tener en cuenta en el diseño de un robot móvil es el sistema de tracción y dirección a emplear. Estos no sólo están relacionados con la disposición de ruedas adoptada, sino también con los algoritmos de control de los motores y la mecánica asociada a estos.

Existen diferentes configuraciones cinemáticas para los vehículos eléctricos, éstas dependen principalmente de la aplicación del vehículo. No obstante, de manera general se tienen las configuraciones siguientes, también ilustradas en la Figura 2.5:

- **Ackerman:** Es una configuración mecánicamente compleja pero estable. Se basa en un diseño de cuatro ruedas, dos traseras y dos delanteras (con un

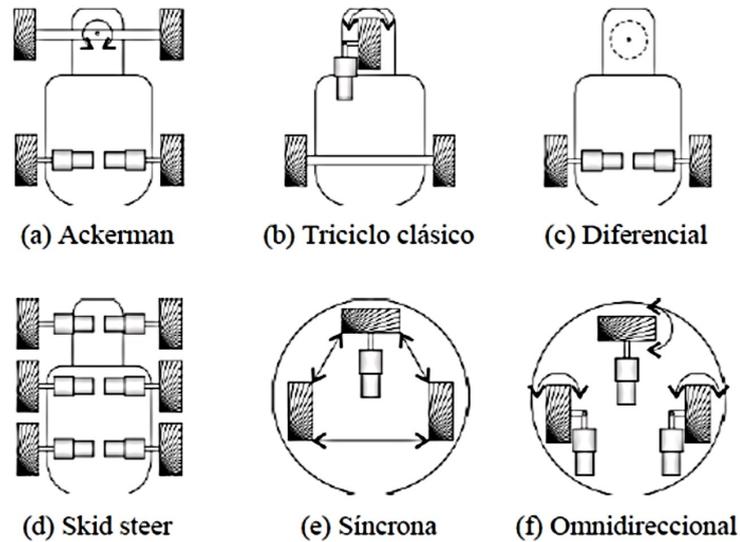


Figura 2.5: Configuraciones mecánicas de los vehículos eléctricos. Dentro de estas se encuentra la configuración Skid steer que es la que posee la plataforma desarrollada en este proyecto. Referencia: <http://umh1796.edu.umh.es>.

par de ruedas traseras directrices y el otro par motrices, con cuatro ruedas directrices y tracción delantera, etc). En este sistema es frecuente el uso de suspensiones para aumentar la estabilidad del vehículo. Este diseño, al igual que el del triciclo, tiene la desventaja de que su orientación está ligada a la posición, es decir, no puede orientarse sin avanzar o retroceder.

- **Triciclo clásico:** Consta de tres ruedas. Dos ruedas traseras pasivas que no están acopladas a ningún motor y una rueda delantera que proporciona la dirección y tracción al vehículo. Un problema asociado a esta configuración es que el vehículo pierde tracción cuando intenta subir un terreno inclinado.
- **Diferencial:** Consta de dos ruedas colocadas en el eje perpendicular a la dirección del vehículo. Cada rueda es controlada por un motor, de tal forma que su giro se encuentra determinado por la diferencia de velocidades o direcciones de las ruedas. Uno de los problemas que tiene esta configuración es mantener el equilibrio del vehículo.

- **Skid steer:** Es similar a la configuración diferencial, pero con la diferencia que tiene más de una rueda en cada lado, controladas por un mismo motor. Puede ser encontrada en una amplia gama de vehículos todo terreno, como montacargas, minería, de guerra y en aplicaciones relacionadas a la exploración.
- **Síncrona:** Está conformada por tres o más ruedas, todas ellas acopladas mecánicamente y dotadas de tracción, de tal forma que todas rotan en la misma dirección y a la misma velocidad. Este sistema posee dos motores, uno para el movimiento y otro para la dirección, así el vehículo no requiere girar para cambiar la dirección.
- **Omnidireccional:** Esta provista de ruedas omnidireccionales, lo que permite que el vehículo se mueva en cualquier dirección. La rueda omnidireccional, está dotada de una corona de rodillos, los cuales giran sobre sí mismos al aplicarle una fuerza lateral.

Dadas las características y requerimientos del proyecto se diseñó un vehículo con estructura Skid steer. La cual, consta de cuatro ruedas colocadas en el eje perpendicular a la dirección del vehículo. Cada par de ruedas cuenta con su propio motor, pero cada par de ellos, son controlados simultáneamente, de tal forma que el giro del vehículo queda determinado por la diferencia de la velocidad o dirección entre los motores de cada par de ruedas.

Este tipo de dirección es mecánicamente más simple que un robot con otra configuración. Sin embargo, el control dinámico de su movimiento es más complejo, debido que se requiere siempre de la coordinación de ambos motores cuando se quiere seguir una línea recta, de otra manera, el Rover tiende a girar hacia el lado que rota menos. En la Figura 2.6 se muestra el desplazamiento del robot en función de la velocidad y dirección de sus motores.

Sus ventajas son las mismas que las de los robots de configuración diferencial: son simples, robustos y tienen buena maniobrabilidad. Su principal inconveniente es el deslizamiento lateral producido en las ruedas durante los cambios de dirección y

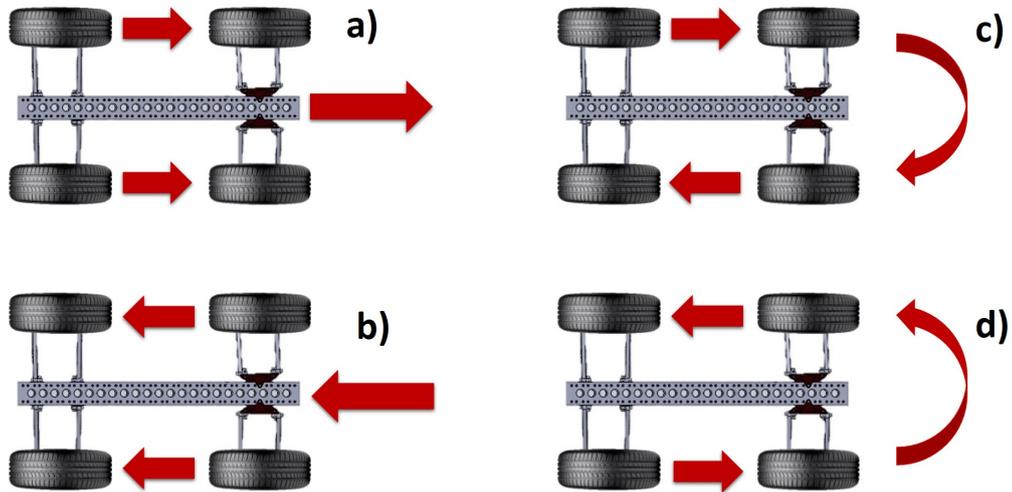


Figura 2.6: Diagrama de conducción de la plataforma rover: Si ambos motores tienen la misma velocidad y dirección, el robot se desplazará en línea recta ya sea hacia adelante o atrás (inciso a y b). Si uno de los motores tiene una mayor velocidad que el otro o van en direcciones opuestas, el robot se desplazará describiendo un arco alrededor de su centro de gravedad (inciso c y d).

que da lugar a una mala estimación de la posición del robot. Debido a lo anterior, es importante mencionar que el sistema de dirección tendrá que estar en armonía con la programación del mando para conseguir trayectorias correctas.

2.3. Sistema de suspensión

El comportamiento dinámico vertical del vehículo está íntimamente relacionado con la influencia de las vibraciones mecánicas, las cuales pueden afectar el valor de la fuerza adherente entre éstas y el suelo [Balkwill, 2017]. Es debido a lo anterior que el diseño de un sistema de suspensión es relevante para la navegación de una plataforma de exploración.

Una suspensión demasiado rígida provoca un menor amortiguamiento de las irregularidades, lo que se traduce en un sufrimiento mayor de las partes internas del robot a causa de las vibraciones. Sin embargo, esta configuración aumenta considerablemente el comportamiento estable del chasis. Por otro lado, una suspensión que carece de la suficiente rigidez deriva en un mayor confort, pero las oscilaciones del chasis son mayores.

El modelo de suspensión presentado es el de suspensión independiente en las cuatro ruedas, el cual consiste en un amortiguador (cuerpo de aluminio llenos de aceite de 130 mm) por cada rueda del vehículo, considerando, además, el sistema de articulación (incorpora vigas de aluminio de 4.62 ") y cierta rigidez vertical del neumático, como se ilustra en la Figura 2.7.

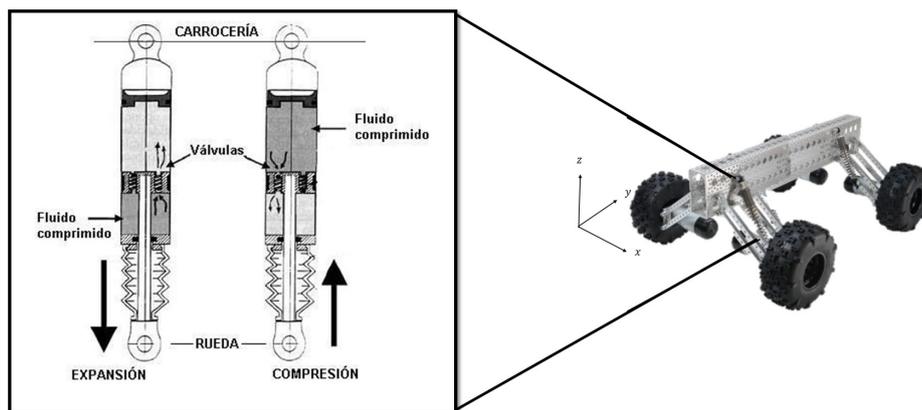


Figura 2.7: Distribución de los componentes del sistema de suspensión. En el recuadro se ilustra los elementos que conforman los amortiguadores y su funcionamiento básico.

Como todos los resortes tienen excelentes propiedades elásticas pero poca capacidad de absorción de energía mecánica, necesitan el montaje de un elemento que frene las oscilaciones producidas en su deformación. Debido a esto, los resortes se montan siempre con un amortiguador de doble efecto que frene tanto su compresión como expansión. Un amortiguador consta de un pistón encerrado en un cilindro con aceite y montado entre la rueda y el bastidor del vehículo. Su funcionamiento se basa en la circulación de aceite entre los dispositivos internos a través de un conjunto de

válvulas que generan una resistencia al paso del mismo entre las cámaras que lo componen. De esta forma se controlan las oscilaciones de la suspensión.

Por otro lado, en el sistema de suspensión se realizaron 3 adaptaciones:

- El amortiguador se fijó al centro de las vigas de aluminio que conforman la articulación, para brindar una estabilidad proporcional a ambos lados
- El resorte fue sustituido por uno de $k \approx 2,400 \frac{N}{m}$ para soportar de manera más eficiente el peso que fue agregado al chasis
- La rigidez del neumático fue modificada, al remplazar la esponja del interior por una de mayor densidad, con valor de $27.25 \frac{kg}{m^3}$

Estas adaptaciones se realizaron con la finalidad de mejorar el comportamiento del sistema de suspensión a lo largo de la misión.

Se optó en particular por este tipo de suspensión debido a que cuando un vehículo se encuentra con un obstáculo en el suelo, los amortiguadores soportan la mayor parte del impacto, disminuyendo así las consecuentes oscilaciones verticales y brindando una mayor estabilidad al chasis.

2.3.1. Análisis del sistema de suspensión

El conjunto de componentes de suspensión conforman un sistema análogo a la suspensión McPherson. Si bien tiene como ventajas su simplicidad y bajo costo de fabricación, tiene un problema geométrico, ya que debido a su configuración no es posible que el movimiento de la rueda sea vertical, sino que el ángulo vertical varía algunos grados durante su movimiento. Sin embargo, esta disposición, además de cumplir su función como suspensión y amortiguación, también sirve como eje vertical de giro de las ruedas [Vikranth et al., 2016].

Las ecuaciones que gobiernan los sistemas mecánicos están formuladas por la ley de movimiento de Newton. Para el análisis del sistema de suspensión, los movimientos de los sistemas mecánicos se pueden describir como de traslación, rotación o de una combinación de ambos.

- Movimiento de traslación: Son los movimientos que se caracterizan por el desplazamiento de un cuerpo a lo largo de una línea recta.
- Movimiento de rotación: Son los movimientos que se caracterizan por el desplazamiento de un cuerpo alrededor de un eje fijo.

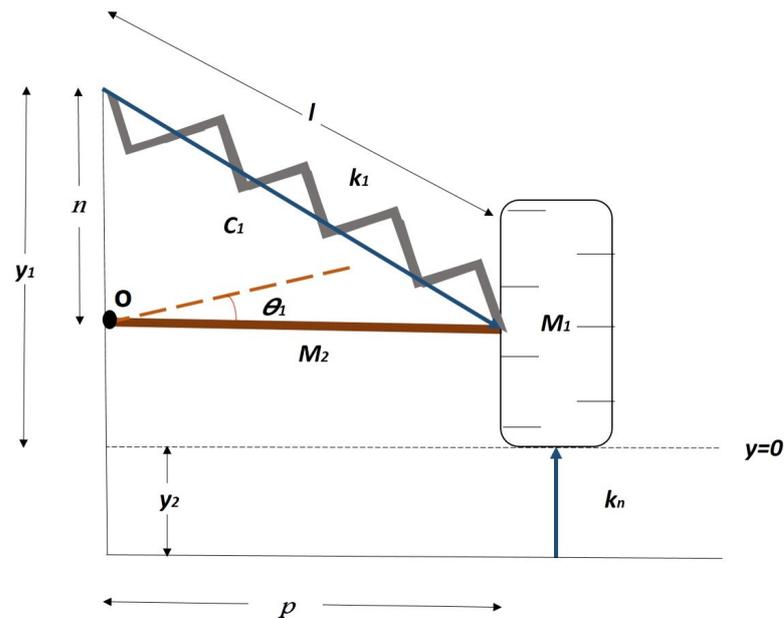


Figura 2.8: Análisis de la geometría del sistema de suspensión. Sobre la barra actúan tres fuerzas en la dirección vertical: la fuerza debida a la gravedad, la fuerza que ejerce el resorte y la fuerza del pistón, estas dos últimas en la misma dirección, ya que forman parte de un sistema de amortiguador.

En la Figura 2.8 se muestra la geometría real del sistema de suspensión, la cual toma como punto de origen la delgada barra homogénea de masa $m_b = 0.036 \text{ kg}$ y longitud $p = 0.117 \text{ m}$, soportada al chasis por un tornillo que le permite girar. La barra está conectada a un resorte ideal (con constante elástica k y largo natural $l = 0.090 \text{ m}$) y a un amortiguador (con coeficiente viscoso c). La constante $n = 0.037 \text{ m}$ es la posición de la barra medida desde el amortiguador.

Para pequeños desplazamientos con respecto a su largo natural, la fuerza que ejerce el resorte sobre la masa en una dirección está dada por:

$$F_r = -k_1 l_1 \quad (2.6)$$

Donde $l_1 = \Delta l$ y k_1 representa la constante del resorte. Tomando en cuenta que no se genera fricción ni rotación en ninguno de los puntos de movimiento de la barra. En tanto que la fuerza que ejerce el amortiguador está dada por:

$$F_a = -c \frac{dy}{dt} \quad (2.7)$$

Donde c es la constante de amortiguamiento viscoso. En equilibrio el peso de la llanta balancea la posición de equilibrio del resorte (donde l es el largo natural del resorte y M_1 indica el punto de concentración de la masa del neumático) por lo que:

$$M_1 \frac{d^2 y_2}{dt^2} + k_1 l \cos \theta_1 = 0 \quad (2.8)$$

Debido a lo anterior, el movimiento de traslado para la llanta, considerando un terreno uniformemente horizontal puede describirse de la siguiente manera, incluyendo el amortiguamiento del resorte y el viscoso que se genera en el amortiguador (ambos en la misma dirección):

$$M_1 \frac{d^2 y_2}{dt^2} = (k_1 l_1 - c \frac{dy}{dt}) \cos \theta_1 \quad (2.9)$$

Como variable extra se puede considerar es cuando el piso no es horizontal, lo cual se puede representar al restar $y_2(t)$ a cada y_i y tomar en cuenta la resistencia del neumático K_n , lo cual afecta a las ecuaciones de traslado de cada llanta.

$$y_i - > y_1 - y_2(t) \quad (2.10)$$

Por otro lado, el movimiento de rotación para la barra se puede describir como se muestra a continuación, tomando en cuenta una geometría más simple, donde las variaciones se generan solo en una dirección. Inicialmente, tomando en cuenta los desplazamientos del centro de masa de la barra r_G y donde p representa la longitud de la barra:

$$r_G = \frac{p}{2} \text{sen} \theta_1 \quad (2.11)$$

Deducimos la ecuación de movimiento al sumar momentos alrededor del punto O , eliminando así la reacción del tornillo. Como O está en un punto fijo, una ecuación válida de movimiento es $\sum M_o = I_o \ddot{\theta}$ (equivalente a la segunda Ley de Newton para rotación).

$$I_o \frac{d^2 \theta_1}{dt^2} = -(M_2 g \frac{p}{2}) \text{sen} \theta_1 - (k p l_1 + c p \frac{dy}{dt}) \quad (2.12)$$

agregando el valor I_o para una barra que gira sobre su extremo:

$$I_o = \frac{M_2 p^2}{3} \frac{d^2 \theta_1}{dt^2} \quad (2.13)$$

Finalmente, tomando en cuenta las aproximaciones para ángulos pequeños $\cos\theta \approx 1$ y $\sin\theta \approx \theta$, se obtiene una ecuación equivalente a la siguiente:

$$\frac{M_2 p^2}{3} \frac{d^2\theta_1}{dt^2} + c p \frac{d\theta_1}{dt} + [k p + \frac{M_2 g p}{2}] \theta_1 = 0 \quad (2.14)$$

La cual es una ecuación diferencial homogénea de segundo orden que describe una oscilación amortiguada de cuerpos rígidos. El planteamiento anterior se entiende como una aproximación a la estructura original del sistema de suspensión del chasis.

Por otro lado, la siguiente conclusión se sustenta a partir de las suposiciones y simplificaciones planteadas durante esta sección, con las cuales los expertos podrían no estar de acuerdo. En nuestro caso la fuerza de rozamiento es débil a comparación de la fuerza aplicada por el resorte y el peso de la llanta, por lo que el sistema de suspensión queda descrito aproximadamente por el movimiento de un oscilador subamortiguado, lo cual implica que el chasis realizará un par de oscilaciones antes de volver a su posición de equilibrio.

2.4. Sistema de alimentación

Para finalizar la determinación de los sistemas que componen la plataforma, también se debe considerar la fuente de energía con la que se alimentará a cada uno de los sistemas anteriores. En este caso, la obtención de energía por sistemas de combustión o energía nuclear constituyen un sistema eficaz pero poco eficiente. Es por ello que se optó por una fuente de energía que consta de una serie de baterías, compuesta por una o más celdas, con determinadas características para cumplir con los requerimientos de cada sistema.

Una batería es un elemento eléctrico que transforma energía química en energía eléctrica, y viceversa. A esta transformación se la denomina proceso electroquímico [Mantell, 1980]. Como ya se mencionó, existen diversas opciones en el mercado, por lo que a continuación se analizarán algunos de los tipos más comunes y se determinará la mejor opción en cada caso, de acuerdo a las ventajas y desventajas que presenta cada una de ellas.

- **Baterías alcalinas:** Baterías generalmente no recargables, que obtienen su energía de la reacción química entre el zinc y el dióxido de manganeso (MnO_2), empleando hidróxido de potasio como electrolito. Son de bajo costo y su tensión nominal es de 1.5 V, pero múltiplos de esta tensión pueden lograrse al conectarlas en serie. Sin embargo, con el tiempo, las pilas alcalinas son propensas a presentar fugas de hidróxido de potasio, el cual es un agente cáustico.
- **Baterías de polímero de Litio:** Son baterías recargables y acumulan un carga mayor por unidad de volumen, lo que las hace especialmente interesantes para integrarlas en dispositivos portátiles con poco espacio. Presentan un alto voltaje por celda (3.7 V) y carecen de efecto memoria. Por otro lado, las desventajas de estas baterías de litio son que independientemente del uso, sólo tienen una vida útil de 3 años. Son más caras y están fabricadas con materiales inflamables. Además de que tienen un rendimiento inferior a las demás baterías en bajas temperaturas, reduciéndose su duración hasta a un 25 %.
- **Baterías Níquel-Cadmio:** Es una batería recargable, formada por una placa positiva de hidróxido de níquel y una placa negativa de hidróxido de cadmio. Una ventaja que poseen es la cantidad de ciclos de carga y su bajo costo. Sin embargo, presenta el efecto memoria, el cual se produce como consecuencia de sobrecargas repetidas y/o descargas parciales.
- **Baterías Níquel- Hidruro metálico:** Las baterías de níquel e hidruro metálico tienden alrededor de 40 % mayor capacidad que las Ni-Cd y sufren menos el efecto memoria. Las baterías de níquel e hidruro metálico son más amigables con el medio ambiente. Pueden almacenar un 30 % más de energía que una de

Ni-Cd y por tanto, la carga dura más tiempo. El problema es que después de los 300 ciclos de carga, su capacidad cae drásticamente.

- **Baterías Plomo-ácido:** Poseen seis celdas con un voltaje nominal de 2.1 V cada una. Tienen una gran capacidad de corriente, con una baja resistencia interna, lo que les permite cargarse en períodos cortos y descargarse lentamente. Son económicas, pero de gran peso, lo que no las hace recomendables para robots autónomos de tamaño mediano o pequeño.

Como se puede observar, existen muchas variantes al momento de elegir la fuente energía para la plataforma, sin embargo, hay que tomar en cuenta los requerimientos de cada uno de los sistemas que se van a alimentar. Para obtener la corriente total de consumo es necesario realizar la suma de consumos de corriente de cada dispositivo dentro del circuito, con este valor se podrán tener las especificaciones de la batería a utilizar.

$$I_T = I_{D1} + I_{D1} + \dots + I_{Dn} \quad (2.15)$$

La batería utilizada deberá tener una capacidad eléctrica mayor a la exigida por el circuito y los dispositivos con los que se trabaja, pero las características de la batería determinarán el tiempo que se podrá alimentar el circuito.

Entonces, si se aumenta la autonomía del chasis, se requiere mayor tamaño y mayor peso de los componentes a bordo, por lo que un factor importante a considerar en la fuente de energía es una densidad de energía alta. Entonces, por el tamaño y consumo de los motores ($I_m \approx 1,200mA$), se optó por una batería de polímero de Litio, con un voltaje nominal de 11.1 V y con capacidad de 2,200 mAh, para alimentar el sistema de locomoción. En cuanto a peso y dimensiones, presenta un peso de 188 g y unas dimensiones de 105 x 33 x 24 mm, lo cual no representa un aporte importante de peso en la carga útil.

Por otra parte, para alimentar los sensores ($I_s \approx 120 \text{ mA}$) y la electrónica restante, se optó por utilizar bancos de energía (baterías recargables de material de ion de litio o polímero de litio con salidas USB). Los cuales son baterías controladas por un microchip, de manera que detectan el dispositivo conectado y le suministra la corriente necesaria que admite dicho dispositivo. Dispone de circuitos de protección contra sobrecorriente y cortocircuito. Los bancos de energía seleccionados suministran un voltaje nominal de 5 V y tienen capacidad de 2,600 mAh y sus dimensiones son 22 x 24 x 96 mm y tienen un peso aproximado de 100 g.

2.5. Sección de carga útil

Se denomina como carga útil al conjunto de sistemas electrónicos de un vehículo cuya función es realizar las actividades y protocolos que harán posible alcanzar los objetivos de la misión para la que el vehículo esté diseñado [Bokanowski et al., 2017].

Existen dos restricciones importantes para determinar la carga útil, el peso máximo que pueden mover los motores (representado en la Figura 2.9) y su límite de consumo energético; el cual se determina por la relación del peso a transportar (10 kg) y el tiempo de operación requerido para el vehículo (aproximadamente 40 minutos).

Como se puede observar en la gráfica, el peso máximo que pueden mover los motores es de alrededor de 13.85 kg. Por ello, es importante optimizar el diseño de la sección de carga y los materiales para su elaboración, ya que una incorrecta determinación y distribución de la carga afecta de manera directa al rendimiento del vehículo; estabilidad, maniobrabilidad, consumo de energía y el desgaste de los distintos sistemas.

