

# Development of a teleoperated unmanned ground vehicle for mining applications with educational purposes.

## Desarrollo de un vehículo terrestre no tripulado teleoperado para aplicaciones de minería con fines educativos.

J. Villanueva-Maldonado<sup>\*1</sup>, Jorge Simón<sup>1</sup>, E. Francisco Rivera-Gomez<sup>2</sup>, Roberto Solís-Robles<sup>2</sup>, Raúl Chavéz-Romero<sup>3</sup>, José Ricardo Gómez-Rodríguez<sup>3</sup>, Víktor Iván Rodríguez-Abdalá<sup>3</sup>, Cristian Eduardo Boyain y Goytia-Luna<sup>3</sup>, and J. Flores-Troncoso<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Investigadoras e Investigadores por México, Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, Mexico,

juvenal.villanueva@uaz.edu.mx, jsimonro@conahcyt.mx

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Zacatecas, México,

{pacorivera, rsolis}@uaz.edu.mx

<sup>3</sup> Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Acad. de Ing. Eléctrica, Posgrado en Ing. para la Innovación Tecnológica, Zacatecas, México,

{rchavez, jrgrodri, abdalá, cristian.boyain, jflorest}@uaz.edu.mx

### Abstract

This work describes aspects related to the development of an “Unmanned Ground Vehicle” (UGV), it has an independent traction system on all six wheels, and four of them have a rotating system to give direction to the vehicle. The rotation of the tires on their own axis reduces overstress on the motors, which reduces energy consumption when rotating and provides better movement, unlike vehicles that work with a difference in speed. In addition, there is a bilateral radio frequency communication system for telemetry and command control. This connects to a terrestrial base that has a graphical user interface to be able to view the received data, telemetry and the video image, in real time. A robotic arm of the SCARA type with four degrees of freedom is also presented, which is integrated into the mobile that allows for work to collect objects as well as drilling in areas of different soil surfaces due to its double effector system. The design features pieces developed through 3D printing.

**Keywords**— UGV, mobile robot, SCARA,

### Resumen

En el presente trabajo se describen los aspectos relacionados al desarrollo de un “Vehículo Terrestre no Tripulado” (UGV, por sus siglas en inglés), que cuenta con un sistema de tracción independiente en las seis ruedas, donde cuatro de ellas presentan un sistema de dirección independiente. La dirección independiente permite reducir el sobre-esfuerzo en los motores, lo cual reduce el consumo de energía al virar y brinda un mejor desplazamiento, a diferencia de los vehículos que trabajan con diferencia de velocidad. Además, se tiene un sistema de comunicación de radiofrecuencia bilateral para la telemetría y el control de comandos que se conecta a una base terrestre donde una interfaz gráfica de usuario visualiza los datos recibidos, de telemetría y la imagen de video, en tiempo real. También se presenta un brazo robótico del tipo SCARA de cuatro grados de libertad el cual está integrado al móvil que con un sistema de doble efector realiza trabajos de perforación y recolección de muestras en diferentes tipos de suelos.

**Palabras clave**— UGV, robot móvil, SCARA

## I. Introducción

Los robots móviles son una variante interesante en la familia de los robots, que pueden ser terrestres, aéreos, acuáticos y espaciales. Se suele distinguir estos sistemas por sus características como lo es la capacidad de carga, desplazamiento en terrenos no estructurados, larga autonomía [1]. En la actualidad, la robótica móvil tiene una amplia variedad de Vehículos terrestres no tripulados (UVG, por sus siglas en inglés), debido principalmente a que estos vehículos pueden ser fácilmente utilizados para apoyar o reemplazar a los seres humanos en situaciones peligrosas, donde se necesita una gran fuerza o destreza, o transitar por espacios donde los humanos no puedan ingresar, por ejemplo, en el manejo y colocación de explosivos, la desactivación de bombas [2].

A nivel mundial, la robótica se utiliza en diferentes sectores, como el de la salud, en la industria, electrodomésticos y, aeroespacial. En el sector industrial el uso de robots cada vez es mayor, ya que en este sector la mayoría de las tareas a realizar son acciones repetitivas dentro de áreas controladas, lo que favorece en la programación de los robots. Por ejemplo, en el sector agrícola cada día surgen nuevos sistemas móviles autónomos que realizan una actividad específica, como fumigación, recolección de frutos, pulverización, detección de enfermedades, entre otras. Así también, el sector minero es una área donde la robótica puede aportar un gran beneficio debido a que parte de sus actividades en este sector ponen en riesgo la vida de las personas [3], [4]. Mientras que el avance de la industria aeroespacial depende en gran medida de la robótica [5]. En la actualidad, una de las misiones más atractivas en este sector se encuentra en los viajes espaciales y específicamente en la exploración a Marte, ya que este planeta es un destino rico en términos de descubrimiento científico y un primer paso para ampliar nuestra presencia en el sistema solar [6].

El presente trabajo tiene como objetivo mostrar el diseño y desarrollo del prototipo de un robot móvil con un sistema de perforación y recolección de muestras de suelo, el cual puede ser teledirigido hasta una distancia de 1 Km. También el móvil cuenta con un sistema de video en tiempo real para observar el terreno por donde el vehículo está circulando y que permite que el usuario pueda controlarlo, así mismo cuenta con un sistema de comunicación bidireccional que permite enviar datos de telemetría al centro de comando para poder monitorear su estado y otros parámetros.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección II se presenta la metodología, sobre el cual se desarrolló el robot. En la sección III contiene la construcción y algunos resultados experimentales que permiten

evaluar el funcionamiento del robot, y finalmente en la sección IV se presentan las principales conclusiones y los posibles trabajos futuros.

## II. Metodología

El trabajo desarrollado se divide en tres etapas: en la primera se realizó el diseño estructural, aquí se muestra los modelos mecánicos en 2D y 3D del robot los cuales se realizaron utilizando un software CAD. En la segunda etapa se muestra el proceso de construcción y finalmente en la tercera etapa se presentan las pruebas de funcionalidad de cada uno de los sistemas de forma independientemente, así como el comportamiento en conjunto.

