



Formato Proyectos de Investigación de Semilleros 2024

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
(Anexo 2)

**1. DATOS GENERALES**

1.1 TITULO DEL PROYECTO		
Prototipo de robot cuadrúpedo para exploración en minas subterráneas		
Jefe del Proyecto, Investigador principal	Ricardo Raúl Rodríguez Bustinza	
Grado	Doctor	
Código UNI	20018663F	Facultad: FIM
Teléfono	989730215	
Dirección	Calle Mario Florián 262 San Borja	
Distrito	San Borja	Email: <a href="mailto:robust@uni.edu.pe">robust@uni.edu.pe</a>
Facultad	FIM	
Línea de Investigación prioritaria	control avanzado, inteligencia artificial y robótica	

Co-investigador	Rhandy Pablo Cardenas Curo	
Grado	Maestría/Doctorante	
Código UNI / Documento de identidad	72663492	Facultad/Institución: Université de Technologie de Compiègne
Teléfono	+33658636285	
Dirección	Av. Amalia Puga 3470	
Distrito	San Martin de Porres	E-mail: <a href="mailto:rhandycardenasc@gmail.com">rhandycardenasc@gmail.com</a>

Co-investigador	Sergio Alonso Ortiz Pauca	
Grado	Bachiller en Ingeniería Mecatrónica	
Código UNI / Documento de identidad	75406146	Facultad/Institución: Ciencias e Ingeniería / Pontificia Universidad Católica del Perú
Teléfono	976474516	
Dirección	Jr. Victor Pantoja 290	
Distrito	Pueblo Libre	E-mail: <a href="mailto:a20163145@pucp.edu.pe">a20163145@pucp.edu.pe</a>



Estudiante coordinador	<b>Saúl Junior Nación Dueñas</b>	
Código UNI	20204045G	Facultad:FIM
Teléfono	979762382	
Dirección	Jr. Pedro Remy 163 San Martin de Porres	
Distrito	San Martin de Porres	E-mail: <a href="mailto:saul.nacion.d@uni.pe">saul.nacion.d@uni.pe</a>

Estudiante pre-grado	<b>Caleb Camargo Saavedra</b>	
Código UNI	20210011C	Facultad:FIM
Teléfono	964136821	
Dirección	Mz. R Lte 53 URb. Santa ELisa	
Distrito	Los Olivos	E-mail: <a href="mailto:caleb.camargo.s@uni.pe">caleb.camargo.s@uni.pe</a>



## **Propuesta del proyecto**

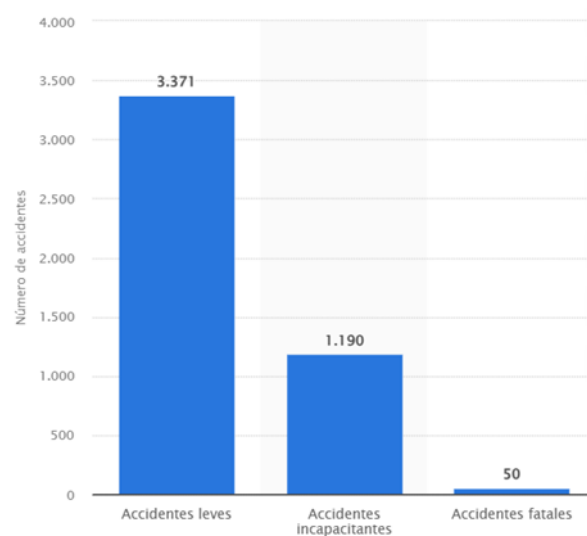
La propuesta del proyecto consiste en el desarrollo de un robot cuadrúpedo, con capacidad de ser tele operado para realizar labores de exploración en entornos subterráneos donde la integridad física del ser humano podría verse en peligro. Dentro de los trabajos de exploración se incluyen la medición de parámetros ambientales tales como la calidad del aire, cantidad de gases tóxicos y temperatura del ambiente; a su vez, el sistema robótico contará con la capacidad de realizar un mapeo de la superficie recorrida para obtener información espacial de la medición de los parámetros ambientales. Para garantizar un correcto desempeño de la propuesta, el robot contará con un diseño con materiales ligeros para obtener una mejor locomoción.