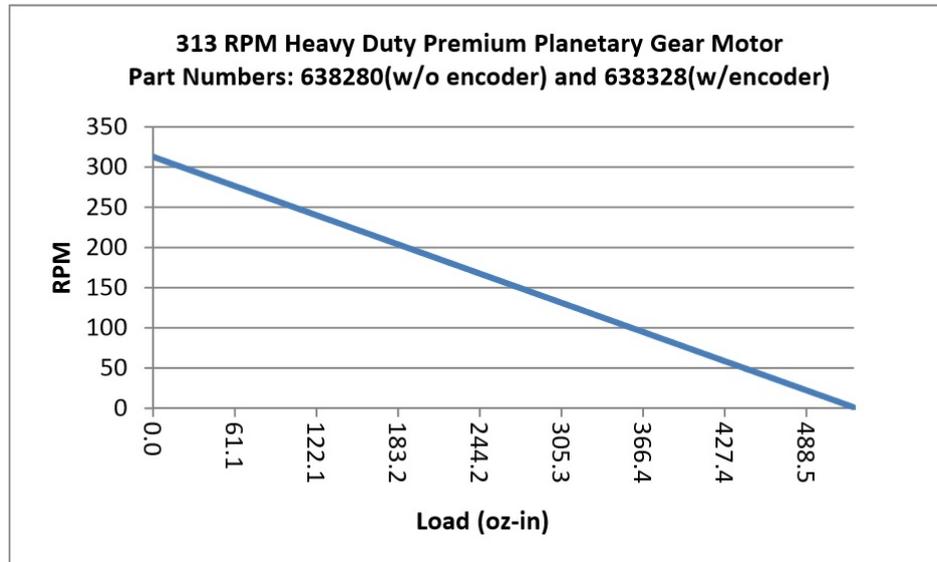


Figura 2.9: Relación entre el peso de carga y la velocidad máxima que puede alcanzar el motor. Referencia: <https://www.servocity.com/313-rpm-hd-premium-planetary-gear-motor>.

El diseño de la sección de carga se presenta en la Figura 2.10. La sección de carga consiste en una estructura de forma rectangular, diseñada así para optimizar el espacio que pueden ocupar los componentes. Se divide en tres secciones, de las cuales la sección central (B) consta de una sección superior en donde se colocan los componentes encargados del control de los motores y dos secciones laterales inferiores designadas para el transporte de baterías. Las dos secciones restantes, A y C, fueron determinadas para colocar los componentes encargados de sensar el ambiente y los encargados de la dirección del vehículo.

Dentro de la carga útil se encuentran los componentes electrónicos de los siguientes módulos: Los que permiten el control del vehículo, adquisición de datos (Arduino, telemetría y sensores) y las fuentes de alimentación de ambos. Todos estos componentes permiten que se alcancen los objetivos de cada misión.

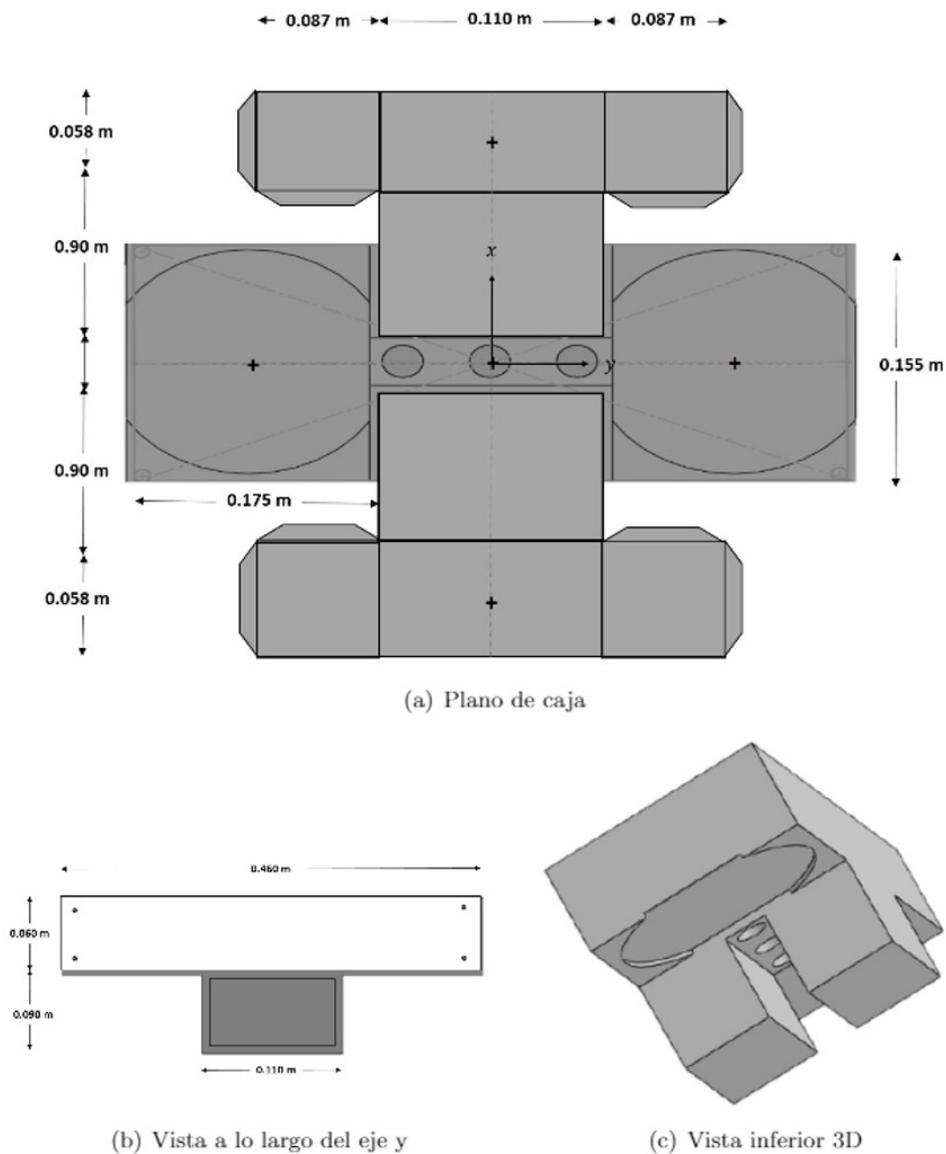


Figura 2.10: Planos de sección de carga útil: En el inciso a, se muestra el plano realizado para elaborar la base de aluminio, en el inciso b se observa la parte superior de la caja elaborada en acrílico de 6mm de espesor y finalmente en el inciso c, se puede apreciar la caja completa. Se eligieron estos materiales por ser ligeros y maquinables, lo que se traduce en una estructura simple de elaborar y la cual no será un aporte significativo para el peso de la carga útil.

Por otra parte, la diferencia entre la carga de las ruedas derecha e izquierda no debe ser mayor a 3% de la carga total sobre el eje, ya que esto resultaría en una inclinación del vehículo. Por lo que la distribución de la carga útil se dispuso de la siguiente manera:

Componentes	Peso	Sección
Cámara	190 g	A
Batería de Arduino	100 g	A
Arduino y shield de motores	50 g	A
ESC	90 g	B
Baterías de motores	300 g	B
Arduino, shield y sensores	175 g	C
Batería de sensores	100 g	C
Receptor RC y antena	35 g	C
Xbee, shield y antena	40 g	C
TOTAL	1,090 g	
Sección A		350 g
Sección B		390 g
Sección C		350 g

Tabla 2.2: Componentes y distribución de la carga útil

Como se puede observar en la Tabla 2.2, el peso se encuentra distribuido de manera uniforme dentro de las secciones de carga. Como ya se mencionó, la distribución del peso total (incluyendo el chasis, el cuerpo y la carga útil) deberá mantenerse cuidadosamente para no llegar a sobrecargar alguno de los ejes de movimiento del vehículo.

Un análisis aproximado para vehículos de dos ejes, en posición de marcha y con carga uniformemente repartida sobre la caja de carga, se expresa con el cálculo de las reacciones sobre los ejes delantero (R_A) y trasero (R_B) (resultado de aplicar equilibrio de fuerzas y momentos actuantes) de la siguiente manera:

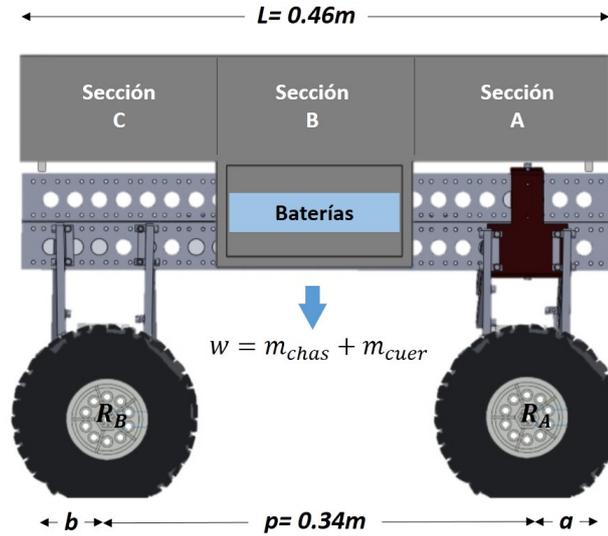


Figura 2.11: Distribución de carga útil

$$R_A = \frac{w(L/2 - a)}{p} \approx 4.5 \text{ kg} \quad (2.16)$$

$$R_B = \frac{w(L/2 - b)}{p} \approx 4.5 \text{ kg} \quad (2.17)$$

Se considera que, para la carga útil distribuida uniformemente a lo largo de la caja de carga, se aplica su resultante en el centro de gravedad, la que coincide con su centro geométrico, al considerarse también la caja de carga de características constructivas simétrica respecto a sus ejes medios, como se puede apreciar en la Figura 2.11. De acuerdo a los valores obtenidos por medio de las Ecuaciones 2.16 y 2.17, se concluye que la carga útil se encuentra distribuida de manera apropiada o la diferencia de carga se encuentra dentro de la tolerancia permitida para no afectar el rendimiento del vehículo.

CAPÍTULO 3

Bloques de control

Contenido

3.1. Bloque teleoperado	42
3.1.1. Sistema de radiocontrol	45
3.1.2. Funcionamiento general del sistema de radio control	48
3.2. Bloque autónomo	49
3.2.1. Microcontroladores	50
3.2.2. Arduino	52
3.2.3. Sensado de ambiente	54
3.2.4. Controlador de motores	57
3.2.5. Algoritmo de control	59

“Un robot móvil es un vehículo de propulsión autónoma y movimiento programado por medio de control automático para realizar una tarea específica” [Aguilera et al., 2007]. Los robots móviles se clasifican en guiados y no guiados. Por una parte, el vehículo guiado está restringido a un conjunto de trayectorias predefinidas o transmitidas a distancia, que se transforman en acciones a realizar en su área de trabajo. En el caso de las trayectorias, estas pueden estar indicadas por líneas ópticas, magnéticas o una secuencia de movimientos guardados en la memoria.

Por otra parte, los vehículos no guiados no están restringidos a una trayectoria predefinida, son los que operan de forma autónoma, los cuales integran un sistema multisensorial. A este tipo de robots pertenecen los robots submarinos, aéreos y los terrestres.

En las siguientes secciones, se describirán los bloques de operación para el movimiento del vehículo, las cuales se separan en bloque teleoperado haciendo uso de un mando Radio Control (RC) y el bloque autónomo, el cual recurre a un sistema multisensorial para lograr el desplazamiento a través del ambiente.

3.1. Bloque teleoperado

Se entiende por teleoperación al conjunto de tecnologías que comprenden la operación o gobierno a distancia de un dispositivo por un ser humano [Nuño and Basañez, 2004]. En los sistemas de teleoperación de robots la intervención del operador humano, generalmente, es imprescindible, especialmente en entornos no estructurados y dinámicos en los cuales los problemas de percepción y planificación automática son muy complejos.

Las ondas electromagnéticas, convenientemente tratadas y moduladas (variando de forma controlada la amplitud, fase y/o frecuencia), pueden emplearse para la transmisión de información, dando lugar a una forma de telecomunicación. Este tipo de transmisión constituye el sistema de comunicación de este proyecto.

Para que la transmisión de datos sea posible es necesario un protocolo de comunicación, el cual es un sistema de reglas que permite que dos o más entidades de un sistema de comunicaciones transmitan información a través de cualquier tipo de variación de una cantidad física. Si bien los protocolos pueden variar mucho en propósito y sofisticación, el protocolo define la sintaxis de las reglas, la semántica, la sincronización de la comunicación y los posibles métodos de recuperación de errores [Sanchis et al., 2004]. Entre los protocolos de comunicación más relevantes para los objetivos de este proyecto se encuentran los siguientes:

- **PWM (modulación de ancho de pulso):** Una unidad PWM permite asignar cierta duración (por lo general, de un mínimo de 1,000 a 2,000 microsegundos) de tiempo en alto o en bajo a un dato digital de n bits que se considera salida de la etapa procesadora. Lo anterior se logra conectando un contador y un circuito comparador. La comparación generará un tren de pulsos de ancho específico [Posada, 2005]. En este caso, cada canal necesita una vía para leer las entradas del controlador.
- **PPM (modulación por porción de pulso):** También se conoce como Multiplexación por división de tiempo (TDM). Se puede entender PPM como varias señales PWM alineadas una detrás de la otra, como se ilustra en la Figura 3.1. Entonces, una señal de PPM está compuesta por una serie de señales de encendido y apagado cuya longitud total suele ser de 20 milisegundos. Por ello, en PPM, los canales se envían uno tras otro y no al mismo tiempo, después se envía un retraso y finalmente se regresa al primer canal. Sin embargo, PPM no es el más popular porque muchas emisoras no son compatibles con este protocolo.
- **SBus:** Es un protocolo de comunicación en serie, similar al PPM. Con la diferencia de ser una señal digital, la principal ventaja de SBus es que puede admitir hasta 18 canales con un solo cable de señal.

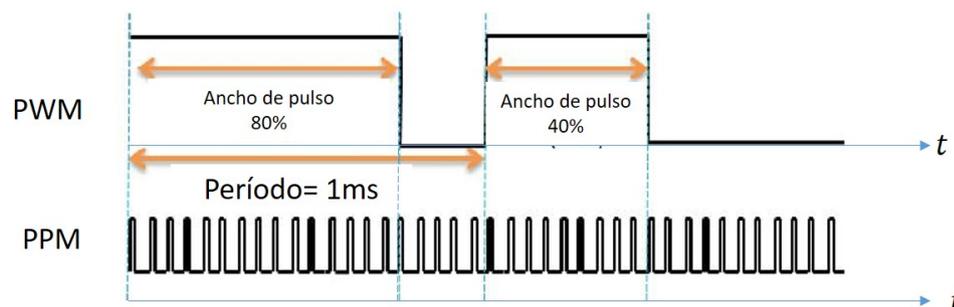


Figura 3.1: Comparación entre los pulsos de las señales PWM y PPM [Hyung-Joon et al., 2012].

Los sistemas de comunicación usan protocolos de comunicación para intercambiar mensajes y cada uno de estos tiene un significado exacto destinado a obtener una respuesta de un rango de posibles respuestas predeterminadas para esa situación particular [Garcia-Robledo et al., 2008]. Estas propiedades, permiten no sólo la transmisión de información sino también controlar las acciones de un objeto ubicado en una zona remota, dando paso a la teleoperación.

En los vehículos robóticos, resulta útil implementar un esquema de teleoperación, debido a que deben ser capaces de desplazarse en ambientes con obstáculos tanto estáticos como dinámicos. Si es un ambiente conocido, es posible desarrollar trayectorias fijas que evadan obstáculos, pero esto resulta inútil cuando la información del área de trabajo es insuficiente o se trabaja en lugares cambiantes, por lo que la planeación inicial de la trayectoria ya no es aceptable.

Sin importar la aplicación y distancia, estos sistemas constan de tres bloques principales:

- **Sistema de control:** Controla y supervisa las acciones que se desean realizar por medio de una interfaz (computadora, control remoto, etcétera).
- **Sistema de inspección remota:** Incorporan sensores y actuadores para realizar las acciones deseadas (brazos robóticos, motores, sensores, etc).
- **Sistema de comunicación:** Su objetivo principal es servir de enlace entre el sistema de control (SC) y el sistema remoto (SR). Transmite los datos obtenidos en el SR hacia el SC para llevar a cabo un monitoreo y a la inversa transmite los datos del SC para dirigir el sistema remoto.

Para este proyecto, se plantea el control por medio de un mando de radiocontrol, lo cual le brindará flexibilidad al sistema de teleoperación ya que, si el robot se encuentre cerca o lejos del operador, esté será capaz de manipularlo directamente o apoyándose con la información visual.

3.1.1. Sistema de radiocontrol

Un sistema de radiocontrol consiste básicamente en un emisor, que manipulado por un operador, envía una señal de radio codificada; la señal es recibida por un receptor montado en el vehículo que decodifica y dirige la orden a los diferentes dispositivos, transformando así la señal eléctrica en un movimiento mecánico transmitido a los elementos móviles del vehículo [Jackson and Day, 1990].

Primero, para el control de movimiento es necesario contar con un control inalámbrico con al menos cuatro canales para que sea capaz de controlar los tres principales movimientos del vehículo, es decir: movimiento hacia el frente, hacia atrás y giro. Para el desarrollo de este proyecto, se utiliza el AT9 de Radiolink, que trabaja a 2.4 GHz, cuenta con 8 canales, cuyo rango de alcance es aproximadamente 800 metros en tierra y que se caracteriza por un funcionamiento estable, así como por una respuesta rápida.

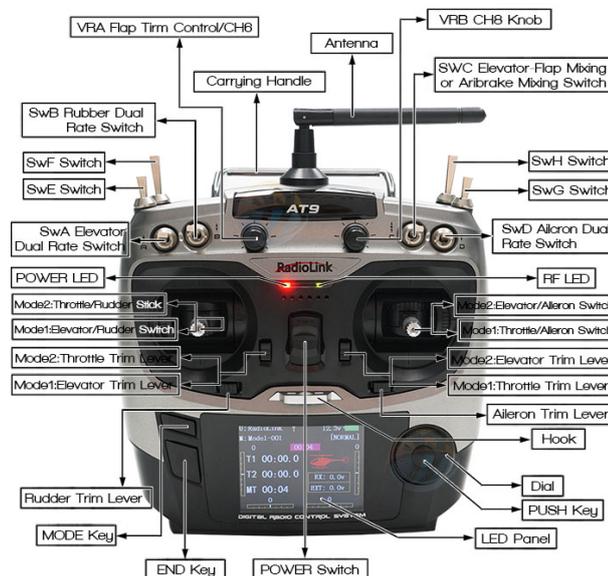


Figura 3.2: Cuadro de mandos del radiocontrol AT9 Radiolink. Referencia: <http://www.radiolink.com.cn/doce/product-detail-89.html>.

En la Figura 3.2 se muestra el cuadro de mandos del radiocontrol, una caja ligera (900 g), que cuenta con ocho interruptores y cuatro centradores ajustables. Además, cuenta con dos palancas de mando o sticks, ambos móviles en horizontal, vertical y en cualquier ángulo intermedio lo que permite controlar los motores de manera simultánea. Debido a que se realizó una conexión en paralelo de los motores, determinando con esto la distribución de los ejes izquierdo y derecho se distribuye el control de los ejes en los sticks izquierdo y derecho, respectivamente.



Figura 3.3: Distribución de controles de la emisora. Stick derecho encargado del control de los motores DC del eje derecho y stick izquierdo encargado del control motores DC del eje izquierdo del vehículo.

Segundo, es necesario un receptor de radiocontrol que permita recibir y decodificar las señales enviadas por el emisor. Una característica a tomar en cuenta es el tamaño, debido a que cuanto menor sea este, más conveniente es para la instalación. En este proyecto se utiliza el receptor R9D que viene incluido con la emisora AT9, con dimensiones de 42.5 x 23.5 x 14.5 mm. Como se puede observar en la Figura 3.4, tiene tres bloques de conectores, uno superior diseñado para conectar un módulo de telemetría, un segundo bloque, con ocho canales de salida PWM (configurables del 5 al 8) y el tercer bloque como receptor PPM o SBus. Debido a sus características, se considera una opción eficiente en cuestión de tamaño y funcionamiento.

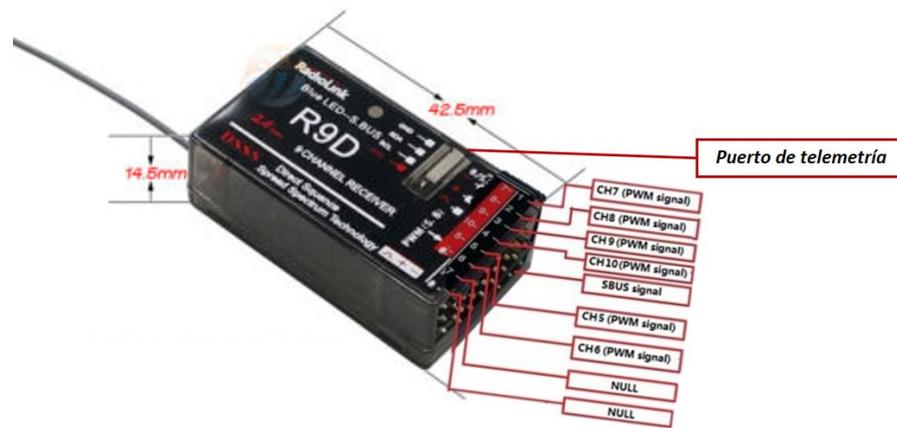


Figura 3.4: Receptor de radio control R9D y sus distintos bloques de conexión. Referencia: <http://radiolink.com.cn/doce/>.

Con respecto a los actuadores, un componente importante dentro del bloque teleoperado es el controlador electrónico de velocidad controlador electrónico de velocidad (ESC), el cual es un circuito electrónico que controla y regula la velocidad, así como la dirección de giro de un motor eléctrico. El ESC seleccionado para este proyecto es un 320A Brush Motor Speed Controller, cuyo voltaje de operación es 7.4-11.1V, el cual es compacto, potente y a prueba de agua. En la Figura 3.5 se muestra el diagrama básico de conexión del sistema remoto a bordo del Rover.

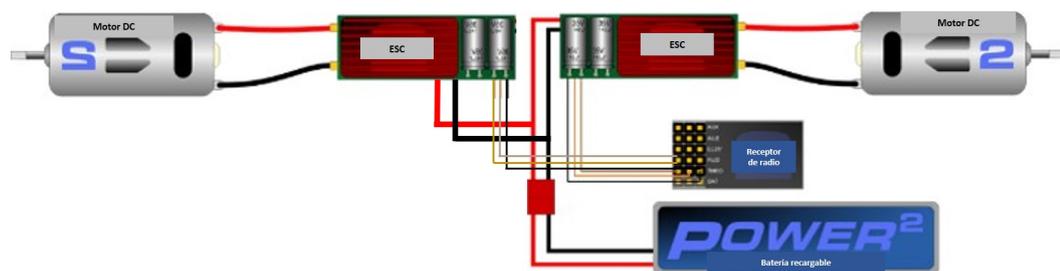


Figura 3.5: Diagrama de conexión del sistema remoto a bordo del Rover. En este diagrama, cada motor representa uno de los ejes, el cual está conformado por dos motores DC.

3.1.2. Funcionamiento general del sistema de radio control

Respecto al funcionamiento del sistema de radio control (RC), al activar uno de los sticks se completa el circuito que está unido a una terminal específica de un circuito integrado (Integrated Circuit (IC)) dentro de la emisora. Esto causa que el transmisor emita una secuencia de pulsos eléctricos, cada secuencia contiene un corto grupo de pulsos de sincronización, seguidos por otra secuencia de pulsos que contienen la información de control. El segmento de sincronización es el encargado de alertar al receptor sobre la llegada de información. Después, el transmisor envía secuencias de pulsos con ondas de radio que oscilan a una frecuencia de 2.4 GHz. Este proceso se ilustra en la Figura 3.6.

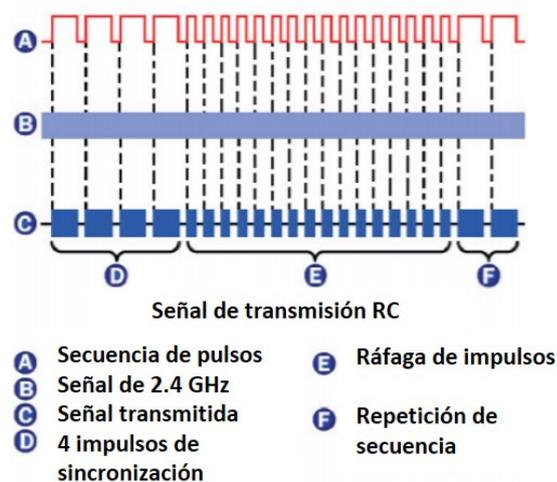


Figura 3.6: Señal típica de Radio control. Referencia: <http://www.dainf.ct.utfpr.edu.br>.

Al mismo tiempo, el receptor monitorea constantemente la frecuencia asignada en busca de una señal y cuando recibe las ondas de radio del transmisor, este envía la señal a un filtro que bloquea cualquier señal captada que no sea a 2.4 GHz. La señal restante es convertida de nuevo a una señal eléctrica de pulsos. La secuencia de pulsos es enviada al IC del receptor, el cual decodifica la secuencia y manda una señal PWM al ESC las cuales determinan la velocidad del motor.

En este vehículo se lleva a cabo un control coordinado de teleoperación, en el cual el sistema remoto o esclavo puede realizar parte de las tareas de manera semiautónoma, mientras que el operador monitorea y envía comandos para que el manipulador los ejecute. Es decir, el control de los motores se lleva a cabo por medio del sistema de radio control mientras que el sensado del ambiente, se encuentra previamente programado en el microcontrolador que se encuentra acoplado al vehículo en el área remota. Este tipo de sistemas son los más usados y estudiados en la actualidad, ya que permiten realizar modelos virtuales, estimar parámetros, entre otras cosas.