### II.1. Diseño

Para el diseño del móvil se tomaron en consideración, que sea capaz de recorrer terrenos estructurados y semi-estructurados, tener la capacidad de realizar trabajos de perforación y recolección de muestras de suelo, así como cumplir con las siguientes características:

- Peso: Máximo 50 kilogramos
- Longitud: Contar con dimensiones de 120x100x54 cm (Largo, Ancho, Alto).
- Capacidad de carga: carga 10 kilogramos y de arrastre hasta 20 kilogramos.
- Sistema modular.
- Bajo costo en comparación de otros[4], [7].

El diseño propuesto se puede observar en la Figura 1. Este diseño se dividió en cuatro sistemas,

1. Sistema Móvil
2. Sistema de Perforación y Recolección.
3. Sistema de Control.
4. Sistema de Comunicación.

englobando de esta manera el trabajo, lo que permite abordar su desarrollo en paralelo.

#### 1. Sistema Móvil.

El sistema móvil está conformado por tres partes importantes, las cuales son: el chasis, suspensión y el sistema de dirección.

##### a) *Chasis.*

El diseño del chasis se realizó en dos secciones, la primera sección corresponde al diseño del cuerpo del móvil. Su diseño permite aprovechar el espacio para poder colocar los componentes electrónicos, las baterías y el sistema de comunicación. Mientras que la segunda sección es una

\*Autor de correspondencia



Figura 1: Diseño del proyecto Hunter VENT

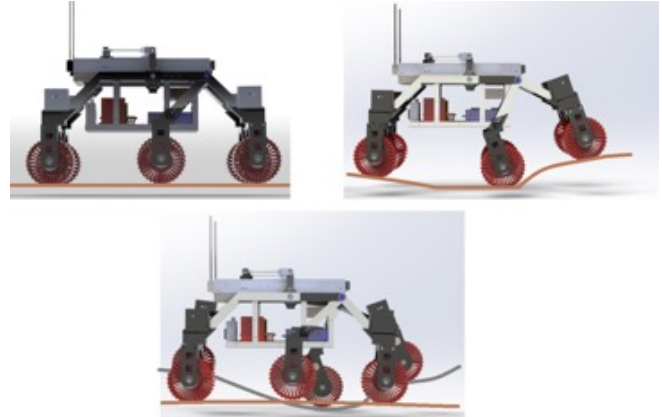


Figura 3: Sistema de Rocker-Bogie

estructura exterior, con una mayor dimensión de la cual se sujetará el sistema de suspensión al cuerpo.

En ambos diseños estructurales se realizaron de manera que puedan ser fabricados con perfiles cuadrado y solera de aluminio, dado que sus características físicas y mecánicas deben permitir que el chasis sea ligero y resistente para cumplir con las restricciones de peso (ver la Figura 2).



Figura 2: Diseño estructural del chasis.

**b) Sistema de suspensión.**

El sistema de suspensión está basado en el sistema Rocker-Bogie, el cual es un mecanismo implementado en algunos robots enviados al espacio [8]. Este sistema se compone de dos piezas unidas en un pivote que les permite tener libertad de giro. La sección del Rocker es la pieza que permite balancear el cuerpo para controlar la estabilidad del robot. Mientras que el Bogie es la sección que contiene el conjunto de dos ruedas, y en ocasiones puede tener más pares. El chasis se mantiene con un ángulo promedio entre los dos balancines, mientras que las ruedas mantienen el contacto con el suelo como se puede ver en la Figura 3. En el caso de las ruedas, estas tienen la finalidad de absorber las irregularidades del terreno por lo que se diseñaron de manera que soporte el peso del vehículo sin deformarse y fueron fabricadas por medio de

impresión 3D a base de poliuretano termoplástico que les permite ser flexible y soportar altas temperaturas (Figura 4).

La Figura 5 muestra el diseño del sistema de suspensión implementado, se puede observar que la unión del sistema de suspensión entre el lado derecho e izquierdo se realiza por medio de la barra central que está unida a la estructura exterior.

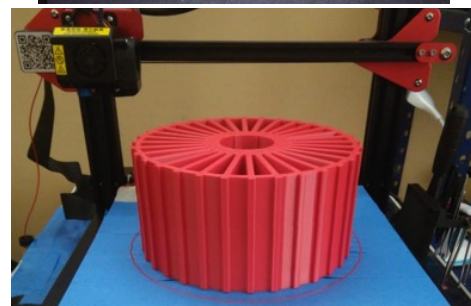
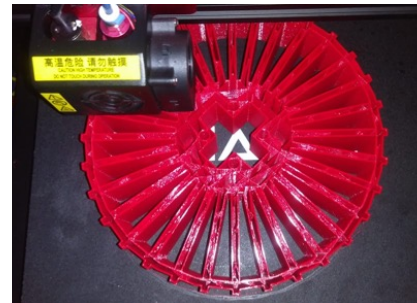


Figura 4: Llanta impresa en TPU

**c) Sistema de dirección.**

El sistema de dirección consta de cuatro ejes con servomecanismos, cuya función es la orientación de ruedas para poder dar dirección y guiar correctamente el móvil, esto permite disminuir el esfuerzo en el sistema de tracción. Para avanzar o retroceder. Los ejes alinean las