3.2. Bloque autónomo

Un agente autónomo es un sistema situado dentro un entorno que percibe ese medio ambiente y actúa sobre él, en la búsqueda de sus propios objetivos [Franklin and Graesser, 1997]. Existen diversos tipos de agentes autónomos, entre los más relevantes se encuentran:

- **Agentes robóticos:** Están equipados con cámaras, ultrasonidos que sirven de sensores y los motores funcionan como efectores.
- **Agentes de software:** Reciben percepciones y ejecutan acciones.

Las dificultades surgen a partir de la elevada carga de procesamiento que representa tratar los datos percibidos en tiempo real y de una rápida respuesta al entorno. De esta forma, se resuelven problemas basados en modelos previos del entorno cuyas soluciones sólo son válidas si el modelo corresponde exactamente a la realidad. Por ello es de suma importancia la retroalimentación sensorial, ya que permite reducir la incertidumbre al incrementar la información que se tiene del entorno.

A partir de esto, existen métodos que permiten intercalar la formulación y la ejecución de tareas programables como respuesta a la información recibida en los sensores, lo cual permite aumentar la fiabilidad del prototipo. Por otro lado, las limitaciones están impuestas por el sistema de percepción (tipo y características de los sensores) y por la arquitectura del sistema de control del robot.

La solución a la problemática anterior se sitúa en dos tipos de modelos:

- **Estratégico:** La solución del ambiente puede ser predicha de forma eficiente durante la planificación.
- **Reactivo:** Se supone un entorno incierto, por lo que se busca una mayor flexibilidad de reacción de cada uno de los componentes del prototipo, lo que permitiría reaccionar de manera eficiente a la estructura del ambiente.

A pesar de que la arquitectura diseñada para conseguir mayor flexibilidad ante el ambiente es menos eficiente que la que utiliza criterios específicos basados en modelos del entorno preciso, es la arquitectura elegida para este proyecto, debido a que los ambientes que se desean explorar son poco estructurados. En general, el conjunto de sistemas del robot debe ser capaz de realizar el control en tiempo real del vehículo, interactuar con el entorno y detectar fuentes de error utilizando sensores eficientes.

3.2.1. Microcontroladores

Para poder establecer la comunicación entre los sensores y los motores es necesario un microcontrolador, que permita realizar funciones básicas como el desplazamiento del vehículo. Un microcontrolador es un circuito integrado programable para funciones específicas. Cuenta con las tres principales unidades funcionales de una computadora: unidad central de procesamiento, memoria y periféricos de entrada/-salida.

La unidad de procesamiento (Central Processing Unit (CPU)) es el cerebro del microcontrolador. Esta unidad es la encargada de tomar las instrucciones almacenadas en la memoria, interpretarlas (decodificar) y ejecutarlas. Por otro lado, la memoria del microcontrolador es el lugar donde se almacenan las instrucciones del programa y los datos que manipula. En un microcontrolador siempre hay dos tipos de memoria [Caicedo, 2017]:

- **Random Acces Memory (RAM):** Es una memoria de lectura y escritura volátil. Se utiliza para almacenar temporalmente los datos con los que trabaja el programa.
- **Read Only Memory (ROM):** Es una memoria sólo de lectura y no es volátil. Se utiliza para almacenar permanentemente el programa que debe ejecutar el microcontrolador.

Algunos microcontroladores disponen de una memoria no volátil de tipo Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (EEPROM) para almacenar los datos fijos o que sólo sean cambiados esporádicamente [Valdez and Pallás, 2007].

Otros factores de relevancia los constituyen las entradas y salidas del microprocesador, ya que a través de ellas interacciona con el exterior. Forman parte de estas los puertos paralelos (salidas/entradas digitales) y serie (USB, ethernet, etc), los temporizadores y las entradas/salidas analógicas. Además de los componentes fundamentales, los microcontroladores disponen de un oscilador que genera los pulsos que sincronizan las operaciones internas. Generalmente se trata de un oscilador de cuarzo debido a su estabilidad de frecuencia.

3.2.2. Arduino

Arduino es una plataforma de prototipos electrónicos que consiste básicamente en una placa microcontrolador, con un lenguaje de programación en un entorno de desarrollo que soporta la entrada y salida de datos y señales. Además, forma parte del concepto de hardware y software libre, es decir, está abierto para uso y contribución de toda la comunidad. Está basado en los microcontroladores AVR de Atmel (ATmega 8, ATmega 168, ATmega 328 y ATmega 2560), al estar basados en estos, se puede programar lógicamente, usando un lenguaje propio basado en C/C++ que al implementarse permite que el hardware ejecute ciertas acciones [Perea, 2015].

Para conocer mejor las posibilidades que ofrece Arduino es necesario conocer su arquitectura básica. El modelo Arduino UNO, tiene un total de 20 pines, 14 de los cuales son digitales y 6 analógicos, como se puede observar en la Figura 3.7. De los 14 pines digitales, 6 de ellos se pueden utilizar como salidas analógicas, gracias al protocolo PWM.

Por una parte, cada uno de los pines analógicos es capaz de digitalizar una señal de entrada entre los 0 V y V_{DC} , convirtiendo el voltaje de entrada en un valor numérico que va desde el cero hasta 1023, este rango de valores corresponde a la resolución del Analog Digital Converter (ADC) que es de 10 bits. Por otra parte, los pines digitales, funcionan tanto como de entrada como de salida, esto quiere decir que mediante la programación podemos asignarle el pin con una tensión de 0 V que corresponde al nivel bajo o LOW o poner una tensión de 5 V para obtener un nivel alto o HIGH. Con cualquiera de estos pines se puede realizar infinidad de circuitos basados en sistemas binarios

El software para programar el microcontrolador es Arduino Integrated Development Environment (IDE). Todo programa en Arduino IDE tiene dos funciones claramente diferenciadas. La primera, el void setup, la cual se ejecutará una vez al inicio del programa. La segunda parte del programa, el void loop, es un bucle que ejecuta el código en su interior una y otra vez. En él se programan las instrucciones

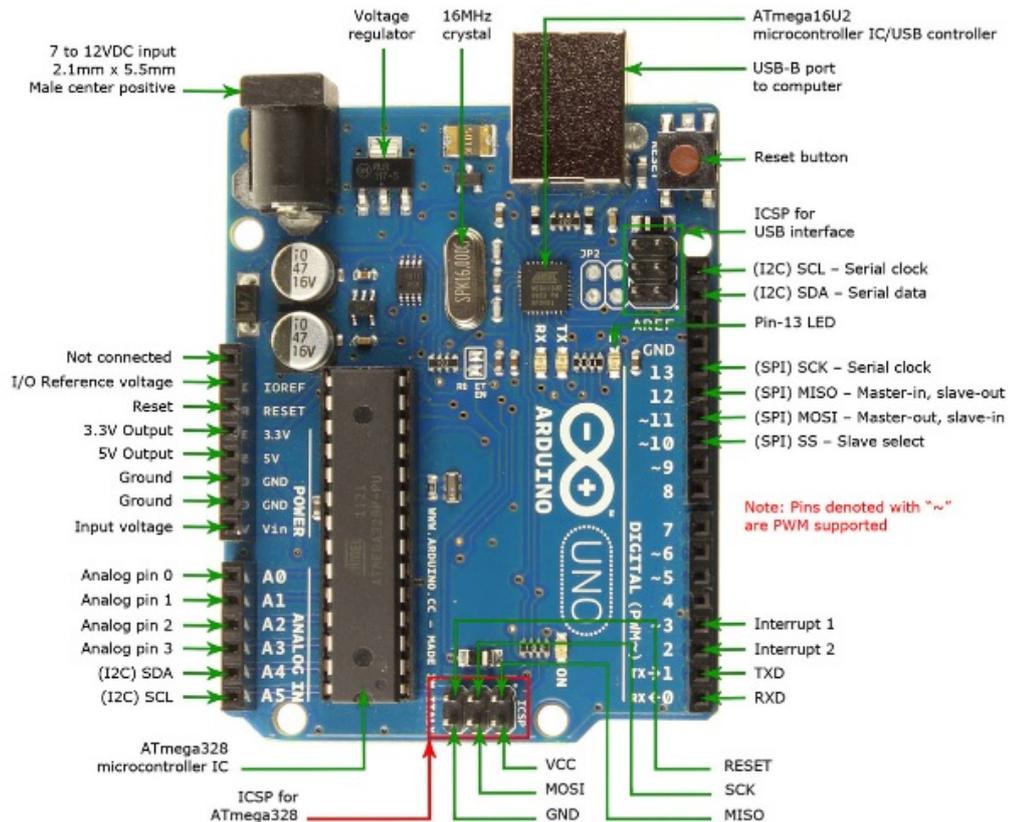


Figura 3.7: Diagrama de Arduino UNO; tiene un total de 20 pines, 14 digitales y 6 analógicos. Referencia: <https://forum.arduino.cc>.

que se requieren realizar periódicamente. El diagrama de bloques de un código en Arduino IDE se puede observar en la Figura 3.8.

Entonces, Arduino proporciona todas las herramientas necesarias para programar el microcontrolador, desde los drivers que necesita el ordenador hasta el entorno de programación necesario para realizar toda clase de proyectos. Además de todo esto, Arduino tiene dos grandes ventajas: la primera, existe una comunidad muy numerosa que da soporte a esta plataforma, y la segunda existen módulos de ampliación que permiten incorporar a la placa utilidades adicionales.

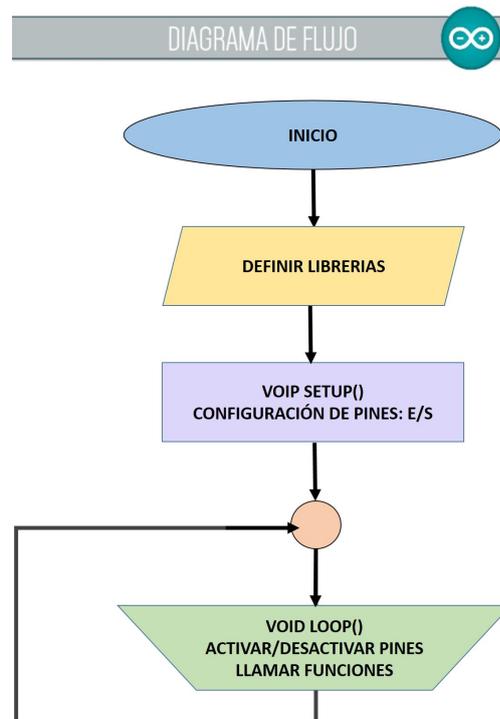


Figura 3.8: Diagrama de flujo para programa en Arduino IDE, donde se muestran sus principales funciones: void setup y void loop.

3.2.3. Sensado de ambiente

La autonomía depende directamente de la capacidad del robot para obtener datos del entorno y convertirlos en órdenes de tal manera que, al ser aplicadas en los actuadores, garanticen el cumplimiento de la tarea programada. Cuando se trata de abordar la navegación autónoma de vehículos, una de las cuestiones más importantes que aparecen es la detección correcta del entorno, por lo que será necesario disponer del conjunto adecuado de sensores, los cuales son módulos capaces de variar una propiedad ante magnitudes físicas o químicas. Para la detección de obstáculos, se utilizaron sensores ultrasónicos HC-SR04 en la parte delantera y trasera del vehículo, sin embargo, el sensor encargado de determinar la presencia de escalones y hoyos es un sensor de distancia óptico SHARP 0A41SK.

El funcionamiento del sensor HC-SR04 se basa en el envío de un pulso de alta frecuencia. El valor de la distancia es proporcional al tiempo obtenido y se relacionan por la siguiente ecuación:

$$D = \frac{t v}{2} \quad (3.1)$$

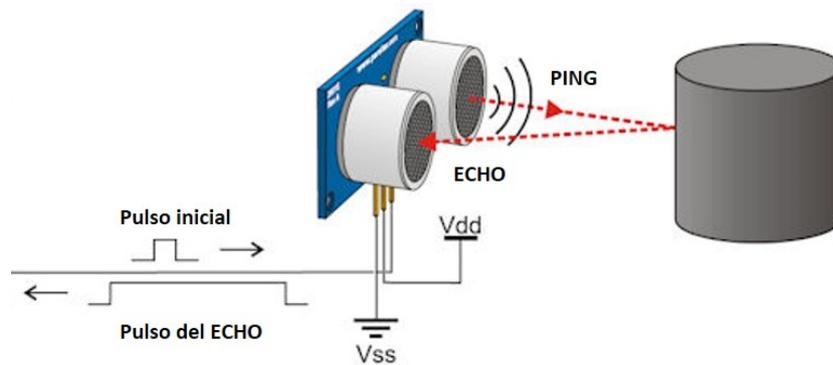


Figura 3.9: El pulso ultrasónico rebota en los objetos cercanos y es reflejado hacia el sensor. La distancia queda determinada al medir el tiempo que la señal del pulso tarda en retornar al receptor luego de ser reflejada por un obstáculo.

Donde v es la velocidad del sonido en el aire, es decir, tiene un valor de 343 m/s , pero se utilizarán las unidades en $\text{cm}/\mu\text{s}$ ya que los valores a trabajar están en centímetros y microsegundos. El rango máximo de medición del sensor ultrasónico es de aproximadamente 4m , no obstante, para los objetivos de este proyecto se decidió restringir el rango de detección hasta los 3 m .

Por otro lado, el sensor SHARP es un sensor óptico capaz de medir la distancia entre él y un objeto, para esto el sensor con la ayuda de un emisor infrarrojo y un receptor miden la distancia usando triangulación. Una ventaja adicional es que no son sensibles a la luz ambiental o solar, un SHARP usa una luz infrarroja intermitente con una frecuencia determinada, que en el receptor es filtrada y elimina cualquier otra fuente de luz diferente a la frecuencia emitida.

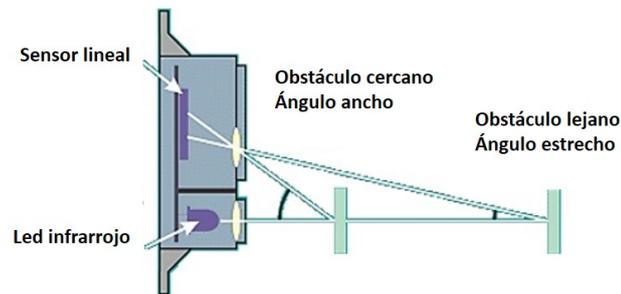


Figura 3.10: El método de triangulación consiste en medir uno de los ángulos que forma el triángulo emisor-objeto-receptor, el receptor es sensible a la posición que detecta el punto de incidencia el cual depende del ángulo y a su vez de la distancia del objeto [Cervellini et al., 2011].

Estos sensores se encuentran dispuestos alrededor de la sección de carga del robot, como se muestra en la Figura 3.11. Esta disposición se diseñó así debido a que permite detectar no solo los objetos a la altura del chasis, sino también permite detectar si hay algún cambio abrupto del suelo frente al vehículo.

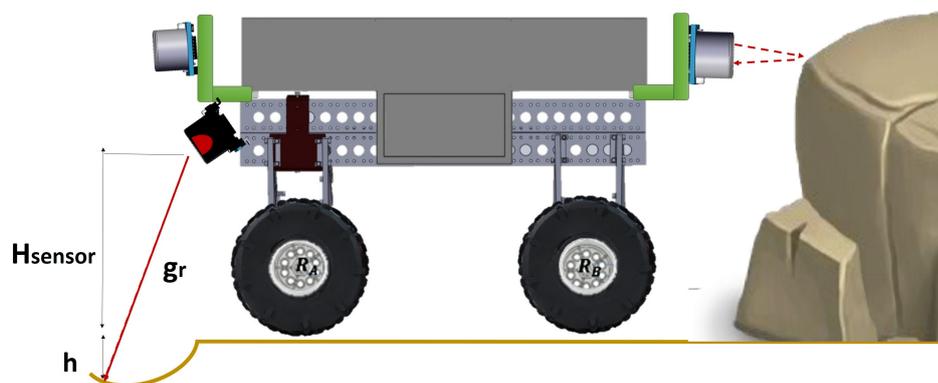


Figura 3.11: Disposición de sensores ultrasónicos. Parte frontal: 1 sensor ultrasónico y 1 sensor infrarrojo formando un ángulo de 45, con movilidad por medio de un servomotor. Parte trasera: 1 sensores ultrasónicos con movilidad por medio de un servomotor.

3.2.4. Controlador de motores

Para lograr el movimiento de este bloque es necesario implementar Shields para Arduino UNO, las cuales son placas de circuitos modulares que se montan unas encima de otras y que permiten ampliar las capacidades de un microcontrolador. El controlador de motores tiene la función de dirigir el movimiento de los motores que permiten el desplazamiento del vehículo, controlando tanto el avance, el retroceso, el giro en sentido horario o antihorario y el frenado de cada uno de los motores.

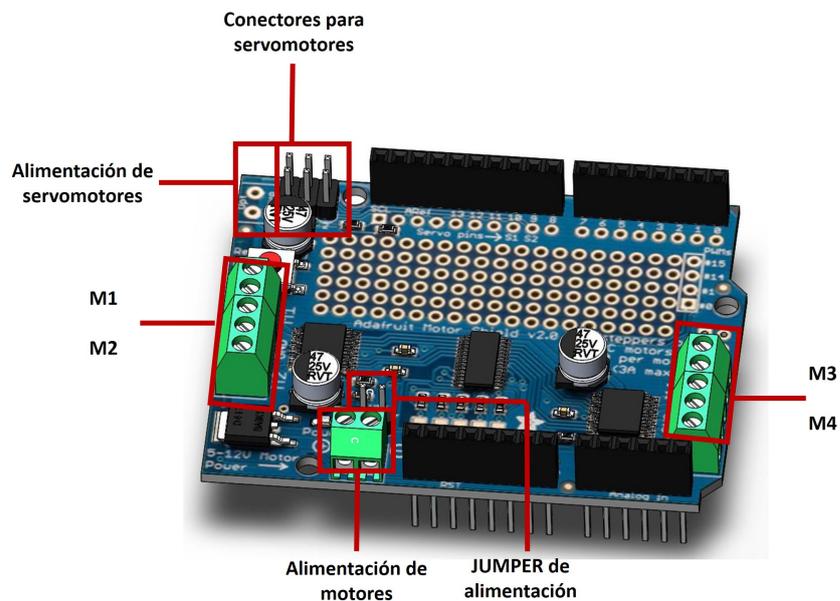


Figura 3.12: Diagrama de pines del Shield de motores V2.3 en donde se muestran los bloques separados de alimentación y de motores.

El controlador seleccionado ha sido el Adafruit Motor Shield v2.3, ilustrado en la Figura 3.12, el cual es un módulo integrado que permite controlar cuatro motores de corriente continua de forma bidireccional. Consta de los controladores MOSFET TB6612 con capacidad de corriente de 1.2 A por cada canal. Una de las ventajas de utilizar un shield para controlar motores con Arduino es que permite variar en incrementos de 0.5% la velocidad.

El modelo seleccionado se basa en el concepto de puente H, cuya denominación proviene de la representación gráfica del circuito. El puente H es un circuito electrónico cuya finalidad es permitir a un motor eléctrico DC girar en ambos sentidos. El funcionamiento de este tipo de circuitos se basa en 4 interruptores (mecánicos o transistores).

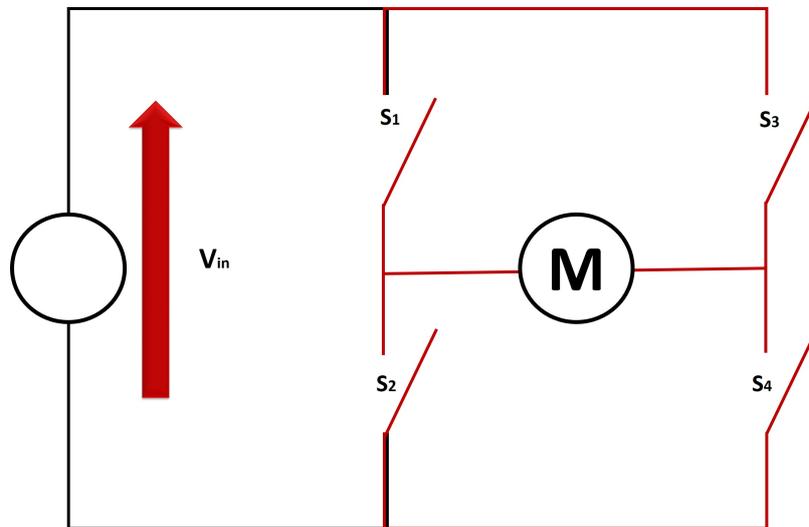


Figura 3.13: Diagrama de puente H: Cuando los interruptores S1 y S4 están cerrados (S2 y S3 abiertos) se aplica una tensión positiva en el motor, haciéndolo girar en sentido horario. Abriendo los interruptores S1 y S4 (cerrando S2 y S3), el voltaje se invierte, permitiendo el giro en sentido inverso del motor.

Los puentes H basados en MOSFET son mucho más eficientes que los puentes H basados en controladores como el L298N ya que permite que se entregue más corriente a los motores. Otra de las opciones que ofrece este shield es utilizar una fuente separada para Arduino y otra para los motores, separando así la lógica de la potencia. Además, esto evita los posibles problemas de ruido al momento de controlar el vehículo. Esta opción se realiza al quitar el conector de alimentación ubicado al lado de la alimentación de motores.

3.2.5. Algoritmo de control

En relación con la programación de este bloque se utilizan las librerías `< AFMotor.h >` (encargada de la programación de la Shield de motores de Adafruit), `< Servo.h >` (responsable del movimiento de los sensores ultrasónicos) y `< NewPing.h >` (la cual habilita las funciones del sensor ultrasónico).

Después de definir las librerías, se deben crear los objetos para cada motor, servomotor y sensor ultrasónico a implementar. En esta sección también se deben declarar las cantidades que representarán una constante de referencia dentro de todo el programa, entre estas se encuentran la velocidad máxima de los motores, la distancia de colisión y la altura máxima que puede sobrepasar el vehículo.

Por una parte, dentro de la función `setup` se deben asignar los puertos a los que están asociados los servomotores y activar la placa de motores. Por otra parte, dentro de la función `loop` se incluyen las condicionales para el manejo del vehículo, las cuales se representan mediante el diagrama de flujo de todo el sistema, el cual se ilustra en la Figura 3.14. Puede observarse allí el algoritmo utilizado para controlar los motores a partir de la información obtenida de los sensores S1 (sensor frontal) y S2 (sensor frontal en dirección hacia el suelo).

Con respecto a la activación de los sensores se debe generar un pulso eléctrico en el pin Trigger (disparador) de al menos $10\mu s$ y posteriormente se utiliza la función `ping_cm()`; para obtener la distancia al obstáculo. Un factor para considerar con respecto a los sensores es emplear en la medida de lo posible aritmética de enteros, evitando usar números flotantes. Esto es debido a que las operaciones con variables flotantes retrasan el tiempo de procesado.

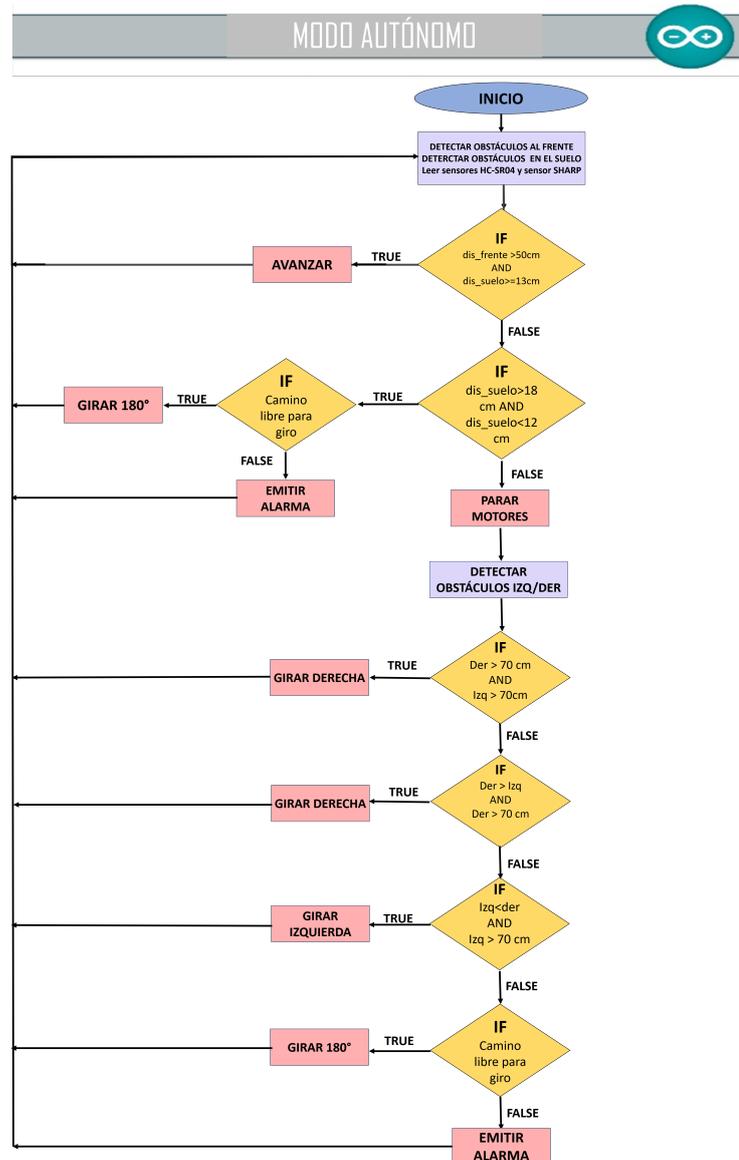


Figura 3.14: Diagrama de flujo de modo autónomo: El vehículo avanzará hacia al frente siempre y cuando no detecte un obstáculo, si esto ocurre, se detendrán los motores y se realizará una comparación de los valores del sensor, obtenidos al lado izquierdo y derecho del vehículo, lo cual permite elegir el camino libre de obstáculos. Sin embargo, si en algún punto no hubiese camino libre se emitirá una alarma para que el operador tenga la posibilidad de localizar al vehículo.

CAPÍTULO 4

Sistema de sensado

Contenido

4.1. Adquisición de variables ambientales	62
4.1.1. Temperatura y humedad	62
4.1.2. Concentración de gases	63
4.1.3. Posición	66
4.2. Digitalización de variables	68
4.3. Transmisión de variables ambientales	69
4.3.1. Transmisión inalámbrica de datos	71
4.3.2. Información visual	78
4.4. Almacenamiento de datos	80
4.5. Despliegue de variables	84

Las tareas de monitoreo ambiental resultan de gran importancia contar con sistemas compactos y portátiles capaces de identificar contaminantes ambientales que faciliten las tareas relacionadas con el modelado y estudio de ambientes [Rubio et al., 2016]. El presente capítulo aborda el diseño y desarrollo de un sistema de sensado que tiene como tarea dar seguimiento de forma continua a un conjunto de sensores que recopila información de las variables ambientales (temperatura, humedad y concentración de gases) del sitio por el que se desplaza el vehículo, para alertar al usuario de los cambios y de los niveles que puedan representar una amenaza para su integridad.

4.1. Adquisición de variables ambientales

En esta sección se describe el desarrollo de un sistema sensor prototipo creado para identificar variables elementales en el ambiente, que permitan reconstruir el ambiente en un posterior procesamiento de los datos. Este prototipo está conformado con un arreglo de cuatro sensores: (1) temperatura y humedad, (2) intensidad de luz, (3) gas de monóxido de carbono y (4) gas de ácido sulfhídrico (gases tóxicos), utilizados para identificar variables ambientales de importancia, por medio de una etapa de adquisición de datos con una plataforma de bajo costo (Arduino).

4.1.1. Temperatura y humedad

Para medir estos parámetros se usará el sensor DHT22, que es un sensor capaz de medir humedad relativa y temperatura, que proporciona una salida de datos digital. Esto supone una gran ventaja frente a los sensores del tipo análogo, en los cuales las fluctuaciones en el voltaje alteran la lectura de datos. Es capaz de medir la humedad entre el rango 0% hasta el 100% y la temperatura entre el rango $-40^{\circ}C$ hasta los $80^{\circ}C$.

La humedad es un fenómeno, que se presenta a nivel molecular y se encuentra relacionada con la cantidad de moléculas de agua presentes en una determinada sustancia. El sistema es capaz de sensar la humedad relativa, que es la relación porcentual entre la cantidad de vapor de agua real (P_v) que contiene el aire y la que necesitaría contener para saturarse (p_s) a una idéntica temperatura.

$$RH = \frac{P_v}{p_s} \times 100 \quad (4.1)$$

El DHT22 es un tipo de sensor resistivo, los cuales están hechos sobre una delgada tableta de un polímero capaz de absorber agua, sobre la cual se han impreso dos contactos entrelazados de material conductor metálico o de carbón. A partir de esto, la absorción de vapor de agua origina el aumento de la conductividad eléctrica [Jimenez et al., 2013]. Por otro lado, para medir la temperatura, estos sensores utilizan termistores, lo cual es en realidad una resistencia variable que cambia su resistencia con el cambio de la temperatura. Sus componentes fundamentales se pueden observar en la Figura 4.1.

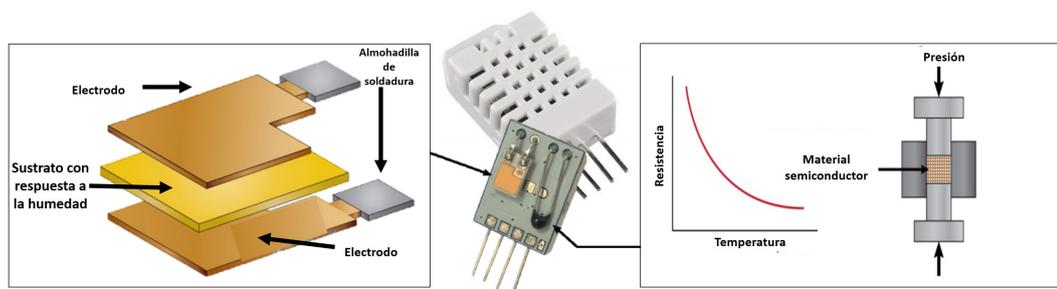


Figura 4.1: Componentes del sensor de temperatura y humedad DHT22: A la derecha se ilustra el termistor encargado de medir la temperatura. A la izquierda se muestra el sensor resistivo encargado de medir la humedad relativa del ambiente.

4.1.2. Concentración de gases

Los gases inflamables y tóxicos pueden producirse en una gran variedad de sitios. Sin embargo, cualquier gas es potencialmente peligroso, si está licuado, comprimido o en su estado natural, por ello es de gran importancia medir su concentración. Es por ello que para tratar con el riesgo tóxico y el peligro de explosión es útil desarrollar sistemas de detección de gases. La toxicidad de gases y vapores es determinada mediante experimentos de laboratorio que tienen como resultado los valores límite umbral. Cuando el contenido de oxígeno sea menor al 19% y el contenido de gases sea mayor que los valores indicados en la Tabla 4.1 como peligroso, se tiene una atmósfera irrespirable para el ser humano.

$O_3(ppm)$	$CO(ppm)$	$H_2S(ppm)$	$NO_2(ppm)$	Nivel de seguridad
–	0.0 ~ 4.4	0.00011 ~ 0.00033	–	Seguro
–	4.5 ~ 9.4	0.00034 ~ 1	–	Moderado
0.125 ~ 0.164	9.5 ~ 12.4	2 ~ 5	–	Poco seguro
0.165 ~ 0.204	12.5 ~ 15.4	6 ~ 14	–	No seguro
0.205 ~ 0.404	15.5 ~ 30.4	15 ~ 20	0.65 ~ 1.24	Peligroso
≥ 0.405	≥ 30.5	≥ 20	≥ 1.25	Mortal

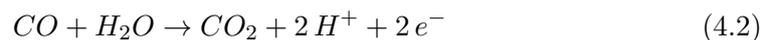
Tabla 4.1: Valores de exposición para gases y sus respectivos niveles de seguridad asociados. Los valores se establecen en ppm, valor independiente de las variables de temperatura y presión atmosférica. [Jung-Yoo et al., 2014]

Los sensores para la detección de gases y vapores son transductores que utilizan las propiedades físicas y químicas de los gases para la obtención de una señal eléctrica medible. Los sensores para cuantificar la concentración de gases, utilizados en este proyecto pertenecen a la serie MQ, los cuales son sensores electroquímicos de tres electrodos, diseñados para determinar la presencia de distintos componentes químicos en el aire.

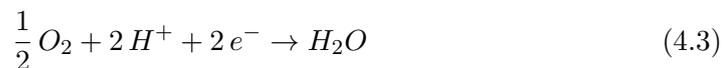
Para el diseño y construcción del subsistema de gases se consideró el acople de dos sensores de concentración de gas. El primero el MQ-7 y el segundo el MQ-136 capaces de medir el CO y H_2S respectivamente. Con rangos de medición de 10-500 PPM para el CO y de 1-200 PPM para el H_2S .

En el sensor de monóxido de carbono se llevan a cabo las siguientes reacciones químicas:

Ánodo:



Cátodo:



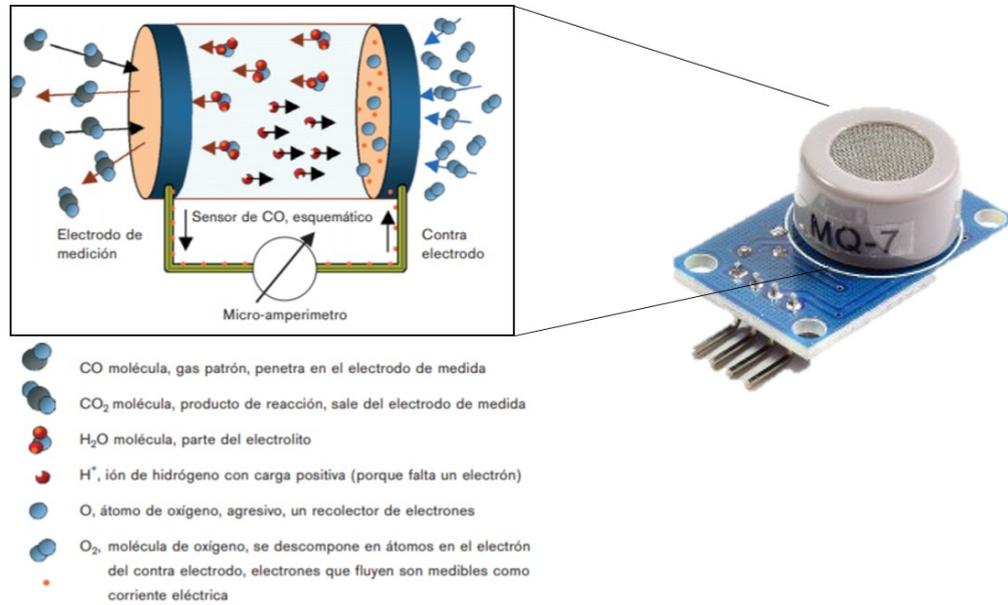
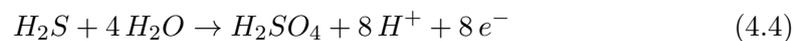


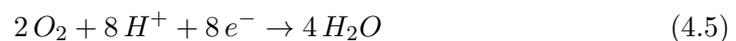
Figura 4.2: Diagrama de funcionamiento del sensor electroquímico MQ7: A la izquierda se muestra el diagrama de reacciones de oxidación-reducción que se llevan a cabo dentro del sensor. Las moléculas de monóxido de carbono (CO) pasan, a través de la membrana permeable al gas, al electrodo de trabajo donde se forman iones H^+ como consecuencia de una reacción química. Estos migran en el campo eléctrico al contraelectrodo, donde se genera un flujo de corriente en el circuito externo mediante otra reacción química desencadenada por el oxígeno (O_2) del aire puro.

Por otra parte, en el sensor de ácido sulfhídrico se llevan a cabo las siguientes reacciones químicas:

Ánodo:



Cátodo:



Como resultado de la reacción de oxidación, se obtiene una cantidad de electrones libres, los cuales generan que la resistencia incremente. Sin embargo, los sensores de gas tienen la tendencia de reaccionar a la presencia de gases múltiples. Entonces, cuando se usan estos dispositivos, el ajuste de sensibilidad es muy importante. Para ello, se siguieron las recomendaciones de la hoja de datos del producto y posteriormente se llevó a cabo una calibración más exhaustiva, la cual se describe en la Sección 5.1.

En conclusión, con una calibración adecuada, estos instrumentos son ideales para verificar los niveles de gases en interiores y comprender mejor el estado actual de la calidad del aire, pero también pueden ser utilizados al aire libre, ya que su tamaño compacto y peso ligero les permite incluirse en el diseño de instrumentos portátiles. Además, debido a su sensibilidad, la cual es mayor a la concentración promedio del aire pueden ser de utilidad para reconocer la presencia y la concentración de gases derivadas de procesos naturales, por ejemplo, gases volcánicos.

4.1.3. Posición

El sistema de posicionamiento global (Global Positioning System (GPS)) es una herramienta de navegación y posicionamiento preciso desarrollado por el departamento de defensa en 1973. Actualmente, este sistema consta de 24 satélites artificiales y sus respectivas estaciones en tierra proporcionando información para el posicionamiento en todo momento. El GPS se basa en la medición de distancias a partir de señales de radio transmitidas por los satélites artificiales (cuya órbita es conocida) hasta los receptores ubicados en los puntos cuya posición se desea determinar. Conociendo la velocidad de la señal de radio, la distancia se determina por medio del método de trilateración satelital [Casanova, 2002] .

Para determinar la posición del vehículo se utiliza el módulo GY-GPS6MV2 el cual viene con un módulo de serie U-Blox NEO 6M, el cual se ilustra en la Figura 4.4, está equipado con una pila de botón para mantener los datos de configuración en la memoria EEPROM, un indicador LED y una antena cerámica.

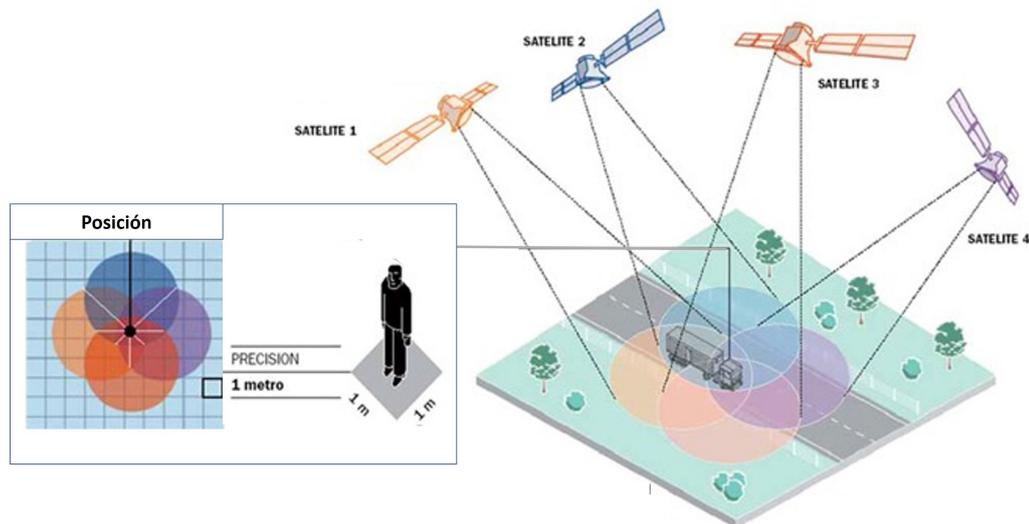
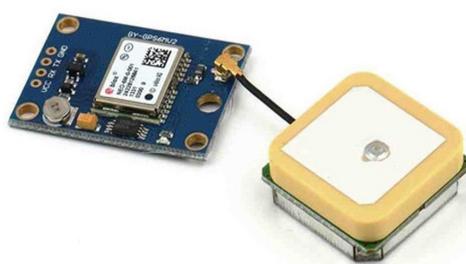


Figura 4.3: La trilateración satelital es un método matemático para determinar las posiciones relativas de objetos usando la geometría de triángulos por medio de las localizaciones conocidas de dos o más puntos de referencia, y la distancia medida entre el objeto y cada punto de referencia. Recuperada de: <https://www.esa.int>.

Los datos que se reciben en el módulo GPS siguen el protocolo National Marine Electronics Association (NMEA), las cuales son sentencias estándares.



\$GPRMC,044235.000,A,4322.0289,N,00824.5210,W,0.39,65.46,020615,,,A*44

- 044235.000 representa la hora GMT (04:42:35)
- "A" es la indicación de que el dato de posición está fijado y es correcto.
- 4322.0289 representa la longitud (43° 22.0289')
- N representa el Norte
- 00824.5210 representa la latitud (8° 24.5210')
- W representa el Oeste
- 0.39 representa la velocidad en nudos
- 65.46 representa la orientación en grados
- 020615 representa la fecha (2 de Junio del 2015)

Figura 4.4: Módulo GPS: De la trama de datos que envía el módulo GPS es posible obtener varias variables, siendo las importantes para proyectos de posicionamiento la latitud y la longitud. Referencia: <https://create.arduino.cc>.

4.2. Digitalización de variables

Uno de los elementos más importante dentro de la unidad de procesamiento es el convertidor analógico digital (ADC), el cual es un dispositivo electrónico capaz de convertir una señal analógica en digitales. Cada dispositivo establece una relación entre su entrada (señal analógica) y su salida (digital) dependiendo de su resolución, la cual esta descrita por la Ecuación 4.6

$$R = \frac{V_{ref}}{2^n} \quad (4.6)$$

Estos convertidores toman una muestra del valor actual de la señal y entregan su valor instantáneo, medido en voltios. Mediante la lectura repetida de muestras a lo largo del tiempo es posible reconstruir la señal original. La conversión consiste en la transcripción de señales analógicas en señal digital, con el propósito de facilitar su procesamiento, un ejemplo de este proceso se muestra en la Figura 4.5.

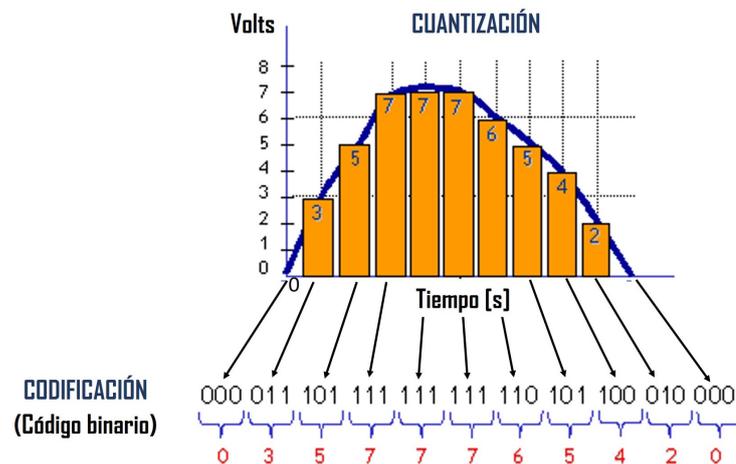


Figura 4.5: Reconstrucción digital de la señal analógica original. El objetivo de este proceso es cuantificar con bits estos valores, mediante la asignación de niveles. Referencia: <https://playground.arduino.cc>.

4.3. Transmisión de variables ambientales

A través de la historia moderna, incluso cantidades limitadas de datos han brindado perspectivas clave para encontrar soluciones inesperadas a algunos de los más grandes desafíos. Los datos tienen valor sólo cuando son comprensibles (escalados, con unidades de medición e incertidumbre), es por ello que una vez recolectados y digitalizados los datos es necesario realizar su transmisión, la cual se entiende como la transferencia de datos por un canal de comunicación (cables, comunicación inalámbrica o medios de almacenamiento).

En este punto se tiene un desafío importante al hablar de los datos, ya que se trabaja con una plataforma remota desarrollada para la exploración de distintos tipos de ambientes, por lo que un tipo de transmisión de datos no sería preciso para cubrir los requerimientos en cada uno de estos.

Como solución a este desafío, se utilizó la placa de acoplamiento o shield de sensores V5, la cual permite la unificación de los sensores mencionados en la Sección 4.1 en un circuito, con la diferencia principal que el primer arreglo de componentes conectado a una de ellas permite la transmisión de datos y el segundo arreglo permite el almacenamiento de datos. La principal ventaja de esta placa de acoplamiento es que posee una disposición de pines que facilitan la conexión ordenada de dispositivos al microcontrolador, cómo se puede observar en la Figura 4.6. Por ello es una herramienta que brinda una amplia gama de posibilidades al momento de agregar dispositivos de recopilación, envío o almacenamiento de datos.

Una decisión importante del proyecto es la de separar los tipos de transmisión de datos (envío y almacenamiento), ya que esto permite que el microcontrolador realice las tareas programadas de manera más rápida y eficiente. Lo anterior es debido a que, al separar las funciones de transmisión de datos en dos microcontroladores, se reduce el tiempo de procesamiento para cada uno de estos. Además, permite reducir el peso dependiendo del ambiente que se va a explorar, al discernir qué tipo de transmisión es más apta para cada uno de ellos, es decir:

- **Ambientes interiores:** En este tipo de ambientes resulta ineficiente el envío de datos debido a la atenuación a la que se enfrenta la señal de radio a causa de la estructura dentro de la que se encuentra el sistema de sensado. Sin embargo, en estos casos es de gran utilidad el almacenamiento de los datos en módulos portables.
- **Ambientes exteriores:** Por el contrario, en este tipo de ambiente resulta eficiente el envío de datos y su almacenamiento directo en la estación de recepción.

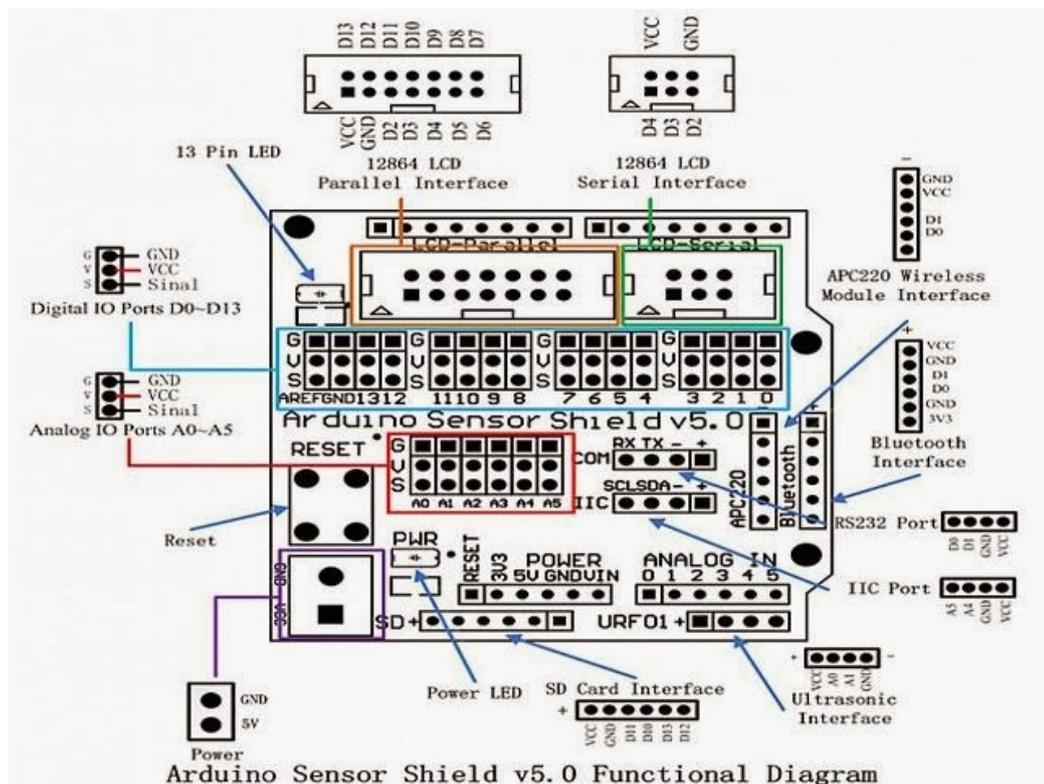


Figura 4.6: Diagrama de conexión de Shield de sensores V5. En azul se muestra los puertos digitales y en rojo los puertos analógicos, con sus correspondientes salidas de alimentación; GND en la parte superior, voltaje en medio y señal en la parte inferior. Referencia: <https://forum.arduino.cc>.

4.3.1. Transmisión inalámbrica de datos

La transmisión de datos es la transferencia por un canal de comunicación punto a punto o punto a multipunto mediante señales eléctricas [Briceño, 2005].

Arduino es capaz de recoger datos, tratarlos en tiempo real y transmitirlos hacia un sitio remoto donde se almacenen. La transmisión de información se puede realizar al utilizar módulos inalámbricos XBee, que son pequeños módulos que transmiten y reciben datos usando señales de radio, los cuales brindan un medio inalámbrico para la interconexión y comunicación entre dispositivos, además de estar diseñados para aplicaciones que requieren de un alto tráfico de datos.

Se entiende por comunicaciones inalámbricas aquellas comunicaciones entre dispositivos o entre personas que intercambian información utilizando el espectro electromagnético [Prieto, 2012]. Una de las principales ventajas de esta tecnología es la movilidad, ya que no es necesario un cable. El hecho de que el punto de entrada en la red de comunicaciones no esté ligado a una ubicación fija favorece su expansión. Según el alcance se pueden establecer tres grandes grupos de comunicaciones inalámbricas:

- **Wireless Personal Area Network (WPAN)** Presentan una importante limitación de alcance: los dispositivos que pretenden comunicarse han de estar separados por distancias cortas (Bluetooth, DECT, Zigbee, etc).
- **Wireless Local Area Network (WLAN)** Es una red de cobertura geográfica limitada, velocidad de transmisión relativamente alta, bajo nivel de errores y administrada de manera privada, que se comunica básicamente mediante microondas (XBee: IEEE 802.11, HiperRLAN, etc).
- **Wireless Metropolitan Area Network (WMAN)** Permiten la conexión de redes y usuarios de zonas geográficamente distantes (satélite, radioenlace, etc).

El módulo utilizado en este proyecto, el Xbee Pro, presenta una potencia de salida de 10 mW, lo cual le permite operar hasta 1.6 km en espacios abiertos, y hasta 120 m en espacios urbanos, lo cual lo ubica dentro de las redes de tipo WLAN. Con respecto a su conexión, estos módulos de radio pueden ser usados con un número mínimo de conexiones: Power 3.3V (no son tolerantes a 5V, a menos que se utilice una shield especial), GND y TX/RX.