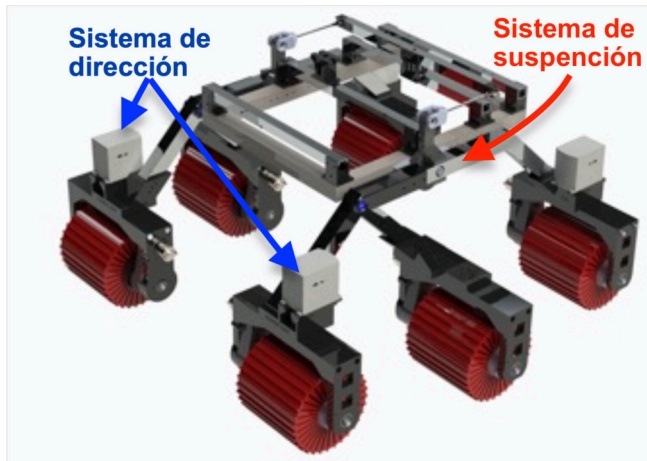


Figura 5: Sistema de dirección y suspensión

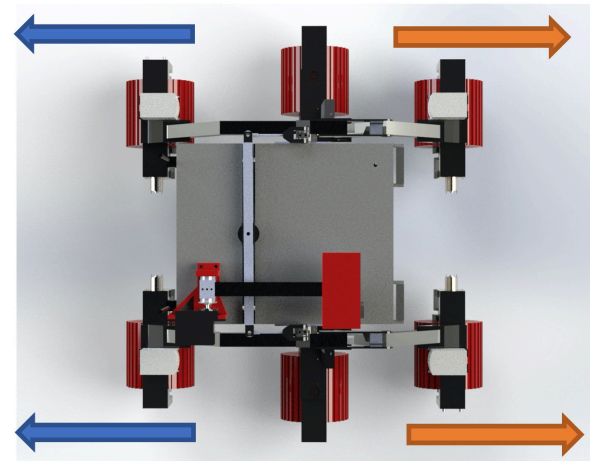


Figura 6: Avance y retroceso

ruedas que podrán avanzar o retroceder según la polarizada de los motores, como se observa en la Figura 6, mientras que para dar vuelta las llantas giran en su propio eje y se posicionan en un ángulo interno de  $45^\circ$  donde los motores se accionan en direcciones diferentes, las ruedas del lado izquierdo giran hacia un sentido mientras que los del lado derecho giran en sentido contrario como se puede muestra en la Figura 7.

Las seis ruedas del vehículo mide  $20\text{ cm}$  de diámetro y  $20\text{ cm}$  de ancho y cada una puede ser controlada de forma independiente por un servomotor. Las ruedas están unidas al chasis por medio de un eje desmontable tipo C, que soporta toda la carga y la distribuye en el eje central de las ruedas con un arreglo estructural que evita que los motores carguen el peso del vehículo, mientras que los ejes rotatorios se conforman por un soporte estructural que envía las cargas mecánicas al centro de la rueda y permite que el eje tenga mayor resistencia y evita que el motor no se sobre esfuerce, como se observa en la Figura 7.

## 2. Sistema de perforación y recolección.

El sistema de Perforación y Recolección utiliza un brazo robótico del tipo SCARA de cuatro grados de libertad, y presenta un sistema de dos efectores finales, uno realiza la acción de perforar mientras el otro permite recolectar objetos.

### a) Brazo Robótico SCARA.

El nombre del robot SCARA proviene del acrónimo en inglés de "Selective Compliance Articulated Robot Arm". El diseño de nuestro brazo es capaz de maniobrar en los ejes X, Y, Z dentro de un ángulo de movimiento de  $180^\circ$  grados en la articulación 2 y de  $220^\circ$  en la articulación 3, y está diseñado para que el avance y la penetración del taladro realice sobre el eje Z lo más vertical y estable

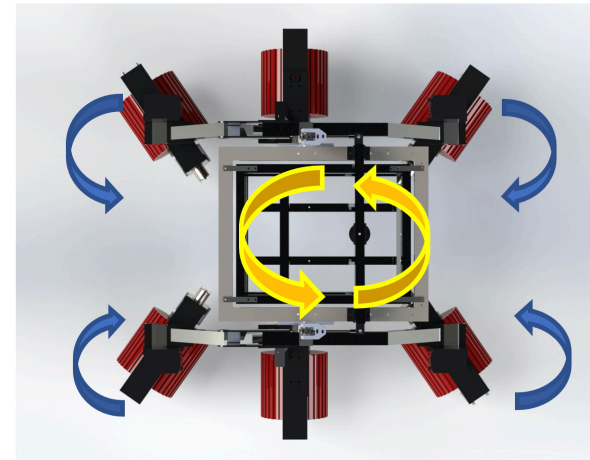


Figura 7: Giro en su propio eje

posible, esto para proteger la herramienta de corte y simplificar el control requerido. Su diseño cuenta con cuatro grados de libertad (LRRL) como se muestra en la Figura 8. El primero grado es lineal y se desplaza en el eje Z en un rango de altura de  $0 - 70\text{ cm}$ , su tarea es levantar todo el peso de la estructura del resto de los eslabones. Los dos grados siguientes son rotacionales y permiten desplazar el brazo en los ejes (X, Y), finalmente el cuarto grado de libertad es lineal y está conformado por un actuador, que sujeta a los efectores finales, los cuales se desplazan una distancia aproximada de  $20\text{ cm}$ . En la Figura 9 se presenta los elementos que conforman el brazo, donde

- 1.) Eslabón 1.
- 2.) Eslabón 2.
- 3.) Eslabón 3.
- 4.) Eslabón 4.
- 5.) Tornillo de potencia.

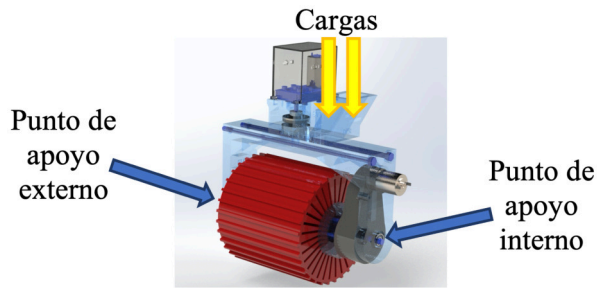


Figura 8: Cargas sobre el eje rotatorio

- 6.) Husillo de bolas recirculantes.
- 7.) Guías.
- 8.) Motorreductor.
- 9.) Servomotor.
- 10.) Actuador lineal.

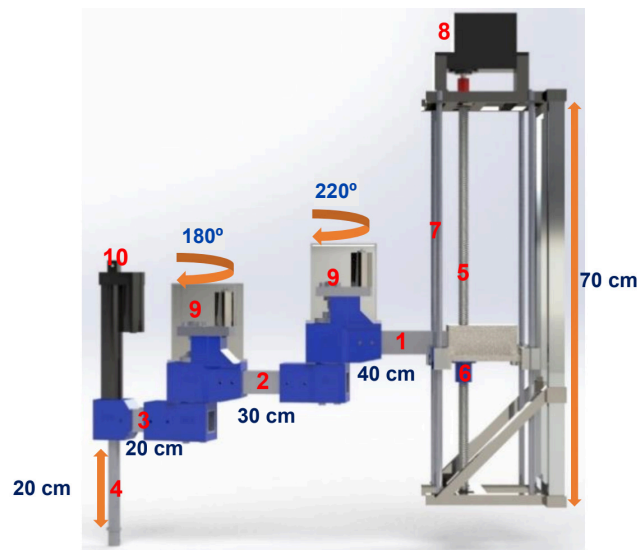


Figura 9: Diseño del brazo robótico tipo SCARA

**b) Efecto Final Múltiple.**

La utilización de dos efectores finales unidos permite realizar dos tareas de forma precisa y ágil permitiendo que cada efector sea operativo sin necesidad de perder tiempo en cambiar de herramienta o necesitar de un operador para realizar dicha operación.

La fabricación de los efectores finales está compuesta en su mayoría por piezas impresas en 3D, y parte de 3 piezas fundamentales, la primera es un soporte plástico impreso con una alta densidad de aproximadamente 50 % que sujeta a la pinza y al taladro que pueden rotar con dos servomotores MG995 instalados.

- El taladro es el elemento que nos permite simular la operación de máquina que realiza perforaciones (ver la Figura 10). Esta herramienta

realiza perforaciones cilíndricas en un material o superficie determinada por ejemplo madera, caliza o arcilla, utilizando como herramienta una broca con un máximo de diámetro hasta de 3/8 de pulgada.

- El Gripper es un sistema de dos palas electromecánica que permite tomar objetos con un rango máximo de abertura de tenazas de 50mm de alto por 50mm de ancho como se muestra en la Figura 10, la cual está fabricada mediante impresión 3D para aligerar el peso del brazo.

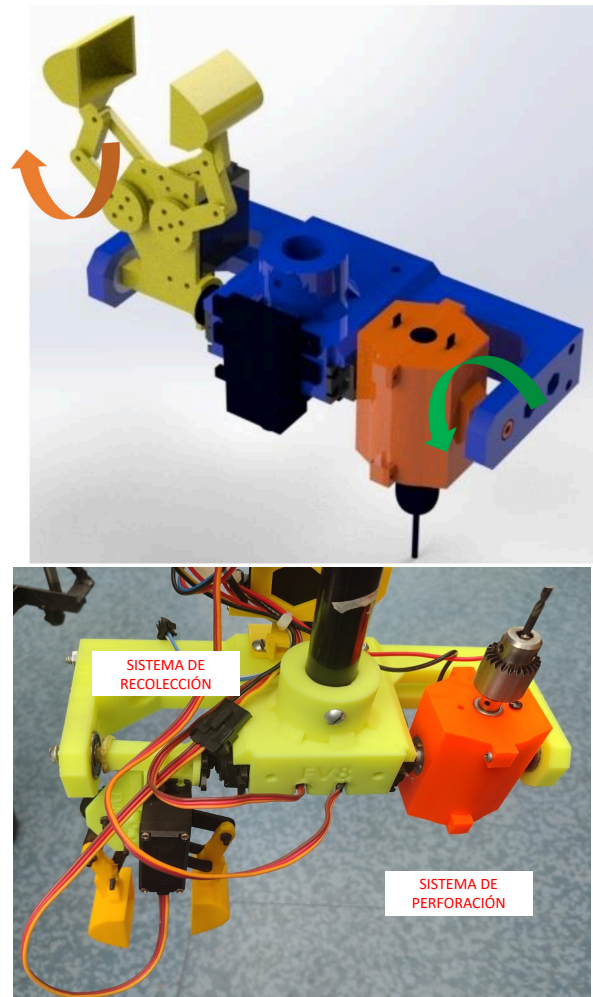


Figura 10: Sistema de Doble Efector.

**3. Sistema de Control.**

La etapa de control se dividió en tres sistemas generales: el control del móvil, el control del brazo robótico y sistemas de telemetría. A su vez, estos se dividen en subsistemas que desarrollan una tarea específica, controlados por un sistema general.

El sistema de control tiene como elemento principal, una placa de desarrollo con cuatro microcontroladores,

- a) *ATmega2560* para el módulo de telemetría,
- b) *CortexM3 ARM* para el sistema móvil,
- c) *ATmega328* para el control de la torre de video y finalmente
- d) *ATmega2560* para el control del sistema de perforación y recolección (brazo).

También se cuenta con un módulo de seguridad, el cual se divide en Alimentación, Protección de los componentes electrónicos, Regulación y Distribución, como se muestra en la Figura 11. Por ejemplo, en el módulo de alimentación se tiene las baterías, en el módulo de protección se encuentran los fusibles y los relevadores para activar y desactivar las baterías, mientras que en el módulo de regulación se encarga de regular el voltaje de las baterías para alimentar el resto de los componentes que utilizan menor voltaje y finalmente el de distribución que se encarga de alimentar a todos los elementos y sistemas dentro del robot.

#### 4. Sistema de Comunicación.

La etapa de comunicación está basada en tres partes; la primera es la base terrestre (centro de mando), la segunda es el sistema de telemetría que permite obtener los datos enviados del móvil al centro de mando, y la tercera parte se refiere al sistema de video que permite operar a distancia el móvil, así como el brazo.