Los módulos XBee son altamente configurables y soportan múltiples protocolos para configurarlos, tanto en un enlace punto a punto como en un diseño complejo con muchos dispositivos en una red. Esta última, formada básicamente por tres tipos de elementos [Faludi, 2011]:

- **Coordinador:** Es el responsable de establecer el canal de comunicaciones y el identificador para toda la red (permitiendo que se unan otros dispositivos). Una vez formada la red, el coordinador, participa en el enrutador de paquetes y es origen y/o destinatario de información.
- **Router:** Es un dispositivo que permite la interconexión de otros dispositivos en red y permite determinar la mejor ruta para enviar un paquete de información.
- **End point (dispositivo final):** No puede enviar información directamente a otro dispositivo final. Normalmente estos equipos van alimentados a baterías. El consumo es menor al no tener que realizar funciones de enrutamiento.

Configuración

Para configurar y usar los módulos XBee es necesario utilizar el programa XBee Configuration and Test Utility (XCTU) el cual permite interactuar con los módulos mediante una interfaz multiplataforma. Esta aplicación incluye herramientas para configurar, inicializar, actualizar y probar los módulos XBee, como se puede apreciar en la Figura 4.7.

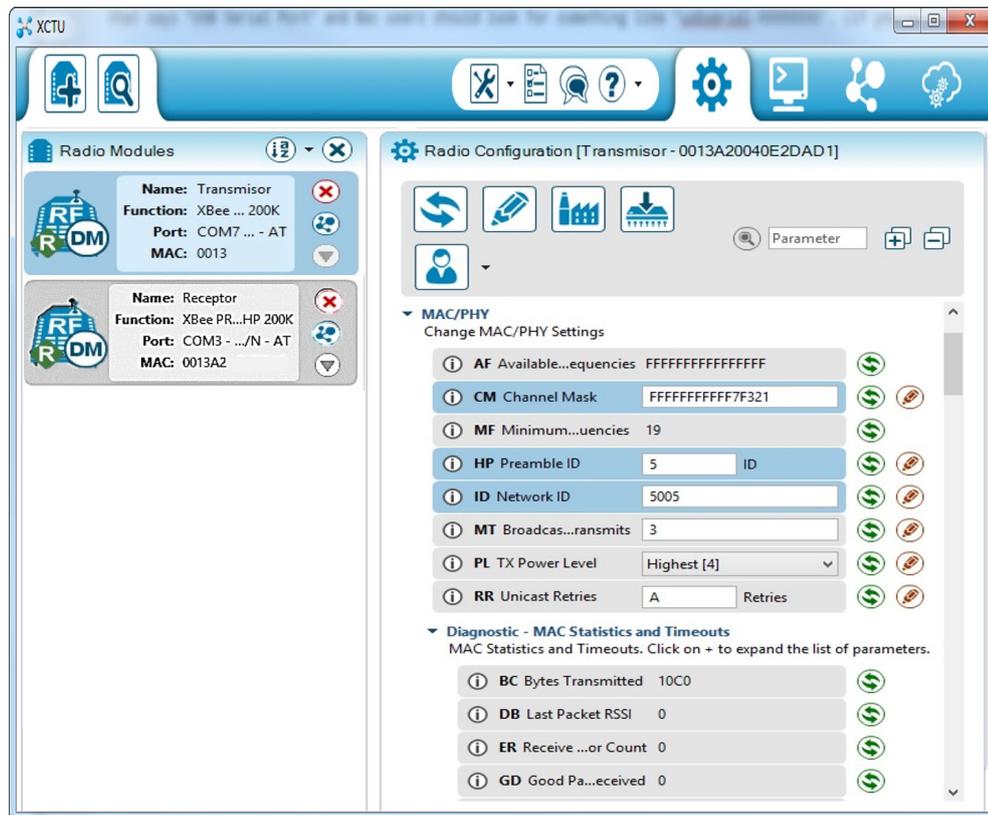


Figura 4.7: Interfaz XCTU. A la izquierda se muestran los dispositivos conectados al puerto serie. A la derecha se observa el menú de ajustes y configuraciones disponibles para cada dispositivo.

Los dispositivos XBee pueden usar su conexión serie local de maneras diferentes. El modo de operación establece la manera de comunicarse con el módulo XBee a través de la interfaz en serie. Los módulos XBee admiten dos modos de funcionamiento diferentes:

- **Application transparent (AT):** Este modo se llama transparente porque la radio transmite la información tan bien como la recibe. Todos los datos en serie recibidos por el módulo de radio se conectan de forma inalámbrica a un módulo XBee de destino remoto. Cuando el otro módulo recibe los datos, se envía a través del puerto serie.
- **Application programming interface (API):** En el modo API, los datos se comunican en paquetes. Este modo permite realizar conexiones más complejas para realizar tareas tales como recopilar datos de múltiples ubicaciones o controlar dispositivos de forma remota.

El modo de transmisión utilizado en este proyecto es el AT, debido a su simplicidad, el cual permite recibir datos inalámbricos, a través de la interfaz serial exactamente en el momento en que se reciben. La Tabla 4.2 documenta la configuración de los dispositivos XBee-Pro S3B de este proyecto. Los parámetros restantes conservaron los valores predefinidos en XCTU.

Parámetro	XBee A	XBee B
ID	1234	1234
CE	Standar Router[0]	Standar Router[0]
SH (valor por defecto)	13A200	13A200
SL (valor por defecto)	40E2XXXX	40D6XXXX
DH	13A200	13A200
DL	40D6XXXX	40E2XXXX
NI	Transmisor	Receptor
BD	[6] - 57600	[6] - 57600

Tabla 4.2: Resumen de la configuración de los parámetros seleccionados en los módulos XBee-PRO S3B para su funcionamiento en modo AT.

En particular, la dirección debe programarse en dos parámetros: Dirección de destino alta (Destination Address High (DH)) y dirección de destino baja (Destination Address Low (DL)), como se muestra en la Figura 4.8. Esto establece una banda de comunicación única, evitando ruido en la señal, ambas enviarán los datos sensados. Estos dispositivos, únicamente recibirán y transmitirán datos a otros XBee dentro de la misma red (mismo ID). Para describir a mayor detalle los parámetros configurados de estos módulos se incluye la información del Apéndice B.



Figura 4.8: Configuración modo AT: Para que los módulos A y B se comuniquen, se debe configurar la dirección de destino (DH + DL) de XBee A como la dirección MAC (SH + SL) de XBee B, y viceversa.

Un módulo XBee puede funcionar como un módulo independiente mandando datos al nodo central o dispositivos conectados a los puertos del módulo o conectado a un microcontrolador o PC. En el caso de Arduino, este manda a través del puerto serie datos al módulo XBee para que sean transmitidos. En la Figura 4.9 se muestran las conexiones de los componentes que forman parte del arreglo de sensores que se encargan de enviar los datos hacia la interfaz gráfica.

Programación

Con respecto a la programación en el microcontrolador, se utiliza la librería `< SoftwareSerial.h >`, la cual se ha desarrollado para permitir la comunicación serial en otros pines digitales del Arduino, utilizando software para replicar la funcionalidad de las líneas RX y TX cableadas. Es posible tener múltiples puertos seriales de software con velocidades de hasta 115200 bps. Las funciones principales de esta librería son las siguientes:

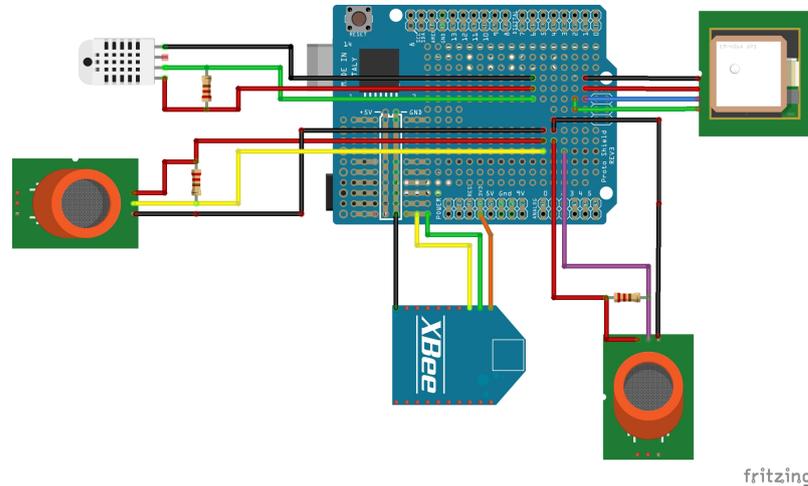


Figura 4.9: Diagrama de conexiones de sensores (DHT22, MQ7 y MQ136), módulo SD y módulo GPS. Indicadas en rojo y negro se encuentran las líneas de alimentación de los componentes.

- **Serial.begin():** Establece la rapidez de datos en bits por segundo (baudios) para la transmisión de datos en serie. Para comunicarse con la computadora, se utilizan una de estas velocidades: 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 14400, 19200, 28800, 38400, 57600 o 115200.
- **Serial.available():** Determina la cantidad de bytes (caracteres) disponibles para leer desde el puerto serie. Se trata de datos que ya han llegado y se han almacenado en el búfer de recepción en serie (que contiene 64 bytes).
- **Serial.write():** Escribe datos binarios en el puerto serie. Esta información se envía como un byte o serie de bytes; para enviar los caracteres que representan los dígitos de un número, se utiliza la función `print()`.
- **Serial.read():** Lee los datos del puerto serie entrantes.

Por medio de estas funciones es posible desarrollar un programa capaz de transmitir los datos de los sensores por medio de los módulos XBee, como el que se ilustra por medio del diagrama de flujo de la Figura 4.10.

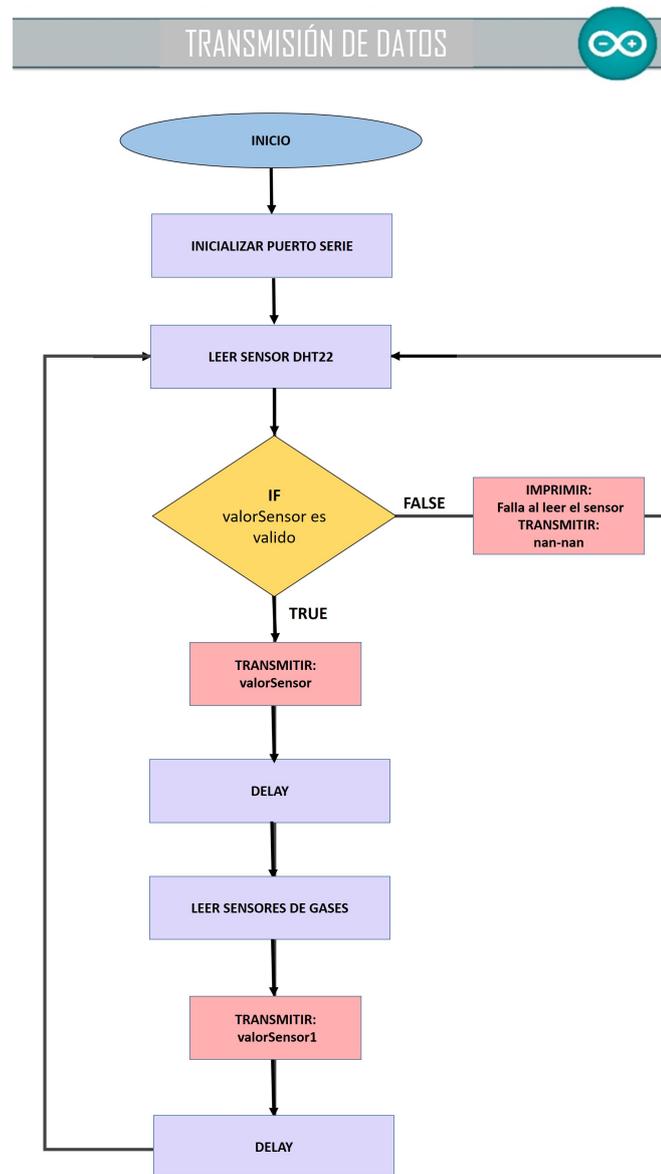


Figura 4.10: Diagrama de flujo para transmisión de datos: Se lee inicialmente el valor del sensor DHT22 y por medio de su comprobación de valores se determina si se transmite el dato obtenido o si se debe repetir la medición. Posteriormente se lee el valor de los sensores de gas (MQ7 y MQ136) y se transmite el valor obtenido.

Para esto, los dos módulos XBees ya se encuentran configurados de manera compatible, uno conectado a la computadora y otro conectado al shield de sensores V5 y al Arduino ubicados en el vehículo. Por otra parte, se utilizará la librería TinyGPS, la cual permite analizar los flujos de datos NMEA proporcionados por los módulos GPS. Esta biblioteca ofrece métodos compactos para extraer la posición, fecha, hora, altitud, velocidad y rumbo de los dispositivos GPS. Finalmente, para leer el sensor DHT22 se utilizó la librería `< DHT.h >`, esta permite obtener los valores de temperatura y humedad de los sensores de este tipo .

4.3.2. Información visual

Las imágenes y videos brindan la capacidad para detectar y reconocer la información visual relevante del entorno explorado. Por ejemplo, por medio de las imágenes enviadas por el Rover Curiosity es posible distinguir detalles importantes para la ciencia, como estratos geológicos claramente diferenciados y dunas sobre la superficie marciana.

Para proporcionar la información visual del sitio remoto hacia el operador, en este proyecto, se instaló una cámara con Internet Protocol (IP) montada sobre la parte posterior del robot móvil. Las cámaras IP son videocámaras especialmente diseñadas para enviar las señales a través de internet desde un explorador en una WLAN. Básicamente una cámara IP se compone de los siguientes elementos:

- **Cámara tradicional**
- **Sistema de compresión de imagen:** Se encarga de comprimir las imágenes a los formatos adecuados.
- **Sistema de procesamiento:** Este se encarga de la gestión de las imágenes y del envío al modem.

Considerando que fuera de peso y tamaño limitados para no agregar carga extra que pueda afectar al desplazamiento del vehículo, se reutilizó un dispositivo Android que va a ejercer de cámara, el cual requiere del software apropiado para funcionar como una cámara IP. Para esto, se instaló la aplicación *IPWebcam* que permite utilizar la cámara de un dispositivo Android conectado mediante WiFi a una red local. La opción iniciar servidor, inicia la transmisión de vídeo a través de la red local y una vez iniciada esta opción, se mostrará en la parte inferior de la pantalla, la dirección completa (IPv4: `http://XXX.XXX.X.XX:XXXX/`), la cual es de suma importancia para el proyecto, ya que esta dirección sustituye el directorio de la imagen a desplegar en la interfaz gráfica, que se abordará en la sección 4.5. Este proceso se puede ilustrar a partir del diagrama de flujo de la Figura 4.11

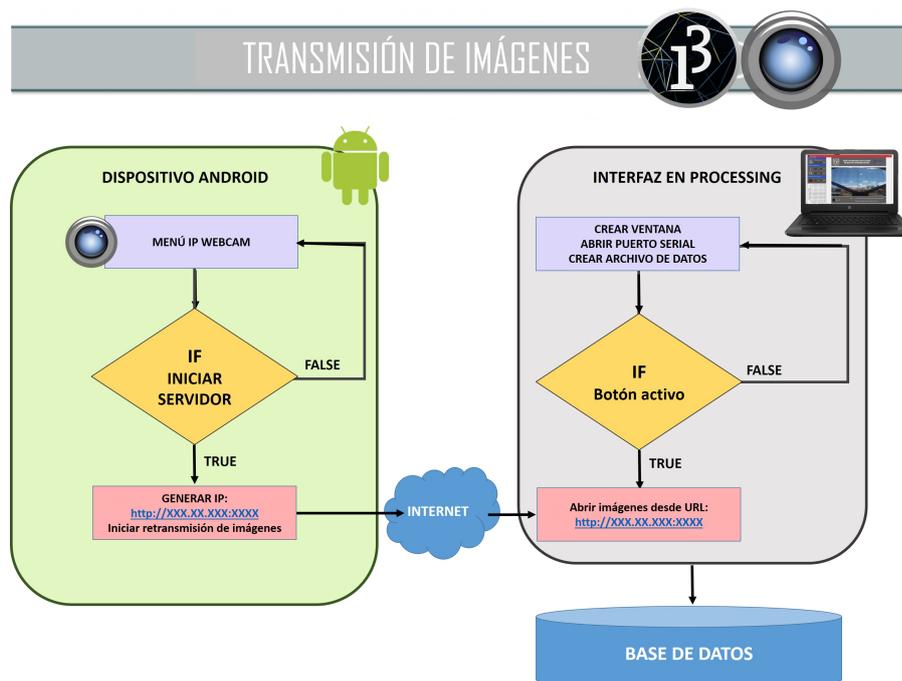


Figura 4.11: Transmisión de imágenes entre la aplicación *IPWebcam* y la interfaz gráfica: A la izquierda se muestra el diagrama de flujo de la aplicación en el dispositivo Android y a la derecha se observa la sección del diagrama de flujo que sigue la interfaz para mostrar y almacenar las imágenes en una PC.

4.4. Almacenamiento de datos

Por otra parte, los datos obtenidos por los sensores pueden ser almacenados en diferentes soportes de hardware. El Shield V5 puede equipar al Arduino con la capacidad de almacenamiento al conectar un módulo de memoria SD. La comunicación entre el microcontrolador y la tarjeta SD utiliza la comunicación Serial Peripheral Interface (SPI), la cual se utiliza para conectar dispositivos periféricos al ordenador, utilizando una configuración maestro-esclavo.

La comunicación con la tarjeta SD se realiza mediante el envío de comandos y la recepción de respuestas. Un comando de tarjeta SD válido consta de 48 bits, como se muestra en la Figura 4.12. Los dos bits a la izquierda son los bits de inicio que se establecen en 01. Les sigue un número de comando de 6 bits y un argumento de 32 bits donde información adicional puede ser proporcionada. A continuación, hay 7 bits que contienen una verificación de código por redundancia cíclica, seguido de un solo bit de parada [Ababei, 2013].

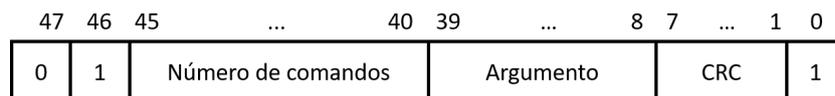


Figura 4.12: Formato del comando de 48 bits para una tarjeta SD.

El circuito maestro y el esclavo están vinculados por tres líneas de señal: Serial Clock (SCK), Master-In Slave-Out (MISO) y Master-Out Slave-In (MOSI). Una cuarta señal adicional, Slave Select (SS), se utiliza para sincronizar el inicio del paquete o el límite de bytes y para facilitar el trabajo con múltiples dispositivos esclavos simultáneamente. En Arduino, el SPI tiene lugar en los puertos digitales 11, 12 y 13. Para objetivos del proyecto, se utiliza el módulo de SD, el cual cuenta con un conector para las memorias SD de tamaño estándar.

Sin embargo, se considera importante almacenar no solo los valores de los sensores sino también el tiempo en el que fueron medidos. Para obtener esta información se hace uso de un reloj de tiempo real (Real Time Clock (RTC)), que es un dispositivo electrónico que permite obtener mediciones de tiempo en las unidades temporales que empleamos de forma cotidiana. Tienen la ventaja de reducir el consumo de energía, aportar mayor precisión y liberar a Arduino de tener que realizar la contabilización del tiempo. Además, incorporan una batería tipo botón que permite mantener el valor del tiempo en caso de pérdida de alimentación.

En la Figura 4.13 se muestran las conexiones de los componentes que forman parte del arreglo de sensores que se encargan de almacenar los datos, incluyendo el módulo de SD y el reloj DS3231.

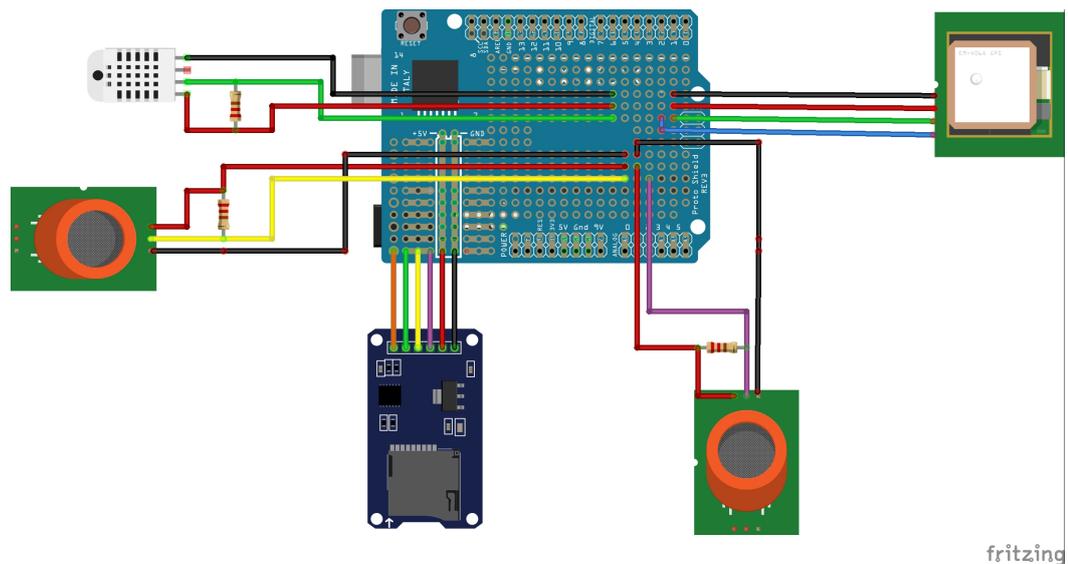


Figura 4.13: Conexiones de sensores (DHT22, MQ7 y MQ136), módulo SD y módulo GPS. Indicadas en rojo y negro se encuentran las líneas de alimentación de los componentes.

Programación

Referente la programación de este módulo, Arduino tiene una librería diseñada para el uso de estos dispositivos, cuyo nombre es `< SD.h >`. Las principales funciones utilizadas para el desarrollo de esta sección fueron:

- **SD.begin(cspin):** Inicializa la librería SD y la tarjeta, como parámetro se le indica el puerto CS al que está conectado el módulo.
- **SD.open(filepath, mode):** Abre el archivo especificado. Si el archivo no existe, se creará un archivo con el nombre especificado. Se puede abrir un archivo en modo lectura (si mode es `FILE_READ`) o como lectura y escritura (si mode es `FILE_WRITE`).

Además, se utilizan dos funciones secundarias de la librería, `file.write(data)` y `file.close()`; que permiten escribir un byte en el archivo y cerrarlo guardando los datos en la SD, respectivamente. Haciendo uso de estas funciones, es posible programar un código que sea capaz de guardar la información de las variables y el tiempo en el que estas fueron medidas en una memoria SD, el cual se encuentra ilustrado en el diagrama de flujo de la Figura 4.14.

En las secciones anteriores, se describieron los códigos del microcontrolador de una manera muy genérica para dar al lector una idea conceptual de la programación realizada en este proyecto, de manera que se entienda cómo están programados los sensores y la transmisión o almacenamiento de los datos. En este punto, es importante mencionar que la programación, en los aspectos elementales (definición de variables y funciones para obtención de datos en sensores), es similar para ambos modos, lo que es útil, ya que se pueden reutilizar partes del código. Para no extenderse en este apartado, se han escrito comentarios en cada sección de los códigos (para un mejor entendimiento del mismo), los cuales están disponibles en el Apéndice C.

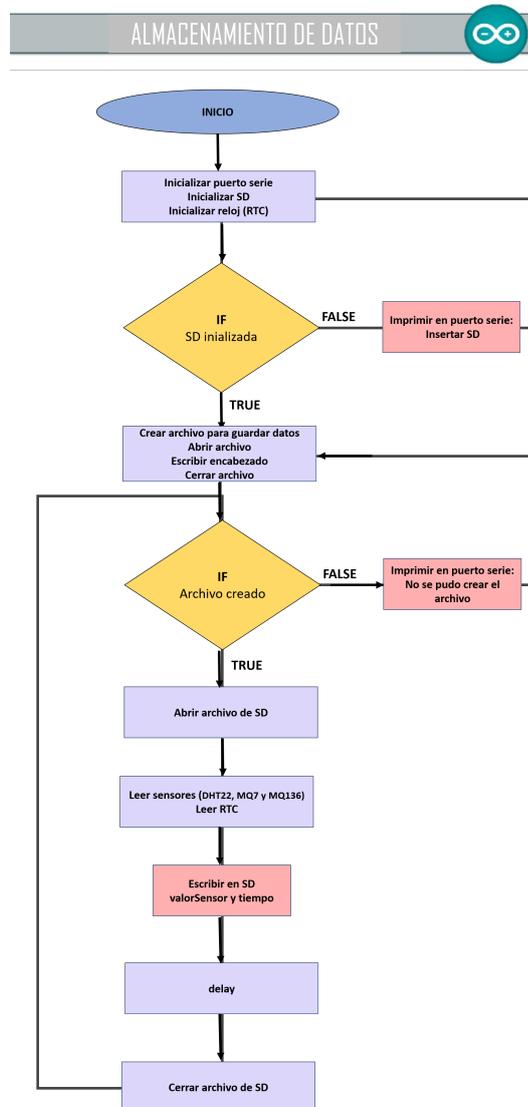


Figura 4.14: Diagrama de flujo para almacenamiento de datos en una memoria SD: Se inicia creando y abriendo un archivo en la memoria SD. Posteriormente se obtienen los datos de los sensores, con su correspondiente comprobación de valores y la lectura del RTC. Se procede a escribir los valores correspondientes si estos son válidos y finalmente a cerrar el archivo.