##### a) *Base terrestre*

La base terrestre es el medio de interacción usuario-máquina, que permite monitorear, controlar y observar el UGV, el brazo y los datos de telemetría. Cuenta con una pantalla principal donde se pueden observar los parámetros fundamentales, como: velocidad, posición, inclinación, temperatura, entre otros, así como el video para operar el móvil o el brazo, según sea el caso. En las pantallas secundarias se tiene los parámetros adicionales que permiten analizar lo que sucede alrededor del vehículo, como los sistemas activados o el modo de funcionamiento. También cuenta con un control de comandos portátil, el cual tiene un peso aproximado de  $8\text{ Kg}$ . Éste opera a dos frecuencias, los mandos de control operan a una frecuencia de  $2.4\text{ GHz}$  con un alcance máximo de hasta  $2\text{ Km}$  (con línea de vista), mientras que la telemetría trabaja a  $915\text{ MHz}$  con una distancia de operación de hasta  $10\text{ Km}$ .

##### b) *Módulo de telemetría*

El módulo de telemetría es un sistema embebido capaz de medir: temperatura, velocidad, inclinación, estado de la batería, presencia de objetos a  $450\text{ cm}$  y la distancia a la

base, mientras envía los datos en tiempo real al centro de mando. Así también, se puede activar de forma remota: iluminación, ventiladores, motores y algunos otros accesorios. Este módulo está basado en un microcontrolador *ATMega328* y un módulo de comunicación inalámbrica LoRa, el cual permite tener una conexión bilateral de hasta  $20\text{ Km}$  con un bajo consumo de energía.

##### c) *Torre de video*

La torre de video cuenta con una cámara de video la cual tiene como fin dar una visión al operador del entorno en el que se encuentra. así como la facultad de dirigir el vehículo. Además, la torre cuenta con un mecanismo de tres grados de libertad que permite elevar y rotar la cámara lo cual aumenta o disminuye el campo de visión de la cámara (ver Figura 12). Las imágenes pueden observarse en un monitor dedicado. La torre de video cuenta con un sistema de iluminación nocturna, un apuntador laser para ayudar a enfocar al objetivo, dos sensores ultrasónicos para determinar la distancia del objeto, un módulo IMU para medición inercial y determinar el movimiento del cabezal de la torre de video.

### III. Resultados

Los resultados obtenidos se dividen en dos secciones, en la primera se habla de la construcción mientras en la segunda se muestran los resultados de las pruebas realizadas.

#### III.1. Construcción

La etapa de la construcción se dividió en cuatro Fases.

##### Fase 1: *Sistema Móvil*

En la Fase 1 se construyó la parte medular del proyecto, que es la fabricación del vehículo sobre el cual se montaran cada uno de los sistemas que integran al Rover (ver la Figura 12).

##### Fase 2: *Sistemas de Control*

En la Fase 2 se presenta la construcción del sistema de control, el cual se diseñó y desarrollo de forma modular, asignando un código de colores para identificar cada sección, donde el desarrollo de los módulos de potencia y de alimentación fueron primordiales para manejar y controlar el robot como se muestra en la Figura 13.

##### Fase 3: *Sistemas de Comunicación.*

En la Fase 3 se desarrolla el sistema de comunicación para transmitir y recibir los datos en tiempo real, en la Figura 14 se observa la estructura interna del módulo de telemetría mientras que en la Figura 15 muestra el módulo de la base terrestre. El sistema de la base terrena

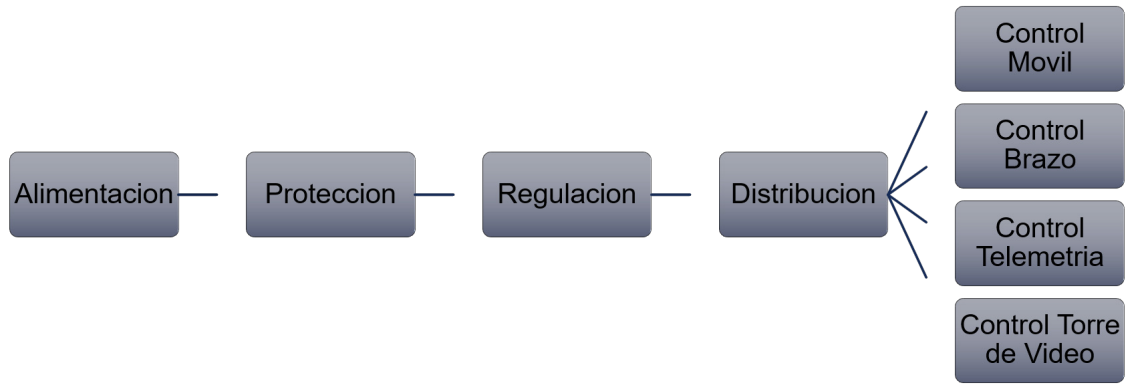


Figura 11: Diagrama de bloques del sistema de control.

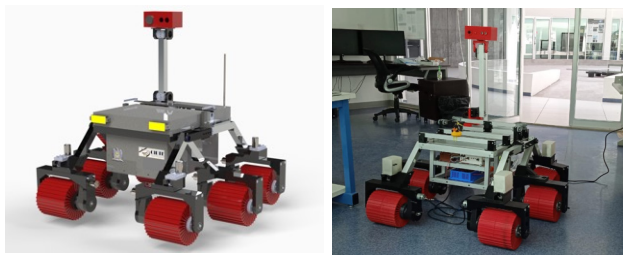
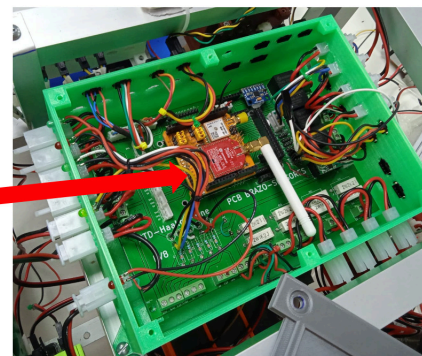


Figura 12: Construcción de sistema móvil y torre de video



Módulo de radiofrecuencia (LoRa)

Figura 14: Módulo de telemetría.

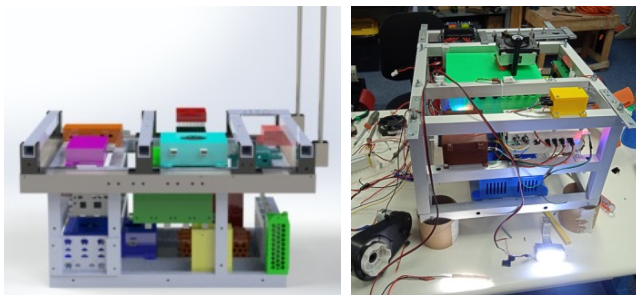


Figura 13: Construcción de módulos internos

cuenta con siete paneles: Panel Alimentación (recuadro amarillo), Panel Voltaje (recuadro morado), Panel principal (recuadro rojo), Panel secundario (recuadro verde), Panel de control móvil (recuadro azul fuerte), panel de control brazo (recuadro azul claro) y el panel de potenciómetros (recuadro rosa).

#### Fase 4: Sistema de Perforación y Recolección.

Finalmente, en la fase 4 se desarrolla el sistema de Perforación y Recolección probando los efectores finales que bajan a una velocidad de  $5\text{ m/s}$ , aún en etapa de desarrollo (ver Figura 16).

### III.2. Pruebas

La verificación del funcionamiento del UGV se llevó a cabo mediante pruebas experimentales en diferentes etapas. Los sistemas se desarrollaron de forma individual para asegurar su funcionamiento y posteriormente se montaron para pruebas en conjunto.

#### 1. Pruebas del Desplazamiento en Terreno.

Las pruebas de desplazamiento en terreno ayudan a conocer cómo se comporta el sistema de locomoción en los dos tipos de terreno para los que fue diseñado, específicamente, estas pruebas nos indican si el diseño eléctrico y mecánico del robot fueron correctamente elaborados. Así también, las pruebas permitieron comprobar en dos maneras el funcionamiento del robot móvil, con la primera se pudo comprobar que el sistema de comunicación realiza una buena transmisión de los comandos al sistema robótico, el cual, recibe las órdenes de control enviadas desde la base terrestre para posteriormente ejecutar movimientos básicos como: avance, retroceso, vuelta a la izquierda y vuelta a la derecha. De esta manera se pudo comprobar el funcionamiento de los motores que se encuentran en las llantas y las articulaciones. En la Figura

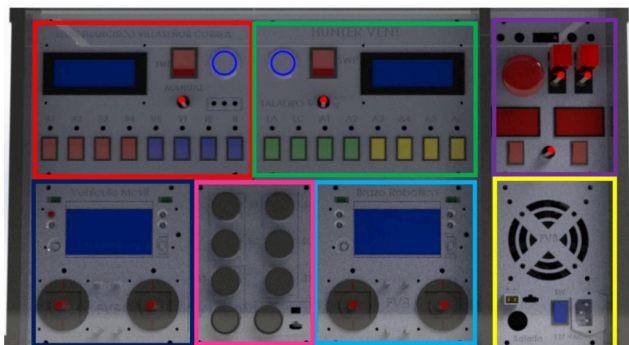


Figura 15: Sistema de Base terrestre

17a se observa el posicionamiento correcto de los cuatro ejes rotatorios de manera que el robot pueda realizar el giro en ambos sentidos.

Se llevaron cabo dos pruebas de campo, la primera prueba de terreno se desarrolló en una carretera pavimentada con concreto (ver Figura 17b), debido a que es un suelo plano y estructurado de fácil circulación lo que es ideal para las primeras pruebas de campo, presentando una velocidad de  $5\text{ m/s}$ . En la segunda prueba de terreno se desarrolló en un sendero irregular el cual está conformado por arena y rocas pequeñas (ver Figura 17c). Se eligió este tipo de suelo debido a que presenta irregularidades que someten al sistema de locomoción a mayores esfuerzos al desplazarse a través de él. En este tipo de terreno se desplazó con una velocidad de  $2\text{ m/s}$ , posterior a romper la inercia inicial. Durante la prueba los ejes rotatorios presentaron un esfuerzo mayor en el giro debido a la rugosidad del terreno y el peso del propio Rover.

## 2. Prueba del Sistema de Comunicación.

Las pruebas del sistema de comunicación permitieron comprobar el enlace entre el robot y la base terrestre, así como identificar la distancia máxima de conexión de los sistemas de radiofrecuencia integrados. Para ello se realizaron dos pruebas de verificaciones: el envío y recepción de datos y la transmisión de video.

### a) Envío de datos

Para verificar la conexión y el alcance de la base terrestre se enviaron los comandos (Figura 18a) de activación de los ventiladores para enfriar el sistema de energía (Figura 18b), así como de cada elemento como son luces (Figura 18c), láser, etc. Al encender cada elemento, se comprobó la recepción de los comandos en el móvil.