4.5. Despliegue de variables

La estación de control suministra una ubicación centralizada para activar, controlar y supervisar todos los dispositivos del sistema. Se compone principalmente por el operador, el radio control y una computadora donde se visualizan los datos obtenidos por los sensores y el video en tiempo real por medio de una interfaz gráfica.

Las interfaces cumplen un papel fundamental dentro del desarrollo de robots móviles, debido a que estas son el contacto entre el operador y el vehículo. Se dividen principalmente en tres categorías:

- **Directas:** permite controlar el vehículo por medio de controladores de mano o aplicaciones en computadora. La retroalimentación visual es por medio de cámaras montadas en el sitio remoto, de esta manera el teleoperador puede controlar en tiempo real. La desventaja principal es que aun con la tecnología actual, existen retrasos en la transmisión de datos y por tanto errores al operar.
- **Multisensorial:** toma información de varios sensores y la combinan en un gráfico, integrando y organizando todos los datos obtenidos. Permite al operador controlar diversos actuadores con retroalimentación gráfica y visual.
- **Interfaz para control supervisado:** utiliza dispositivos con motores para crear las fuerzas de retorno en la mano del usuario para simular el tacto y la interacción con objetos virtuales.

Las dos acciones principales que se realizarán en paralelo en este proyecto son: (1) el control del vehículo y (2) el muestreo de datos.

Por una parte, la interfaz directa para controlar robots de forma remota resulta práctica en este proyecto, esta es aplicada en el movimiento del vehículo para situar al robot en la posición adecuada y llevar a cabo una tarea específica. Además, permite monitorear el estado del sistema de movimiento en todo momento.

Por otra parte, es necesario que el usuario tenga una retroalimentación visual del ambiente explorado en tiempo real, por lo que es útil implementar una interfaz multisensorial, que además de una supervisión visual permitirá conocer por medio de diversos sensores las condiciones (temperatura, humedad, contenido de gases) del sitio.

Existen numerosas herramientas gráficas y lenguajes de programación que permiten crear interfaces para el despliegue de los datos adquiridos. En este proyecto, se utiliza el software Processing, el cual es un entorno de desarrollo multiplataforma (Mac OS, Linux, Windows etc) de código abierto basado en Java. Como software, consiste en un editor de texto, un área de mensaje, una barra de herramientas con botones y una barra de menú. En la Figura 4.15 se pueden distinguir las secciones más importantes que conforman un código en Processing.

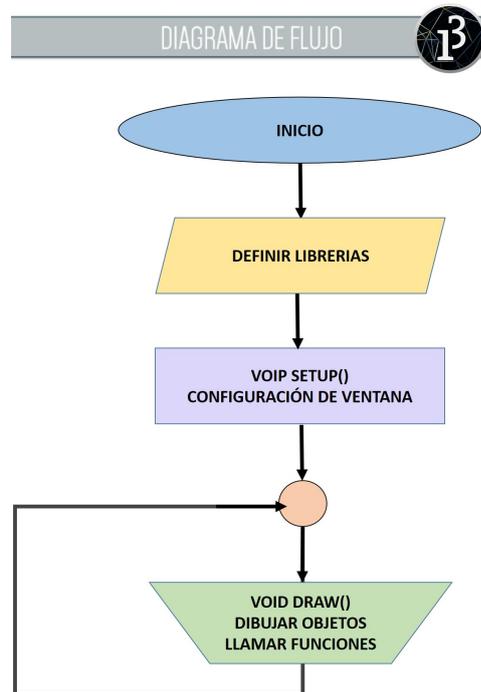


Figura 4.15: Diagrama de flujo de código en Processing donde se muestran sus principales funciones: void setup y void loop.

La interfaz desarrollada para este proyecto es el sistema local que almacenará los datos proporcionados por las estaciones de sensado remoto y las imágenes obtenidas por la cámara, además brindará al administrador información en tiempo real sobre la misión.

Como se puede observar en la Figura 4.16, en la sección superior izquierda se visualiza la fecha y hora de la misión, en la parte inferior a esta sección se despliegan los datos obtenidos por los sensores, haciendo énfasis en la visualización de la concentración de H_2S por medio de una gráfica, ya que este gas es inflamable, incoloro, tóxico y un indicador importante de actividad volcánica. Por otra parte, en la parte inferior central se encuentra el único botón de la interfaz, el cual permite activar o desactivar la visualización de la cámara IP, diseñado así para dar flexibilidad en el uso de este dispositivo en cada misión.

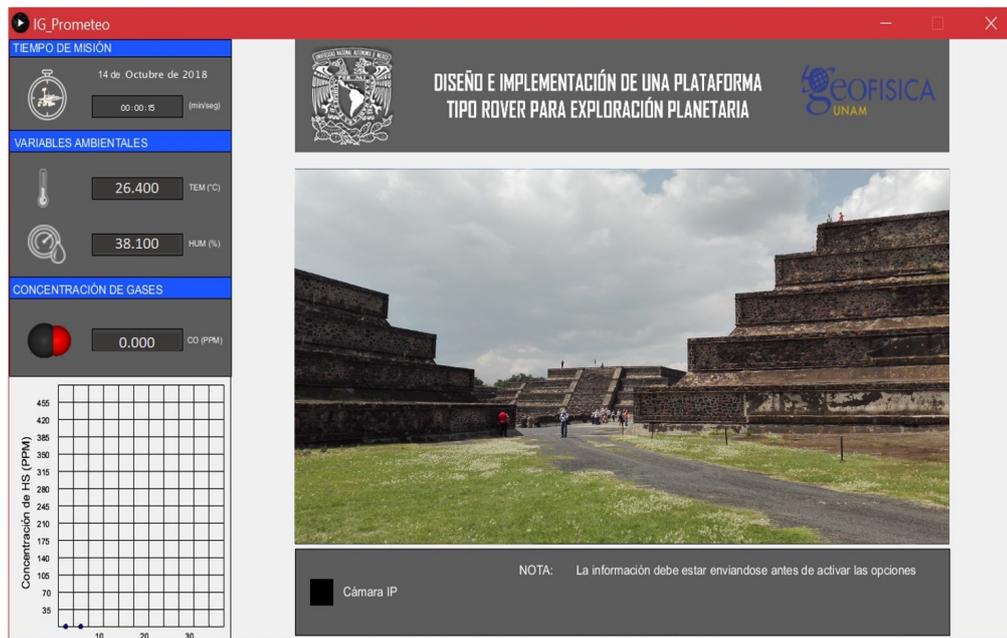


Figura 4.16: Interfaz gráfica del proyecto. Panel izquierdo: Muestra las variables obtenidas por los sensores y el tiempo de la misión (fecha y hora). Panel central: Despliegue de imágenes de la cámara IP. Panel inferior: Contiene indicaciones y un botón para activar el despliegue de imágenes.

Programación

Con respecto a la programación, se pueden distinguir tres bloques importantes que definen las acciones que realizará la interfaz, dos de estos bloques son determinados por las condiciones establecidas por el usuario y por la transmisión de datos, el tercer bloque es independiente a estas y define las características generales de la interfaz.

- **Primer bloque (cámara):** Este bloque es el responsable de abrir las imágenes de la cámara IP. Por medio de la función `loadImage()`, puede cargarse una imagen de la computadora local o desde una URL. La función escrita en el programa es análoga a la siguiente `loadImage("http://XXX.XXX.X.XX:XXX/shot.jpg"), x, y, width, high)`, en donde se indica al inicio la IP, después el formato de imagen y al final la posición y tamaño de la imagen en la interfaz. Este bloque se activará solo si el botón de cámara está activado. Si el archivo no está disponible, se imprimirá un mensaje de error en la consola, el cual puede detener el programa. Es por ello que la aplicación debe estar activa en el dispositivo, antes de activar el botón de la cámara en la interfaz.
- **Segundo bloque (sensores):** Este bloque es el encargado del despliegue de los datos de los sensores y está condicionado por la información recibida en el puerto serial. Esto es posible por medio de la librería `processing.serial`, la cual lee y escribe datos hacia y desde dispositivos externos de un byte a la vez. Por medio de la función `Serial.available()`, se determina el inicio de este bloque, es decir, solo se muestra esta sección de la interfaz en caso de que los datos se estén recibiendo en el puerto serial.
- **Tercer bloque (características generales):** Determina las características esenciales como el color de fondo y el tamaño de la ventana. Estas indicaciones se encuentran fuera de las condicionales anteriores, por lo que se mostrarán independientemente de si las otras están o no en funcionamiento. Un ejemplo importante de las funciones independientes es la de presionar la tecla `esc`, esta acción permite finalizar el programa y guardar los datos recibidos por el puerto serie.

Entonces, a partir de los tres bloques anteriores se logra una interfaz sencilla, con información fácilmente localizable y flexible en el sentido de que es capaz desplegar secciones de datos aunque otras no estén habilitadas, cuyo diagrama de flujo se muestra en la Figura 4.17.

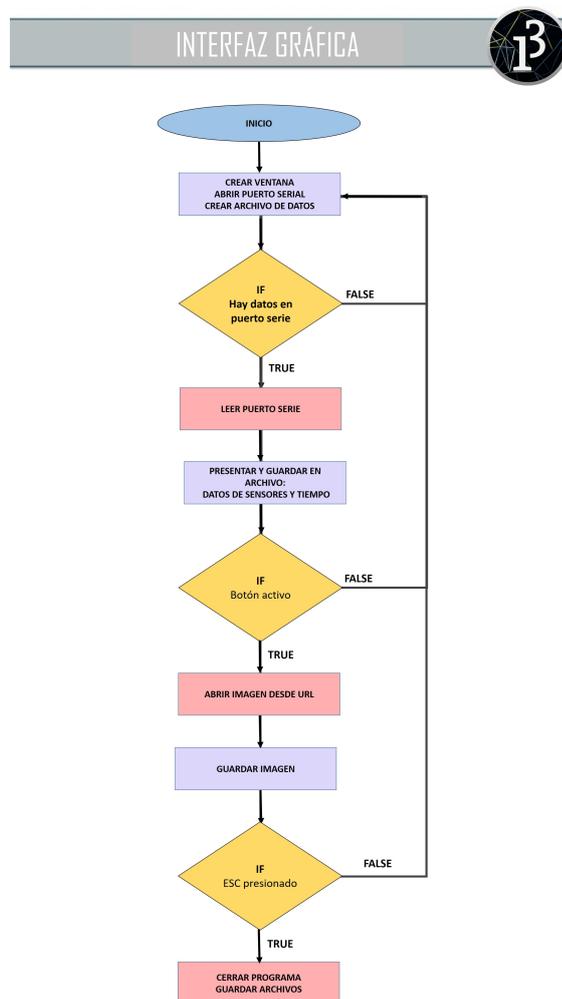


Figura 4.17: Diagrama de flujo de la interfaz en Processing: Se inicia creando la ventana, abriendo el puerto serial y creando el archivo donde se guardarán los datos. Posteriormente, si hay datos en el puerto serial, se presentan en la sección de datos y se guardan en el archivo de texto.

CAPÍTULO 5

Pruebas y resultados

Contenido

5.1. Calibración de sensores	90
5.1.1. Calibración de sensor de CO	90
5.1.2. Calibración del sensor de H_2S	93
5.2. Pruebas de rendimiento de los sistemas	95
5.2.1. Sistemas de alimentación	95
5.2.2. Pruebas de rendimiento del vehículo	96
5.2.3. Calibración del bloque autónomo	100
5.3. Adquisición de datos en campo	102
5.3.1. Prueba de alcance de telemetría	106

En este capítulo se presentan los experimentos de los comportamientos básicos del robot, así como de los comportamientos compuestos, todos ellos realizados de manera independiente, que incluyen las pruebas mecánicas (autonomía y rendimiento del robot). Además, se describen los resultados alcanzados en la implementación de la plataforma móvil en campo y la calibración de los sensores de gas.

5.1. Calibración de sensores

5.1.1. Calibración de sensor de CO

La calibración del sensor de CO, se realizó en el Laboratorio de Innovación y Evaluación en Estufas de Biomasa (LINEB) perteneciente al Instituto de investigaciones en ecosistemas y sustentabilidad, el cual es un espacio para el desarrollo de pruebas y estudios para la cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero. Tiene como objetivo principal la evaluación, certificación y estudio de estufas eficientes de la zona México-Centroamericana. El LINEB cuenta con equipo, protocolos, medidas de seguridad y pruebas estandarizados a nivel mundial, dentro de estos cuenta con dispositivos de cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero en tiempo real, eficiencia energética y ahorro de combustible; por lo cual permite obtener resultados en mitigación de gases, combustión eficiente, con lo que se accede a evaluaciones y resultados reales que avalan a la estufa como eficiente en el desempeño de su tarea.



Figura 5.1: Calibración estándar de sensor MQ7: El sensor se colocó a la salida del ducto de emisiones de la estufa en prueba.

Por otra parte, ya que la señal de salida de voltaje del sensor MQ7 aumenta a medida que aumenta el nivel de concentración de CO, se implementó un método basado en la estimación de mínimos cuadrados para su calibración. Primero se utilizó un conjunto de datos de medición obtenidos utilizando tanto el sensor Portable Emissions Monitoring System (PEMS) #2022 del LINEB (permite cuantificar emisiones en tiempo real de monóxido y dióxido de carbono durante la combustión) como el sensor MQ7. Como se puede observar en la Figura 5.2, el sensor MQ7 es capaz de percibir la presencia del gas y presenta un comportamiento similar al sensor de gases del LINEB.

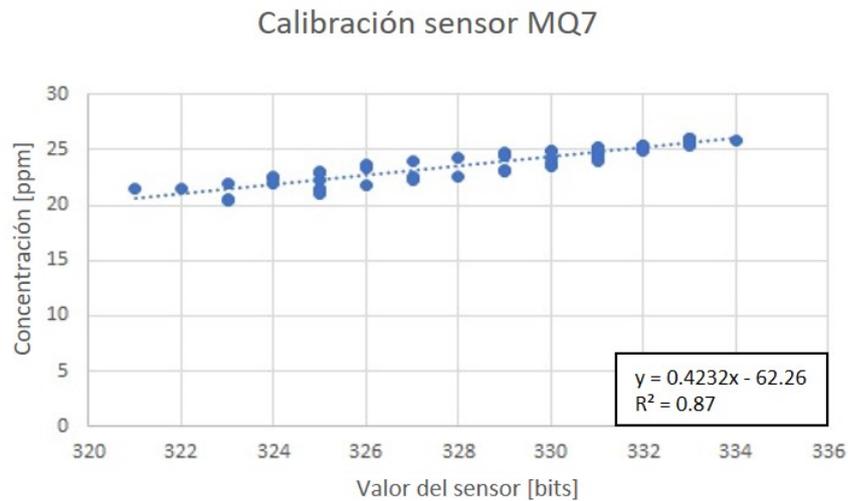


Figura 5.2: Comparación de sensores de CO: Los datos graficados corresponden al rango de 20-30 ppm donde los datos de ambos sensores presentaban una respuesta similar. Los datos fueron obtenidos por ambos sensores en los mismos experimentos.

De la comparación de datos, se obtuvo la siguiente relación para determinar la concentración de monóxido de carbono a partir del sensor MQ7, con un error cuadrático de $R^2 = 0.87$:

$$y = 0.4232x - 62.26 \quad (5.1)$$

Luego, para probar la utilidad del modelo de conversión derivado, se aplicó la relación derivada a un segundo conjunto de datos de medición obtenidos por ambos sensores en los mismos experimentos.

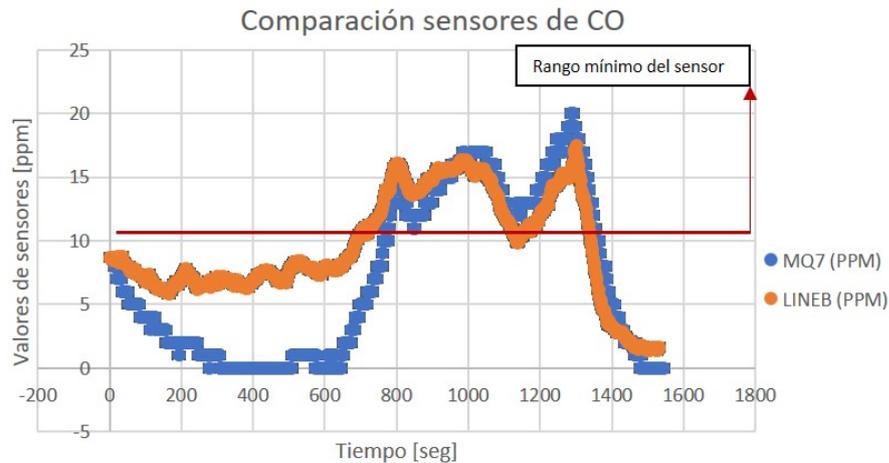


Figura 5.3: Los datos representados en el gráfico muestran la concentración de CO medidas por ambos sensores, llegando a su punto máximo en 20 ppm.

Los resultados de la comparación se muestran en la Figura 5.3, en esta se puede observar que los valores de ambos sistemas siguen de manera aproximada la misma tendencia, con un error relativo del 5% en el rango de 10 – 20 ppm. Por otra parte, se observa que los valores que no se ajustan, se encuentran fuera del rango mínimo del sensor MQ7 (< 10 ppm). Sin embargo, se sugiere aumentar el número de pruebas para llegar a un procedimiento de calibración más preciso.

5.1.2. Calibración del sensor de H_2S

La calibración del sensor de H_2S , se realizó en el Instituto de Ingeniería, UNAM en la división de ingeniería ambiental, el cual es un espacio encargado del tratamiento biotecnológico de biogás y gases contaminantes. Para la calibración del sensor MQ136 se llenaron bolsas Tedlar con una mezcla gaseosa (30 % CO_2 , 0.504 % H_2SO_4 y CH_4), posteriormente se midió la concentración con el sensor BIOGAS 5000 de LANDTEC y después se hicieron diluciones (0, 54, 97, 161 y 253 ppm) repitiendo las lecturas con ambos sensores.

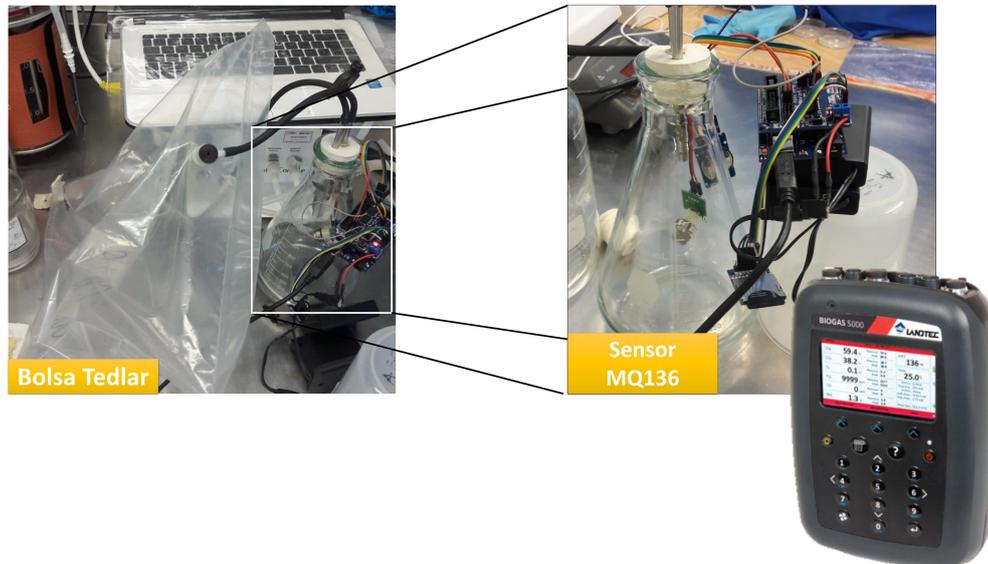


Figura 5.4: Calibración estándar de sensor MQ136: El sensor se colocó en un ambiente aislado (dentro de un matraz), en el cual se inyectó el gas en distintas concentraciones, extraído de las bolsas Tedlar por medio de una bomba extractora.

Después, se aplicó el mismo método de mínimos cuadrados, con la cual se obtuvo la siguiente ecuación, con una $R^2 = 0.9594$.

$$y = 135.25 \ln(x) - 587.6 \quad (5.2)$$

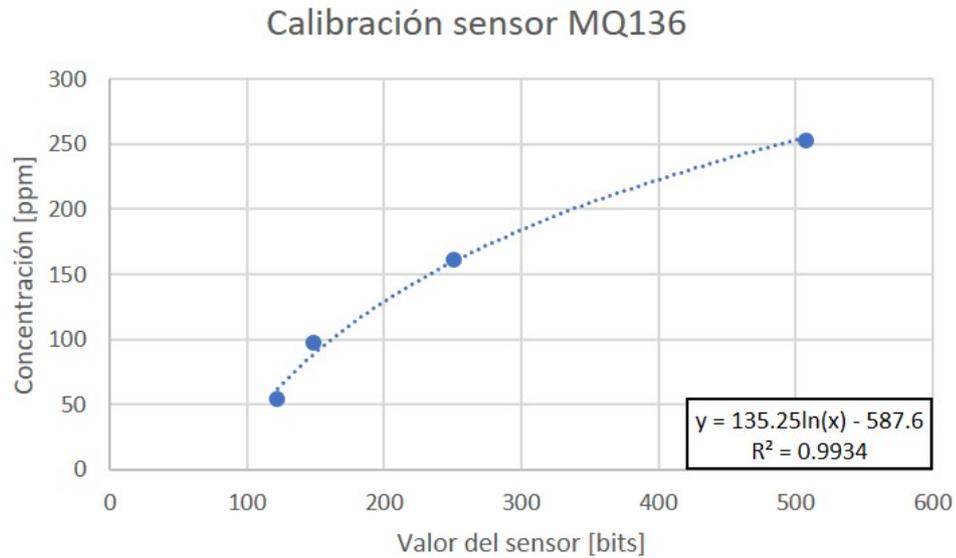


Figura 5.5: Comparación de sensores de H_2S : Los datos representados en el gráfico muestran la concentración de H_2S medidas por ambos sensores, llegando a su punto máximo en 200 ppm.

Para probar la utilidad del modelo obtenido, se aplicó la relación obtenida a un segundo conjunto de datos de medición obtenidos por ambos sensores en los mismos experimentos. Los resultados de la comparación se muestran en la Figura 5.5, en esta se puede observar que los valores de ambos sistemas siguen de manera aproximada la misma tendencia dentro del rango 50 – 250 ppm.

La Tabla 5.1 resume los rangos dinámicos y la resolución que se puede alcanzar con cada uno de los sensores después de la calibración realizada en laboratorio. Estas variables son importantes, ya que el rango dinámico indica el rango de funcionamiento óptimo del sensor y la resolución indica la mínima variación de la magnitud medida que da lugar a una variación perceptible de la indicación del correspondiente valor.

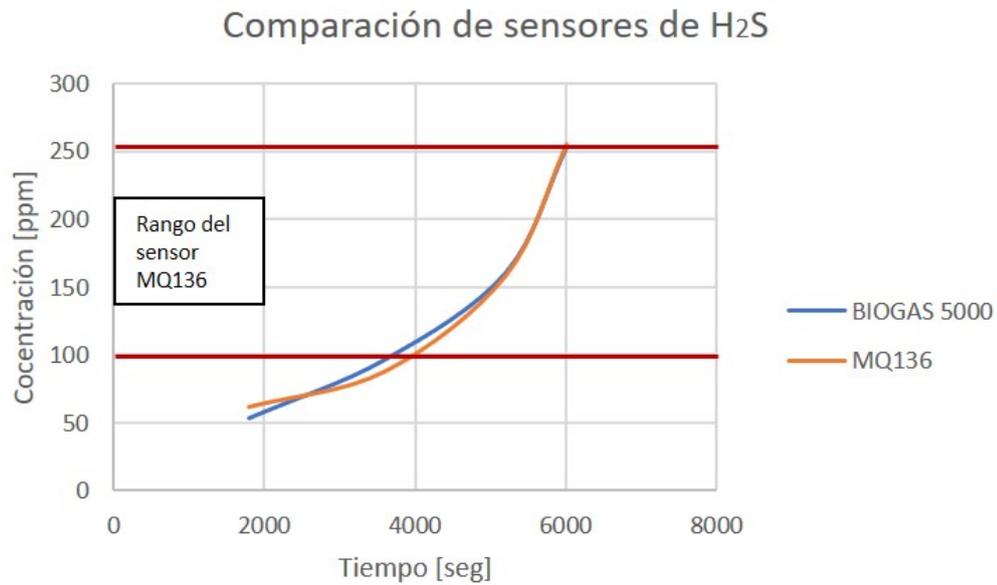


Figura 5.6: Los datos representados en el gráfico muestran la concentración de H₂S medidas por ambos sensores, llegando a su punto máximo en 250 ppm.