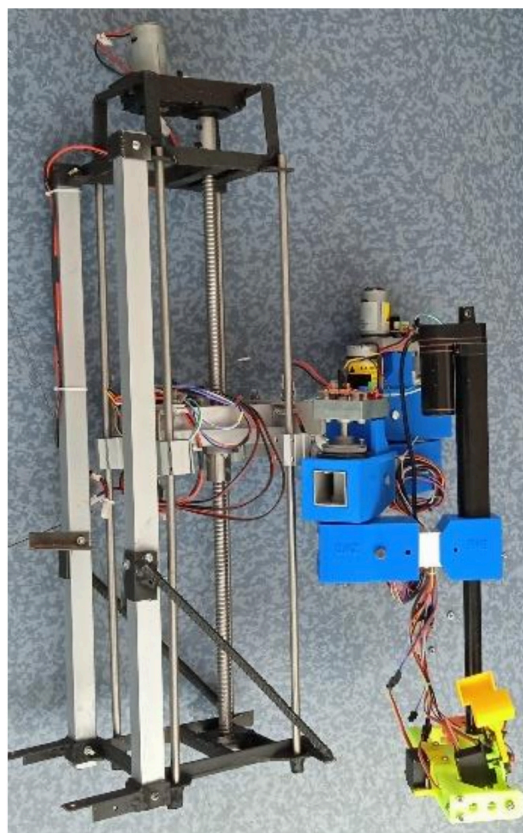


Figura 16: Construcción de brazo robótico

### b) Recepción de telemetría y video

La comunicación entre la base terrestre y Rover es bilateral, lo cual permite enviar y recibir información de forma simultánea. Al realizar las pruebas de campo, y en el momento que se realiza la conexión, la base terrestre comienza a recibir los datos de telemetría de los sensores integrados en el Rover, los cuales son: temperatura, humedad, velocidad, distancia y el estado de las baterías. Estos se despliegan en una pantalla LCD en tiempo real (Figura 19). La transmisión de comandos presentó un retardo de  $2\text{ s}$  mientras que para sistema de telemetría fue de  $4\text{ s}$  a una distancia de  $1\text{ Km}$ .

Considerando que un Rover debe realizar exploraciones en terrenos desconocidos, observar el área e identificar las zonas por donde transita es esencial para el sistema móvil, para ello, la base terrena debe recibir imágenes de video desde el móvil (Figura 20). Este sistema cuenta con dos cámaras, una cámara principal que se encuentra en la torre de video con el objetivo de poder visualizar el área, y una segunda cámara que se encuentra ubicada en el efector final para controlar de mejor manera las tareas de recolección y perforación. Para observar la imagen de la cámara principal se utiliza un monitor estándar (ver Figura 20a), y para la cámara secundaria se

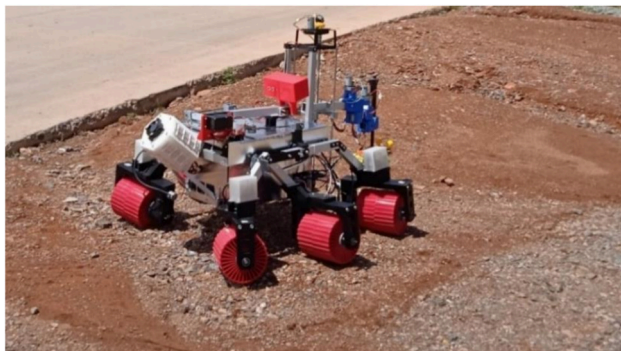




(a) Desplazamiento en terreno estructurado.



(b) Posicionamiento de los ejes rotatorios.



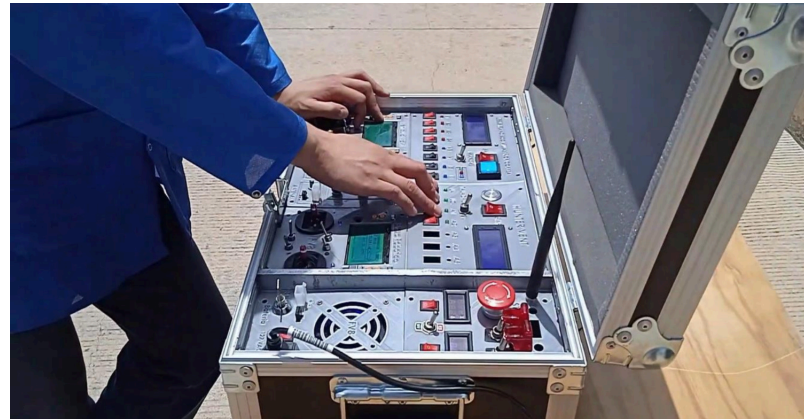
(c) Desplazamiento en terreno semiestructurado

**Figura 17:** Pruebas del Sistema de Locomoción.

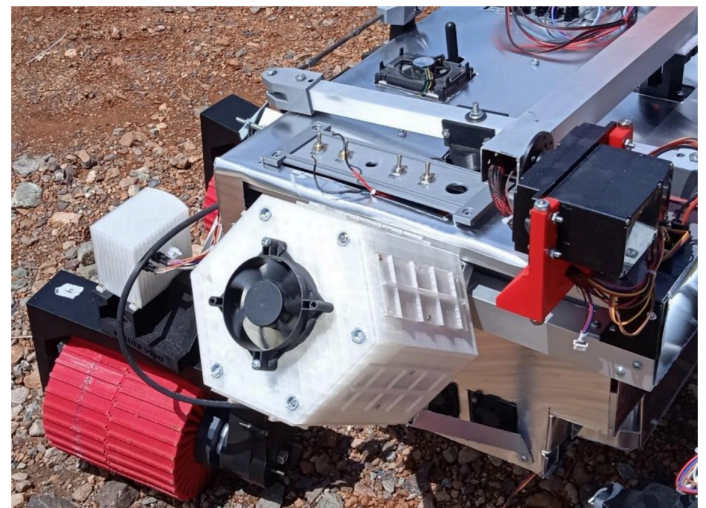
utilizan gafas FPV (por sus siglas de "First-person view") que le permite al operador una mayor concentración (Figura 20b). Para este caso, el atraso que se tuvo en la transmisión del video fue de 5 s para 1 Km.

### 3. Pruebas de Perforación y Recolección

En las pruebas del sistema de perforación y recolección



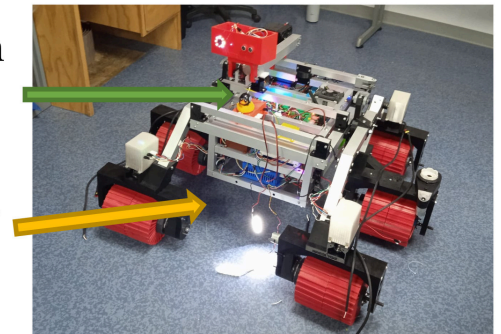
(a) Transmisión; activación de los ventiladores externos de enfriamiento.