Sensor	Rango dinámico [bits]	Resolución [ppm]
MQ7	20 - 30	0.40
MQ136	50 - 250	0.50

Tabla 5.1: Rango dinámico y resolución de los sensores de gas después de la calibración estándar. La mínima variación de la magnitud medida del sensor MQ7 es de 0.40 ppm y 0.50 ppm la del sensor MQ136.

5.2. Pruebas de rendimiento de los sistemas

5.2.1. Sistemas de alimentación

En la Tabla 5.2 se enlistan los resultados obtenidos en las pruebas de rendimiento a los diferentes sistemas de alimentación. Por una parte, el sistema de sensado

se dejó funcionando durante el tiempo que el banco de carga lo permitió y se almacenaron los datos para obtener un registro del tiempo de funcionamiento para dicho sistema. Por otra parte, para el sistema de transmisión de datos, se siguió un procedimiento similar, pero se almacenaron los datos por medio de la interfaz para determinar el tiempo de funcionamiento. Finalmente, el tiempo de funcionamiento de los bloques de control se estimó al calcular un promedio de los tiempos en cada una de las pruebas, incluyendo demostraciones, ensayos en piso y en laboratorio.

Sistema	Bloque	Tiempo [h:m:s]	T [C]	Peso [kg]
Sensores	Almacenamiento	04 : 20 : 00 ± 30	23 – 25	-
Sensores	Transmisión	03 : 30 : 00 ± 30	20 – 24	-
Motores	Teleoperado	00 : 40 : 00 ± 10	18 – 23	10
Motores	Autónomo	00 : 40 : 00 ± 10	18 – 23	10

Tabla 5.2: Resultados de las pruebas de rendimiento de los sistemas de alimentación. Se describen los resultados de dos de los subsistemas evaluados que componen la plataforma: sensores y motores.

5.2.2. Pruebas de rendimiento del vehículo

Tracción

Una forma de entender la dinámica de un sistema es mediante un modelo matemático, el cual queda descrito por la aplicación de leyes físicas que rigen su comportamiento, el vehículo en pendiente tendrá que cumplir con la Segunda Ley de Newton:

$$F_t = m a + \mu m g \cos\alpha + m g \operatorname{sen}\alpha \quad (5.3)$$

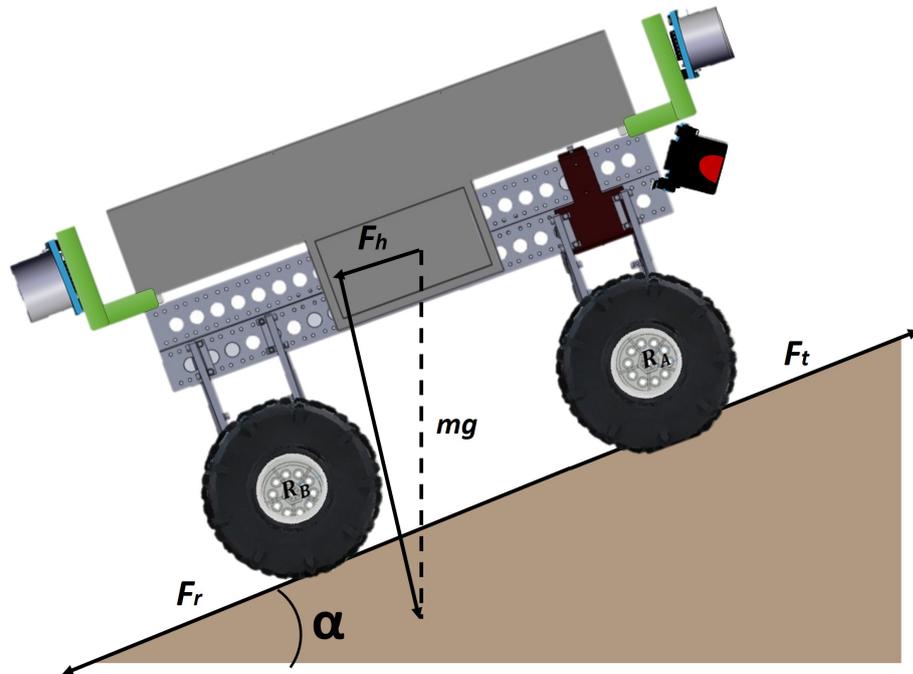


Figura 5.7: Diagrama de pendiente máxima, en donde: F_t = fuerza de tracción que impulsa al vehículo eléctrico; m = masa; a = aceleración (obtenida a partir de las pruebas en laboratorio); F_r = fuerza de fricción entre la superficie y los neumáticos; F_h = componente del peso del vehículo a lo largo de la pendiente.

Debido a la Ecuación 5.4 se considera importante determinar el α_{max} al que el vehículo es capaz de desplazarse. A partir de las pruebas realizadas en laboratorio, haciendo uso de planos inclinados graduados, se determinó que el ángulo máximo de la pendiente que la plataforma es capaz de subir un $\alpha_{max} = 35^\circ$ con un valor de coeficiente de fricción caucho-superficie rígida de $\mu = 0.4$. Por tanto, un valor aproximado de la fuerza de tracción necesaria para desplazar el vehículo a una pendiente máxima de 35° quedaría determinado por:

$$F_t = 9(0.1)N + 81.11N \simeq 82.01 [N] \quad (5.4)$$

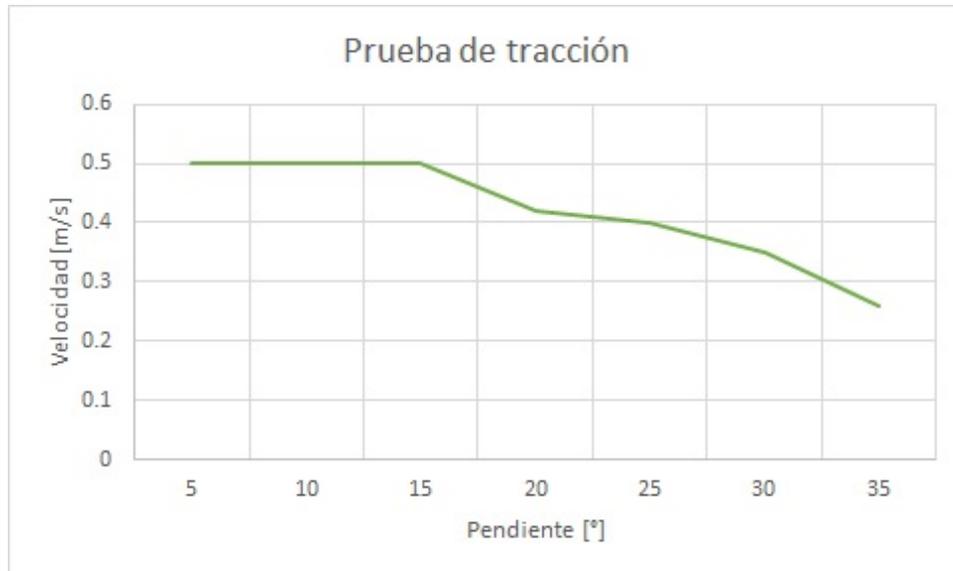


Figura 5.8: Gráfica velocidad vs pendiente: El gráfico representa la influencia de la pendiente en el rendimiento del vehículo, en específico como se ve afectada la velocidad de este.

Como se puede observar en la Figura 5.8, la velocidad disminuye a medida que la pendiente aumenta, debido a que la componente del peso del vehículo a lo largo de la pendiente aumenta proporcional a esta. Llegando a ser la velocidad de 0.26 m/s con una pendiente máxima de 35° , la cual es la pendiente límite para evitar forzar los motores.

Altura máxima de obstáculos

Otro factor a considerar es la altura máxima que pueden superar las ruedas del vehículo, ya que este valor es fundamental para calibrar el bloque de control autónomo, que responde a los valores del sensor infrarrojo. Para determinar este valor, se realizaron pruebas en laboratorio, las cuales se pueden observar en la Figura 5.9, de estas pruebas se obtuvo una altura máxima de aproximadamente $h_{max} = 7.5 \text{ cm}$, sin embargo la altura máxima recomendada para superar los obstáculos es de 6 cm , para no poner en riesgo la integridad de la plataforma y sus componentes.

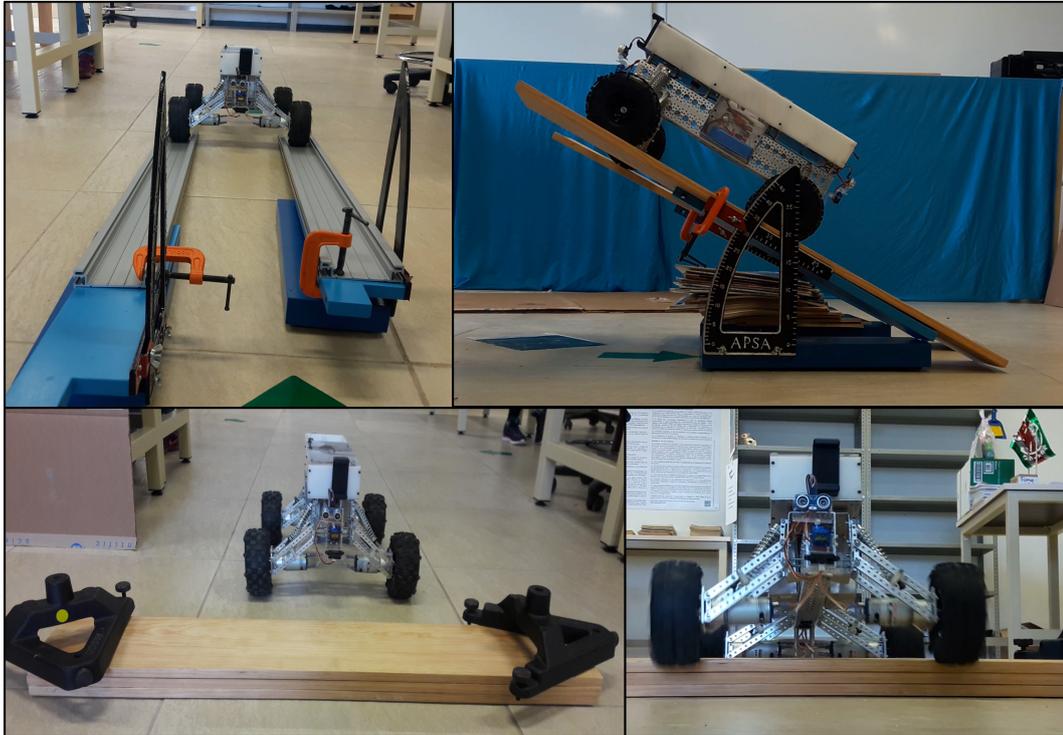


Figura 5.9: Pruebas de rendimiento de la plataforma realizadas en laboratorio. Imágenes superiores: pruebas de pendiente. Imágenes inferiores: pruebas de altura máxima de obstáculos.

El análisis dinámico del vehículo permitió la selección de los principales componentes de la plataforma, tales como los motores, el controlador electrónico, además del sistema de baterías, los cuales le permitieron al prototipo alcanzar una velocidad media de 0.5 m/s , desplazar una carga máxima de 10 kg y vencer pendientes de 35° evaluadas en pruebas de laboratorio.

Para realizar una breve comparación, se incluye la Tabla 5.3, la cual plasma los valores de pendiente de las estructuras volcánicas más abundantes en el planeta. A partir de estos valores, es posible observar que los resultados obtenidos en la prueba de pendiente son favorables y permiten la exploración de ambientes con características geológicas de pendiente similares a los que se encuentran en volcanes de escudo y estrato volcanes.

Tipo de volcan	Pendiente
Estrato volcan	15° a 33°
Volcan de escudo	10°

Tabla 5.3: Pendiente promedio de estructuras volcánicas. Referencia: <http://www.saludambiental.udg.mx/riesgos-geologicos>.

5.2.3. Calibración del bloque autónomo

Primero, se presenta la calibración del sensor SHARP que forma parte del bloque autónomo. Para calibrar este sensor, se utilizó un conjunto de datos de medición promediados al sensar distancias conocidas, dentro del rango de operación del sensor (5-30 cm).

La salida de este sensor no es lineal, sino que tiene una forma potencial negativa como se muestra en la Figura 5.11, la relación entre el valor medido y el real se encuentra descrito por la siguiente ecuación con una $R^2 = 0.943$.

$$y = 11392 x^{-1.283} \quad (5.5)$$

A partir de esta calibración es posible determinar las irregularidades del suelo. El sensor permite distinguir si existe algún cambio abrupto que represente un obstáculo, el cual el vehículo no sea capaz de superar. Esta información es útil para el adecuado funcionamiento del bloque autónomo.

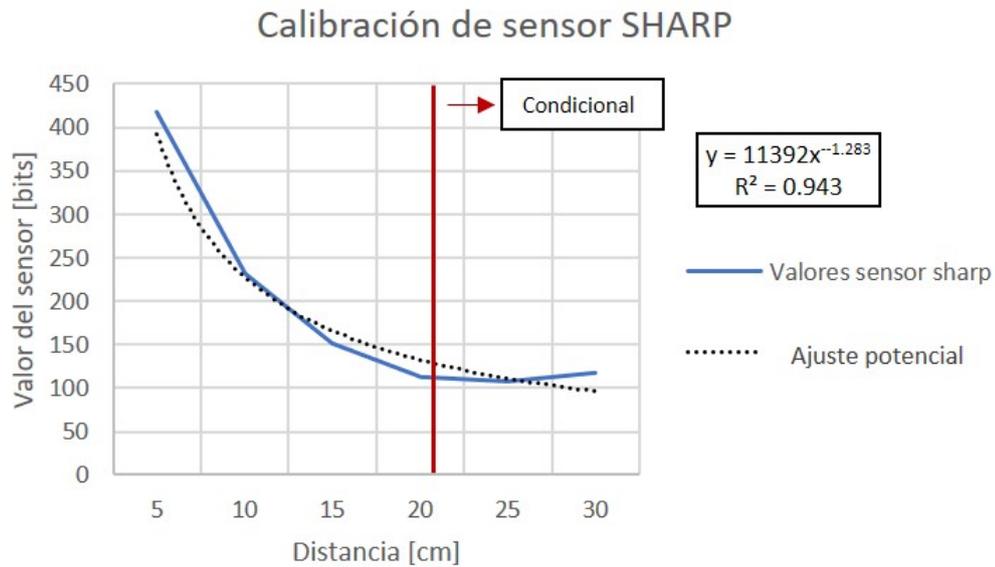


Figura 5.10: Calibración sensor SHARP

Por otra parte, es necesario calcular la velocidad angular, la cual es una medida de la velocidad de rotación. Se define como el ángulo girado por una unidad de tiempo.

$$\omega = \frac{d\phi}{dt} = \frac{2\pi}{6\text{ s}} = 1.04 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (5.6)$$

La velocidad angular fue determinada en pruebas de laboratorio, obteniendo un valor de aproximadamente 1.04 rad/s y un radio de giro de 1 m . A partir de la Ecuación 5.7 se puede determinar el tiempo necesario para realizar un giro de 90° .

$$dt = \frac{d\phi}{\omega} = \frac{\pi}{2(1.04)} = 1.5 \text{ s} \quad (5.7)$$

El valor determinado por la expresión anterior se utiliza para definir el tiempo de giro programado en el modo autónomo. Lo que le permitirá girar hacia la izquierda o la derecha, dependiendo de los valores obtenidos por los sensores ultrasónicos.

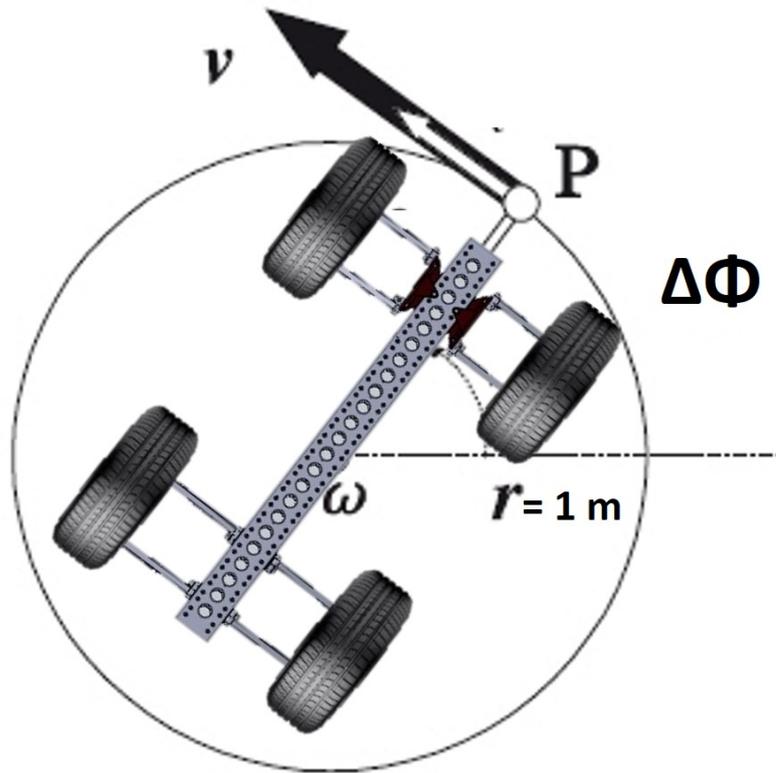


Figura 5.11: Calibración del tiempo de giro del bloque de control autónomo a partir de la velocidad angular del vehículo.

5.3. Adquisición de datos en campo

Finalmente, el sistema desarrollado fue probado durante el estudio de prospección geofísica realizado por el grupo de Exploración Geofísica de la Facultad de ingeniería de la UNAM en la zona arqueológica de Teotihuacan llevado a cabo del 11 al 14 de octubre del 2018. Los datos obtenidos fueron adquiridos de manera puntual dentro de la malla A compuesta por las cuatro líneas que encierran el polígono ubicado a lo largo de la plaza de la Luna (dirección S-N) y por las distancias entre cada punto de medida, los cuales conforman la malla.

La densidad de medidas está relacionada con el grado de detalle necesario y el aparato utilizado, debido al rango de medición del GPS (2.5 m) se definió un espacio entre medidas de 2×2 m. Los puntos de la cuadrícula fueron señalados con marcadores de material plástico de colores vivos para ser fácilmente identificados. Para la adquisición de datos, se establecieron los cuatro extremos del polígono con una cuerda con marcas a cada dos metros, y perpendicular a esta, se movió una cinta métrica a lo largo de la cual se tomaron las medidas, esta disposición se puede observar en la Figura 5.12.

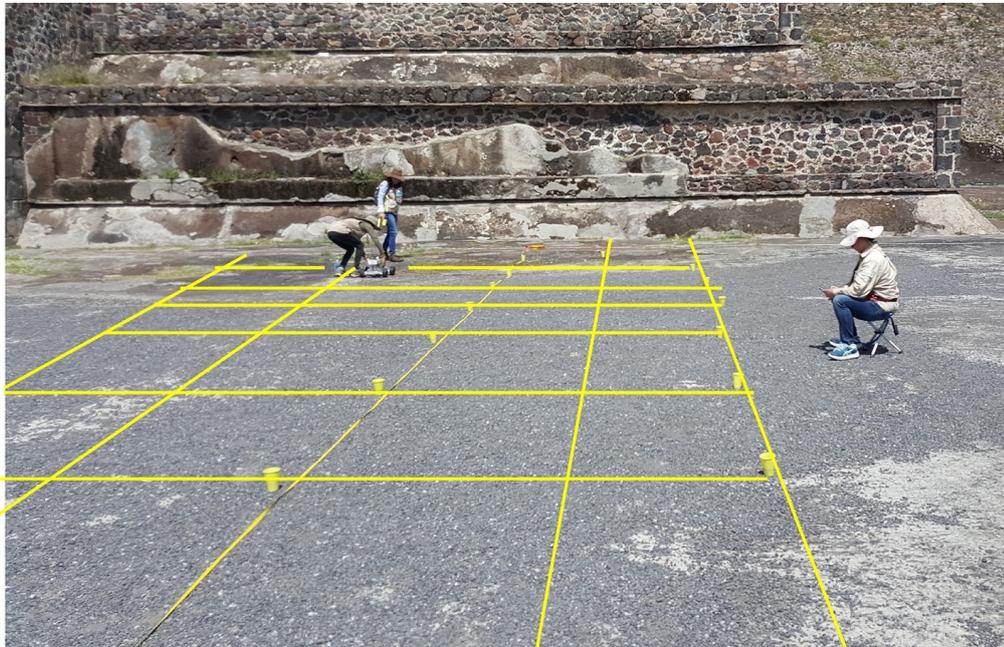


Figura 5.12: Disposición de los nodos de toma de datos en la malla A. Cada marcador amarillo indica los nodos formados dentro de la malla.

Para aumentar la eficiencia de la adquisición de datos con el Rover, estos fueron tomados en zigzag (ida y vuelta). Las posiciones obtenidas por el GPS sobre el Rover se pueden observar en la Figura 5.13, las marcas de referencia de color amarillo indican los cuatro puntos que delimitan el polígono y las marcas rojas representan cada punto obtenido en los nodos que conforman la malla.

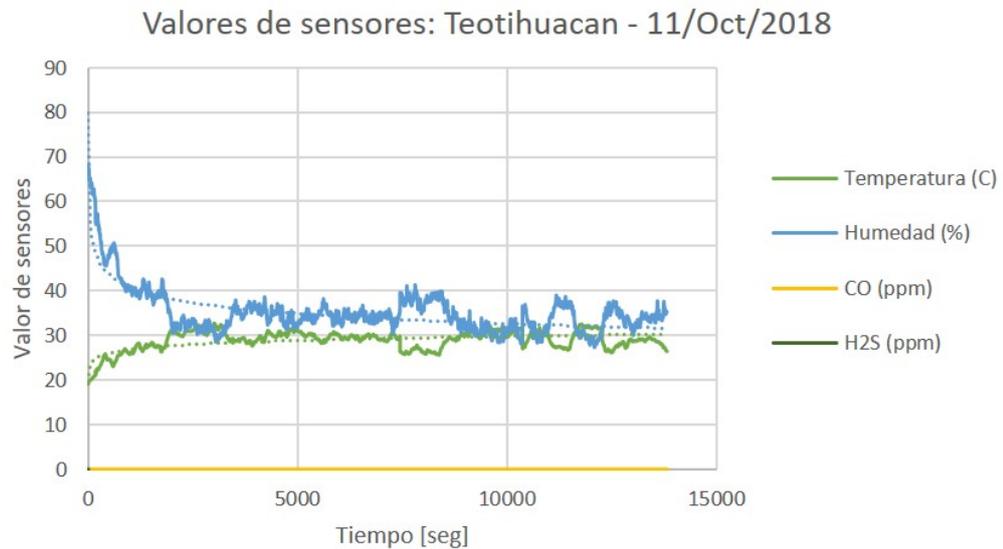


Figura 5.14: Datos de temperatura, humedad y concentración de gases (CO y H_2S) obtenidos en la malla A: La temperatura aumentó y la humedad disminuyó a lo largo del día, en cambio la concentración de gases permaneció constante durante toda la prueba.

El incremento de la temperatura lleva, en general, a la disminución de la humedad relativa. En el gráfico se puede apreciar que la humedad disminuyó aproximadamente en un 40 % de las 10:00 a las 15:00 horas, en cambio la temperatura aumentó moderadamente de los 18 °C a los 30 °C en el mismo lapso de tiempo. Por otra parte, la concentración de gases (CO y H_2S) se mantuvo constante, dentro del rango del sensor, durante la prueba, obteniendo valores de 0 ppm a lo largo del día.

5.3.1. Prueba de alcance de telemetría

En el sistema teleoperado se pusieron a prueba dos componentes, el bloque de control teleoperado y su correspondiente sistema de adquisición de datos, en este caso el sistema de sensado con transmisión de datos. Para ello, se realizaron pruebas de operación y transmisión dentro de la zona arqueológica de Teotihuacan, los datos de posición fueron aproximados por la información visual obtenida por el Rover durante su recorrido, lo cual permitió construir la Figura 5.15, en donde se puede observar la trayectoria seguida por el Rover durante su recorrido a través de la zona arqueológica, la cual se indica con la línea azul, como puntos de referencia se utilizan la pirámide de la Luna ubicada al Norte y el Palacio de Quetzalpapálotl al Suroeste.



Figura 5.15: Mapa de alcance del bloque teleoperado en campo. Los recuadros blancos indican los puntos de referencia utilizados: pirámide de la Luna y el Palacio de Quetzalpapálotl.

A partir de esta información se calculó la distancia de alcance de los componentes de telemetría. Los resultados obtenidos se muestran la Tabla 5.4, la cual compara el alcance teórico, especificado en la hoja de datos del dispositivo y el valor determinado en la prueba de campo. Estos valores, representan el alcance en el que los componentes de telemetría (RC y transmisión de datos) tienen una respuesta confiable, es decir que no existe retardo, atenuación de señal o pérdida de datos durante la transmisión. Como se puede observar, el valor determinado en campo es menor al valor teórico, ya que la arquitectura y disposición de las pirámides y distintas estructuras dentro de la zona de estudio perjudican el rango operacional de estos componentes.

Sistema	Alcance teórico [m]	Alcance probado [m]
Radiocontrol	900 – 1,500	200 m
XBee	600 – 9,600	250 m

Tabla 5.4: Alcance de sistemas de transmisión de información: El valor determinado a través de la prueba en campo resulta menor al teórico.