(b) Activación del ventilador del sistema de energía.

Iluminación  
interna

Iluminación  
externa



(c) Iluminación.

**Figura 18:** Pruebas del Sistema de Comunicación; envío de comandos.

se realizaron pruebas independientes para evaluar el desempeño de cada una de las herramientas.

#### a) Prueba de recolección

La prueba de recolección nos permitió conocer la funcionalidad del sistema de pinza con cuchara bivalva. Se



Figura 19: Recepción; información del estado de las baterías del robot.

realizó el levantamiento de una roca irregular del tamaño máximo que permite la pinza, un aproximado de 5 cm. En la Figura 21 se observa como el efector se posiciona para sujetar la roca.

#### a) Prueba de perforación

La prueba de perforación permitió observar el comportamiento del brazo cuando el taladro está activado, principalmente cuando este se encuentra perforando sobre una superficie de tierra. Para ello se utilizó una broca de concreto de 3/16 in encendiendo el taladro sobre una sección de suelo rocoso, la penetración se realizó de forma lenta y progresiva, logrando una profundidad aproximada de 10 cm (Figura 22).

## IV. Discusión y conclusión

Se presenta el desarrollo de un prototipo de sistema móvil tipo Rover, el cual cuenta con un sistema de telemetría, un centro de mando portátil, un brazo robótico tipo SCARA y un sistema de dos efectores, para la perforación y recolección de muestras de suelo. El diseño modular permite reducir el tiempo de armado, y facilita el reemplazo de cada módulo ante posibles fallas errores. Este trabajo pretende ser una herramienta que permita impulsar la investigación en el sector espacial, así como en la educación en ingenierías como: Mecánica, Electrónica, Telecomunicaciones, Robótica, Mecatrónica, Control, entre muchas otras relacionadas con este tipo de proyectos.

Para la estructura se utilizó impresión 3D para la manufactura de piezas para unir eslabones del chasis, del brazo y de la suspensión. Esto permitió la construcción en menor tiempo de piezas complicadas y específicas. Entre las más importantes están los soportes de las llantas, que les permite rotar sobre su propio eje y tener un mejor desplazamiento del vehículo en lugares reducidos o con



(a) Imagen Principal en Monitor.



(b) Prueba de Video con Gafas FPV.

Figura 20: Recepción de video.

obstáculos. En las pruebas finales se observaron dos problemas principales; el primero se presentó en el sistema de suspensión Rocker Bogie, debido a que el peso del robot no quedó centrado sobre las llantas, provocando que el esfuerzo se de sobre un costado de las llantas provocando que se abra la suspensión y con riesgo de quebrarse. El segundo problema se presentó en el sistema de energía, ya que en ambientes semiestructurados el robot presentó problemas en el desplazamiento debido a que las baterías no suministran la energía necesaria para que los motorreductores generen el par necesario, problema que es fácil de resolver al colocar un número mayor de baterías o reemplazar estas con otras de mayor capacidad.

Para trabajos futuros, se sugiere hacer un mejor diseño estructural debido a que el uso de la impresión 3D no es



Figura 21: Recolectión.



Figura 22: Perforación.

aplicable en ciertas pruebas de resistencia, también en la parte de control debe agregarse un sistema de reconocimiento y procesamiento de imágenes para aumentar la autonomía.

También se pretende integrar un sistema que permita determinar la distancia de un objeto o una superficie utilizando un sistema láser pulsado garantizando que el robot pueda navegar en ambientes estrechos o con obstáculos fijos o en movimiento, además de reemplazar el sistema de video principal y el video secundario por uno de mayor resolución y de largo alcance.

Además, se pretende instalar un microcontrolador con mayor potencia de procesamiento para ejecutar instrucciones de control de mayor complejidad utilizando algoritmos de IA (Inteligencia Artificial), que le permita al prototipo autonomía en la toma de decisiones de movimiento en diferentes situaciones en campo abierto.

## V. Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro Regional de Desarrollo Espacial de la Agencia Espacial Mexicana ubicado en la ciudad de Zacatecas (CREDES-Zacatecas) y a la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ) por brindar acceso a laboratorios e infraestructura, a través de los cuales fue posible este proyecto. Además, gracias al Consejo Nacio-

nal de Ciencias, Humanidades y Tecnología (CONAHCYT) por su apoyo a través de su programa *Investigadores e Investigadoras por México*, (IxM).

## Referencias

- [1] U. d. Alcalá. *Master en industria 4.0*. 2019. URL: <https://www.masterindustria40.com/robots-master-robotica/>.
- [2] R. MILITAR. *ROBOT MILITAR*. 2019. URL: <https://www.robotmilitar.org/>.
- [3] Craig A. James et al. «Tele-operation of a mobile mining robot using a panoramic display: an exploration of operators sense of presence». En: *2011 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering* (2011), págs. 279-284. DOI: 10.1109/CASE.2011.6042427.
- [4] R. MILITAR. *Fire Fighting Robot Colossus Helps Save Notre Dame*. Abr. de 2019. URL: <https://yellowrobot.com/fire-fighting-robot-colossus-notre-dame-cathedral/>.
- [5] G. Braun F. Krebs L. Larsen y W. Dudenhausen. «Design of a multifunctional cell for aerospace CFRP production». En: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 85 (2014), págs. 17-24.
- [6] S. Hoffman B. Drake y D. Beaty. «Human exploration of Mars, Design Reference Architecture 5.0». En: *2010 IEEE Aerospace Conference* (2010).
- [7] Roboryx.com. 2019. URL: [https://www.roboryx.com/details.php?product\\_id=3&title=inuktun-maggut](https://www.roboryx.com/details.php?product_id=3&title=inuktun-maggut).
- [8] NASA. 2020. URL: <https://mars.nasa.gov/mars2020/>.