CAPÍTULO 6

Conclusiones

Contenido

6.1. Ventana de oportunidades	110
6.2. Trabajo a futuro	111

Esta tesis se ha centrado en el diseño y elaboración de un robot móvil que permita explorar lugares de difícil acceso para el ser humano. Además de proporcionar una interacción remota entre el usuario y el móvil. En general, se han conseguido alcanzar los objetivos propuestos al inicio del proyecto. Algunas de las conclusiones derivadas del trabajo desarrollado son:

Los robots móviles son dispositivos innovadores que pueden usarse para la exploración de diferentes lugares que pueden poner en riesgo la integridad física de una persona. Por una parte, en este proyecto se diseñó y construyó un prototipo de robot explorador terrestre, capaz de realizar de manera autónoma diferentes tareas: evadir obstáculos, cambiar de dirección, explorar, etc. Por otra parte, la plataforma es capaz de moverse guiada por teleoperación. En general, el sistema desarrollado en este trabajo es sencillo, abierto y flexible, se convierte en una herramienta útil para la realización de exploración controlada por retroalimentación visual. Por lo que se concluye que la arquitectura de control basada en bloques es una alternativa práctica para el desarrollo de este tipo de plataformas.

Además, se propuso la organización de los elementos del robot en secciones: actuadores, sensores, tarjeta controladora, etc. Lo cual permitió obtener un prototipo de robot estable y equilibrado. Dicha arquitectura ha mostrado en las pruebas realizadas su fiabilidad y adecuado desempeño, al permitir realizar todas las funciones para las que fue concebida.

Por otra parte, el sistema de sensado desarrollado cumple con las expectativas iniciales de ser un sistema de adquisición y control que trabaje de forma inalámbrica. Se han adaptado con éxito los sensores de variables ambientales, como parte del sistema de adquisición de datos. Además, con la capacidad de reutilizar los datos y darles nuevos propósitos, se puede continuar con su análisis y transformarlos en nuevas formas de producir conocimientos valiosos que permitan ahorrar tiempo, recursos e incluso salvar vidas. Ya que este tipo de sistemas nos ayudan a reducir el peligro, al disminuir la vulnerabilidad ante inhalación de gases, altas/bajas temperaturas, radiación, entre otras.

El sistema concebido está basado en software libre y hardware de fácil adquisición para permitir su réplica. De igual forma el software está concebido con una estructura modular basada en bloques. Esta estructura facilita la extensión de las funcionalidades de la aplicación a través de la inclusión de nuevos módulos a la misma.

El software ejecutado en la estación remota es utilizado como herramienta de supervisión a distancia. La interfaz gráfica diseñada en Processing resultó ser una herramienta simple de usar e intuitiva. La cual permite potencializar el sistema, debido a que permite una interacción continua y activa entre el usuario y el móvil. Además, la visualización y almacenamiento de la información proporciona un método útil para un posterior modelado de los ambientes explorados.

Finalmente, es importante mencionar que los cambios de temperatura y humedad ambiental influyen en la señal generada por estos tipos de sensores, por lo que se sugiere llevar a cabo pruebas que permitan evaluar la respuesta de estos sensores a los cambios de temperatura, humedad y presión, con el fin de evaluar su aplicación

para el monitoreo de ambientes. Es por esto por lo que se sugiere estudiar otros tipos de sensores que puedan tener una mayor sensibilidad y precisión para bajas o altas concentraciones de gases.

6.1. Ventana de oportunidades

Los vehículos tipo rover son una tecnología con gran potencial en muchas aplicaciones civiles y científicas, tal es el caso de la adquisición de información con el uso de sensores que registran múltiples parámetros ambientales con el beneficio adicional de disminuir los riegos, los costes y los tiempos de adquisición. Como muchas otras tecnologías, su empleo en el ámbito científico ofrece una gran variedad de aplicaciones:

- **Arqueología:** Posibilita el seguimiento arqueológico de obras civiles para planificar las actuaciones de la exploración y permite obtener fotografías para documentación de los trabajos arqueológicos que ayudan a generar una panorámica total o parcial del yacimiento.
- **Geología:** Permiten acceder a zonas remotas o de difícil acceso para la elaboración de trabajos cartográficos y de exploración a un coste asequible, en comparación con los métodos tradicionales. Suministran información para su uso científico y representan un medio para la difusión, documentación y conservación de elementos del patrimonio geológico y minero.
- **Inspección estructural e industrial:** Facilita las inspecciones técnicas de estructuras, revisiones de cubiertas de edificios, tuberías y ductos.
- **Emergencia y protección:** Favorece la adquisición de datos y seguimiento por parte de los Servicios de Protección Civil; búsqueda y localización de personas extraviadas, observación y toma de datos, control de incendios y evaluación de accidentes o desastres.

6.2. Trabajo a futuro

El proyecto de tesis se concluyó con buenos resultados como se muestran en las secciones anteriores. Los trabajos a futuro que se presentan en esta sección se consideran extensiones del mismo, a fin de obtener un sistema más robusto y más completo. Para mejorar el trabajo de este proyecto es necesario considerar los elementos que se listan a continuación:

- Potenciar el sistema de alimentación. Aumentando el tiempo de autonomía de la plataforma, lo cual permitirá simplificar las tareas de exploración.
- Enriquecer el sistema de adquisición de datos, añadiendo acelerómetros y giroscopios que aumentarían notablemente las posibilidades de monitoreo del sistema. Se sugieren, ya que estos dispositivos pueden brindar más información sobre la posición, orientación e inclinación de la plataforma.
- Aumentar el número de sensores de distancia (ultrasónicos, infrarrojos o láser), para ampliar las capacidades de detección y respuesta del bloque de control autónomo.
- Implementar un brazo robótico que permita acceder a lugares compactos y para la recolección de muestras.
- Desarrollar el bloque de control autónomo al incluir algoritmos de inteligencia artificial y entornos de realidad virtual, lo cual potenciando la respuesta de este bloque.

APÉNDICE A

Tablas de especificaciones

A.1. Especificaciones de motores

Características	Valor
Voltaje nominal	12 V
Rango de voltaje	6 - 12 v
Velocidad (sin carga)	313 rpm
Corriente (sin carga)	0.52 A
Corriente (sobrecarga)	20 A
Torque	416.6 oz-in (30 kgf·cm)
Relación de transmisión	27:1
Material del engranaje	latón primario, nylon secundario, acero terciario
Estilo de caja de cambios	Planetario
Tipo de motor	DC
Tipo de cepillo del motor	Grafito
Diámetro del eje de salida	6 mm
Estilo del eje de salida	Eje en D
Soporte del eje de salida	Rodamientos de bolas dobles
Conexión eléctrica	Terminal de pala masculina
Temperatura de operación	-10°C a 60°C
Tamaño de tornillo de montaje	M3 x 0.5 mm
Peso del producto	330 g (11.64 oz)

Tabla A.1: Especificaciones motor Planetary Gear Motor (638280)

A.2. Sistema de radio control

Características	Valor
Rango de voltaje	7.4 - 15 v
Corriente de operación	105 mA
Frecuencia	2.4 GHz
Distancia de control	900 m - tierra, 1.5 km - aire
Pantalla	2.8 in a color (16), 240x320 pixeles
Ancho de banda de canales	5.0 MHz
Poder de transmisión	100 mW
Dimensiones	183 x 193 x 100 mm
Peso del producto	880 g

Tabla A.2: Especificaciones de la emisora AT9 de Radiolink

Características	Valor
Rango de voltaje	5 - 10 v
Corriente de operación	38-45 mA
Frecuencia	2.4 GHz
Dimensiones	43×24×15 mm
Peso del producto	15 g

Tabla A.3: Especificaciones del receptor R9D

Manual de usuario del sistema Radiolink AT9, disponible en (consultado el 20 de Febrero del 2018):

<http://www.radiolink.com.cn/doce/>

APÉNDICE B

Configuración de XBee en modo AT

Para comprender la configuración de los módulos XBee-PRO S3B, se enlista a continuación los parámetros que tienen que ser configurados en los dispositivos RF para que la red pueda funcionar de forma correcta en modo AT.

Parámetro ID (PAN ID): Permite identificar a una Red de Área Personal en particular. El valor seleccionado es arbitrario, sin embargo, es importante que se configure el mismo en ambos módulos.

Parámetro CE (Coordinator Enable): El valor de este parámetro define el papel que desempeña el módulo dentro de la red (Coordinador, router o end-point).

Parámetro SH (Serial Number High): Admite leer los 32 bits más significativos de los 64 bits que forman la dirección de origen. La dirección de origen es un número único, asignado por el IEEE para cada módulo de RF.

Parámetro SL (Serial Number Low): Permite leer los 32 bits menos significativos de los 64 bits que forman la dirección de origen. La dirección de origen es establecida por el IEEE, como un número único para cada módulo.

Parámetro DH (Destination Address High): Corresponde a los últimos 32 bits (más significativos) de los 64 bits correspondientes a la dirección de destino (tabla 4). Este valor, en conjunto con el parámetro DL, forma la dirección de destino usada para la transmisión.

Parámetro DL (Destination Address Low): Corresponde a los primeros 32 bits (menos significativos) de los 64 bits que forman la dirección de destino.

Parámetro NI (Node Identifier): Es el nombre con el que se le reconocerá a cada módulo. Admite datos sólo en formato ASCII y no puede iniciar con un espacio.

Parámetro BD (Baud Rate): la velocidad de baudios UART (velocidad de transmisión entre los módulos). Los valores seleccionables del 0 al 8 representan velocidades estándar: [0] - 1200 bps, [1] - 2400 bps, [2] - 4800 bps, [3] - 9600 bps, [4] - 19200 bps, [5] - 38400 bps, [6] - 57600 bps, [7] - 115200 bps, [8] - 230400 bps.

La Tabla B.1 documenta la configuración de los dispositivos XBee-Pro S3B de este proyecto. Los parámetros restantes conservaron los valores predefinidos en XCTU.

Parámetro	XBee A	XBee B
ID	1234	1234
CE	Standar Router[0]	Standar Router[0]
SH (valor por defecto)	13A200	13A200
SL (valor por defecto)	40E2XXXX	40D6XXXX
DH	13A200	13A200
DL	40D6XXXX	40E2XXXX
NI	Transmisor	Receptor
BD	[6] - 57600	[6] - 57600

Tabla B.1: Resumen de la configuración de los parámetros seleccionados en los módulos XBee-PRO S3B para su funcionamiento en modo AT.

NOTA: Para realizar la prueba de comunicación fue necesario colocar las antenas a cada uno de los módulos XBee en función de mejorar la eficiencia en la transmisión de los datos.

APÉNDICE C

Códigos

C.1. Códigos ARDUINO

C.1.1. Transmisión de datos por medio de XBee

```
1  #include "SoftwareSerial.h"
2  #include "DHT.h"
3  SoftwareSerial xbee(2,3); // xbee(Rx,Tx)
4  DHT dht(6, DHT22); //dht(pin,tipo de sensor)
5
6  //Sensor de Gas MQ7
7  const int AOUTpin=1;//El pin AOUT del sensor de CO se conecta
   al pin A0 de arduino
8  int CO;
9  int COP;
10
11 //Sensor de Gas MQ13
12 const int AOUTpin2=0;
13 int H2S;
14 int H2SP;
15
16 void setup() {
17     // PREPARAR LA COMUNICACION SERIAL
18     Serial.begin(9600);
19     xbee.begin(57600); //xBee
20 }
21
```

```
22 void loop() {
23 ///////////////////////////////////////////////////SENSOR DHT22//////////////////////////////////////
24
25 // ESPERAR ENTRE MEDICIONES , NECESARIO PARA EL BUEN
    FUNCIONAMIENTO
26 delay(3000);
27
28 // LEER LA HUMEDAD USANDO EL METRODO READHUMIDITY
29 float h = dht.readHumidity();
30 // LEER LA TEMPERATURA USANDO EL METRODO READTEMPERATURE
31 float t = dht.readTemperature();
32
33 // REVISAR QUE LOS RESULTADOS SEAN VALORES NUMERICOS VALIDOS ,
    INDICANDO QUE LA COMUNICACION ES CORRECTA
34 if (isnan(h) || isnan(t)) {
35     xbee.print("Falla al leer el sensor DHT22!");
36 }
37
38 // IMPRIMIR RESULTADO AL MONITOR SERIAL
39 xbee.print(h);
40 xbee.print(",");
41 xbee.print(t);
42 xbee.print(",");
43 delay(600);
44
45
46 ///////////////////////////////////////////////////Sensor MQ7//////////////////////////////////////
47 {
48     CO= analogRead(AOUTpin);//Lee el valor analogico del sensor
        de CO desde el pin AOUT
49     COP = (0.4232*CO)-62.26;
50     xbee.print(COP);
51     xbee.print(",");
52
53 }
54 ///////////////////////////////////////////////////Sensor MQ136//////////////////////////////////////
55 {
```

```
56 H2S= analogRead(AOUTpin2);
57 H2SP = (135.25*log(H2S)[0+FFFD]586;
58 xbee.print(H2SP);
59 xbee.print(",");
60 delay(500);
61 }
```

C.1.2. Almacenamiento de datos en módulo SD

```
1 #include <SoftwareSerial.h>//incluimos SoftwareSerial
2 #include <TinyGPS.h>//incluimos TinyGPS
3 #include <SD.h>
4 #include <Wire.h>
5 #include <DHT.h>
6
7 File myFile;
8 const int chipSelect = 10; //Definir pin 10
9 DHT dht(6, DHT22); //dht(pin,tipo de sensor)
10
11
12 TinyGPS gps;//Declaramos el objeto gps
13 SoftwareSerial serialgps(4,3);//Declaramos el pin 4 Tx y 3 Rx
14 //Declaramos la variables para la obtencion de datos
15 int year;
16 byte month, day, hour, minute, second, hundredths;
17 unsigned long chars;
18 unsigned short sentences, failed_checksum;
19
20 void setup(){
21 Wire.begin();
22 Serial.begin(57600);//Iniciamos el puerto serie
23 serialgps.begin(9600);//Iniciamos el puerto serie del gps
24 //Imprimimos:
25 Serial.println("F,H,L,l,T,Hu,CO,H2S");
26 if (!SD.begin(chipSelect)) {
```

```
27     Serial.println("No se pudo inicializar");
28     return;
29 }
30
31 if(!SD.exists("Dat.txt"))
32 {
33     myFile = SD.open("Dat.txt", FILE_WRITE);
34     if (myFile) {
35         myFile.println("F,H,L,l,T,HuCO,H2S");
36         delay(83);
37         myFile.close();
38     } else {
39
40         Serial.println("Error creando el archivo");
41     }
42 }
43 }
44 void loop()
45 {
46
47     //delay(601);
48     while(serialgps.available()) //Mientras se esten recibiendo
49     datos
50     {
51         int c = serialgps.read(); //Leer datos
52         if(gps.encode(c)) {
53             float latitude, longitude;
54             gps.f_get_position(&latitude, &longitude);
55             gps.crack_datetime(&year,&month,&day,&hour,&minute,&
56                 second,&hundredths);
57             myFile = SD.open("Dat.txt", FILE_WRITE); //abrimos el
58                 archivo
59             if (myFile) {
60                 float h = dht.readHumidity();
61                 float t = dht.readTemperature();
```

```
61     int H2S = analogRead(0);
62     int H2SP = (135.25*log(H2S)[U+FFFD]5876;
63     int CO = analogRead(1);
64     int COP = (0.4232*CO)-62.26;
65
66     myFile.print(day, DEC); myFile.print("/"); myFile.print(
67         month, DEC); myFile.print("/"); myFile.print(year);
68     myFile.print(",");
69     myFile.print(hour, DEC); myFile.print(":"); myFile.print(
70         minute, DEC); myFile.print(":"); myFile.print(second,
71         DEC);
72     myFile.print(",");
73     myFile.print(latitude,5);
74     myFile.print(",");
75     myFile.print(longitude,5);
76     myFile.print(",");
77     myFile.print(t);
78     myFile.print(",");
79     myFile.print(h);
80     myFile.print(",");
81     myFile.print(H2SP);
82     myFile.print(",");
83     myFile.println(COP);
84     myFile.close(); //cerramos el archivo
85     delay(149);
86 }
87 else {
88     // Si el archivo no se abre:
89     Serial.println("Error al abrir el archivo");
90 }
```

Para atender solicitudes o sugerencias se puede brindar atención en el correo: saney_chanelo@gmail.com

APÉNDICE D

Consideraciones económicas

En este apéndice se estimarán los costos de los recursos materiales utilizados para la realización de este proyecto. La Tabla D.1 muestra los solamente los recursos materiales necesarios para diseñar el robot móvil, así como el monto total de los dispositivos que se utilizaron. Sin embargo, no se están considerando los recursos energéticos utilizados ni los recursos humanos invertidos durante todo el desarrollo del proyecto.

Es importante considerar que la plataforma desarrollada en esta tesis es un modelo a escala de lo real, por lo que no equivale a un producto final, ya que no lleva a cabo la totalidad de las funciones necesarias que realizaría un vehículo rover profesional. Por otra parte, los componentes electrónicos en los vehículos enviados fuera de la Tierra están expuestos a las severas condiciones del ambiente espacial; Vibraciones durante el despegue del lanzador, variaciones de temperatura en un amplio rango. Así mismo la miniaturización de la electrónica en conjunto con los modernos procesos de fabricación de partes y componentes aumentan exponencialmente el precio de los componentes y herramientas necesarias para crear un sistema final como los rovers enviados a las misiones espaciales. Por ello, las consideraciones económicas registradas en la Tabla D.1 no pueden compararse a los recursos necesarios para desarrollar un vehículo rover profesional.

Tipo	Cantidad	Monto (M/N)
4WD Mantis Chasis (4 motores)	1	3800
Lámina de aluminio	1 (50cmx30cm)	100
Acrílico (3mm y 6mm)	1 (30cmx20cm)	500
Base de acrílico para sensores	5	150
Resorte	2	50
Tornillos y pijas	100 <i>cu</i>	70
Cables para motores	1 (5m)	50
Conector XT60	2	90
Conector banana	10	60
AT9/Receptor	1	2500
ESC	2	900
Batería Lipo 11.1 V	1	400
Cargador de baterías Lipo	1	800
Power Bank 5V	2	100
Módulo de alimentación Ardupilot	1	290
Shield Motor V2.0	1	350
Microcontroladores (Arduino)	2	500
Sensor DHT22	1	175
Sensor de Gas (MQ7)	1	75
Sensor de Gas (MQ136)	1	435
Módulos XBee Pro S3B (antena y shield)	2	2200
Módulo SD	1	25
RTC (DS3231)	1	80
Sensor ultrasónico (HC-SR04)	4	135
Shield de sensores	1	75
Servomotor	2	140
Resistencias	50	50
Placas fenólicas	5	100
Cables Dupont	5 (paquetes)	200
Base para celular	1	100
	TOTAL:	14,500

Tabla D.1: Monto total de los recursos materiales necesarios para realizar el proyecto.

Bibliografía

- [Ababei, 2013] Ababei, C. (2013). *SPI and SD cards*. University at Buffalo, New York.
- [Aguilera et al., 2007] Aguilera, M. I., A., B. M., and Iruegas, J. (2007). Diseño y Control de Robots Móviles. In *Congreso Nacional de Mecatrónica y Robótica*, México.
- [Balkwill, 2017] Balkwill, J. (2017). *Performance Vehicle Dynamics*. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 1st edition.
- [Bokanowski et al., 2017] Bokanowski, O., Bourgeois, E., Désilles, A., and Zidani, H. (2017). Payload optimization for multi-stage launchers using hjb approach and application to a sso mission. *IFAC-PapersOnLine*, 50:2904–2910.
- [Briceño, 2005] Briceño, J. (2005). *Transmisión de datos*. Universidad de los Andes, Facultad de ingeniería, Mérida, Venezuela, 3ra edition.
- [Caicedo, 2017] Caicedo, A. (2017). *Arduino para principiantes*. IT Campus Academy, España.
- [Casanova, 2002] Casanova, L. (2002). *Topografía plana*. Taller de publicaciones de ingeniería, ULA, Venezuela, 1st edition.
- [Cervellini et al., 2011] Cervellini, M., Gonzalez, E., Tulli, J., Uriz, A., Agüero, P., and Kuzman, M. (2011). Sistema de sustitución sensorial visual-t+actil para no videntes empleando sensores infrarrojos. *XVIII Congreso Argentino de Bioingeniería SABI 2011*.
- [Faludi, 2011] Faludi, R. (2011). *Building Wireless Sensor Networks*. O’Reilly Media, USA.
- [Filippini et al., 2005] Filippini, G., Nigro, N., and Junco, S. (2005). Estudio del comportamiento dinámico de vehículos terrestres utilizando la técnica de bond graphs. *Mecánica Computacional*, 24:1559–1582.

- [Franklin and Graesser, 1997] Franklin, S. and Graesser, A. (1997). *Is It an agent, or just a program?: A taxonomy for autonomous agents*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [Garcia-Robledo et al., 2008] Garcia-Robledo, P., Garcia-Borrás, P., Aracil, R., and Ferre, M. (2008). Comunicaciones aplicadas a la teleoperación. In *XXIX Jornadas de Automática*, Tarragona, España.
- [Guerra, 2016] Guerra, H. A. (2016). *Robot para exploración arqueológica Tlaloque 1*. Ingeniería, Instituto Politécnico Nacional.
- [Hyung-Joon et al., 2012] Hyung-Joon, J., Joon-Ho, C., Ghassemlooy, Z., and Chung, L. (2012). Pwm-based ppm format for dimming control in visible light communication system. *Communication Systems, Networks Digital Signal Processing (CSNDSP), 2012 8th International Symposium on Systems, Networks Digital Signal Processing*.
- [INAH, 2015] INAH (2015). Robot capta primeras imágenes de túnel teotihuacano. https://inah.gob.mx/images/infografias/20150210_robot.pdf.
- [Jackson and Day, 1990] Jackson, A. and Day, D. (1990). *Manual de modelismo*. Hermann Blume Ediciones, Madrid, España.
- [Jimenez et al., 2013] Jimenez, S., Scarioni, L., and Vanob, K. (2013). Sensores de humedad de tipo capacitivo y resistivo, fabricados con NaCl, KBr y KCl. *Revista Ingeniería UC*, 20(1):83 – 86.
- [Jung-Yoo et al., 2014] Jung-Yoo, K., Chao-Hsien, C., and Sang-Moon, S. (2014). ISSAQ: An integrated sensing system for real-time indoor air quality monitoring. *IEEE Sensor Journal*, 14(12).
- [Mantell, 1980] Mantell, C. (1980). *Electrochemical engineering*. McGraw-Hill Company, New York, USA, 4th edition.
- [Mariscal, 2005] Mariscal, E. (2005). Planeación y seguimiento de trayectorias de robots móviles en una simulación de un ambiente real. *Ra Ximhai*, 1(1).
- [Nuño and Basañez, 2004] Nuño, E. and Basañez, L. (2004). *Teleoperación, aplicaciones, entorno sensorial y teleoperación inteligente (Reporte de trabajo de investigación)*, volume 1193. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

- [Perea, 2015] Perea, F. (2015). *Arduino Essentials*. PACKT Publishing, UK.
- [Posada, 2005] Posada, J. (2005). Modulación por ancho de pulso (pwm) y modulación vectorial (svm). una introducción a las técnicas de modulación. *El hombre y la máquina*, (25):70–83.
- [Prieto, 2012] Prieto, J. (2012). *Introducción a los sistemas de comunicación inalámbricos*. Universidad Oberta de Cataluña, España.
- [Pytel and Kiusalaas, 2010] Pytel, A. and Kiusalaas, J. (2010). *Ingeniería mecánica: Estática*. CENGAGE Learning, México, D.F, 3ra edition.
- [Quintero et al., 2006] Quintero, H., Calle, G., and Díaz, A. (2006). Selección de un servomotor y transmisión por el método de las potencias transitorias. *Scientia et Technica*, (30):161–166.
- [Rubio et al., 2016] Rubio, J., Hernández-Aguilar, J. A., Ávila Camacho, F., J.M., S.-C., and A., M.-R. (2016). Sistema sensor para el monitoreo ambiental basado en redes neuronales. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(2):211–222.
- [Sanchis et al., 2004] Sanchis, E., Gonzalez, V., Torralba, G., and Torres, J. (2004). *Fundamentos y electrónica de las comunicaciones*. GUADA Impresores, Valencia, España.
- [Sobrino et al., 2000] Sobrino, J., Raisounni, N., and Kerr, Y. (2000). *Teledetección*. Servicio de publicaciones, Universidad de Valencia, Valencia, España.
- [UNAM, 2016] UNAM, G. (2016). Versión mejorada del rover de unam space es una realidad. <http://www.unamglobal.unam.mx/?p=21379>.
- [Valdez and Pallás, 2007] Valdez, F. E. and Pallás, R. (2007). *Microcontroladores: Fundamentos y aplicaciones con PIC*. MARCOMBO, España.
- [Vikranth et al., 2016] Vikranth, K., Kodati, M., Chantra, K., and Bandyopadhyay, S. (2016). A comprehensive kinematic analysis of the double wishbone and macpherson strut suspension systems. *Mechanism and Machine Theory*, 105:441–470.