El desarrollo constará de tres etapas: en la primera etapa se usarán softwares de simulación de libre uso para la simulación del sistema robótico dentro de un entorno virtual en el cual se probarán los algoritmos que se desarrollarán para el funcionamiento tales como la percepción del entorno, comunicación entre subsistemas, tele operación y control. En la segunda etapa se tiene previsto la elaboración del hardware que incluye el diseño mecánico de las piezas, el diseño de tarjetas electrónicas para la integración de los componentes y sensores, y el ensamble del chasis. En la etapa final se realizarán las pruebas de los algoritmos desarrollados en la primera etapa, pero en un entorno de laboratorio con el robot ensamblado y se realizarán las pruebas de comunicación para la tele operación y envío de datos.

## Justificación del proyecto

El Perú es considerado un país minero en el cual la actividad minera representa aproximadamente el 10% del PBI del país y dentro de esta actividad económica, la minería subterránea cuenta con una mayoría en la cantidad de campamentos mineros que representa el 65% del total. Además, en la región países como Chile, Brasil y México ya han empezado a adoptar la minería 4.0 dentro de sus operaciones en el cual la robótica desempeña un factor fundamental. En ese sentido, el país no puede ser ajeno a la tendencia tecnológica regional y global por lo que es necesario que se implementen soluciones que sean provechosas sabiendo que somos líderes en extracción de varios minerales.

Por otro lado, desde el enfoque de la salud y seguridad en el trabajo, la actividad minera es considerada una labor de alto riesgo en el cual un accidente dentro de la unidad minera podría ser mortal y pese a los esfuerzos para implementar medidas de seguridad más rigurosas, según Statista en el 2021 se reportaron 4611 accidentes.



*Ilustración 1 Número de accidentes mineros en Perú en 2021, por tipo de víctima.  
Statista (2023)*

En ese sentido, se ve justificado el desarrollo de un sistema robótico cuadrúpedo que tenga la finalidad de monitorear las condiciones ambientales dentro de las minas subterráneas para así poder prevenir y predecir posibles accidentes y así como para también, a partir de los datos monitoreados, poder maximizar la productividad de las labores mineras.



## **Objetivo general**

Desarrollar un robot cuadrúpedo capaz de realizar labores de inspección en entornos subterráneos con el fin de mejorar la eficiencia y seguridad de las operaciones mineras. El robot deberá ser capaz de navegar de forma tele operada en terrenos irregulares, recolectar y transmitir datos, y operar en condiciones típicas de los entornos mineros.

## **Objetivos específicos**

- Diseñar y construir un robot con materiales ligeros.
- Desarrollar algoritmos de navegación tele operada y mapeo de ubicación.
- Integrar sensores para la recolección de datos relevantes para las operaciones mineras.
- Implementar sistemas de comunicación para la transmisión de los datos recolectados.

## **Antecedentes**

### **Sistemas robóticos de inspección actuales**

- **Spot**  
Robot cuadrúpedo con capacidad de movilización en distintos terrenos y mantener el equilibrio, además, puede evadir obstáculos de forma automática. Tiene aplicaciones múltiples como inspeccionar construcciones, inspeccionar plantas industriales y examinar pacientes; además, se evalúa su uso en minas y adaptarlo para realizar futuras misiones de exploración en Marte.
- **Unitree Go1**  
Es un robot cuadrúpedo ágil y robusto. Cuenta con un sistema supersensorial que proporciona una cobertura de vista completa con 5 juegos de cámaras de profundidad. La IA cuenta con una CPU de 16 núcleos + GPU (384 núcleos, 1,5 TFLOPS).
- **X30**  
El robot cuadrúpedo X30 de DEEP Robotics es un robot diseñado para realizar inspecciones en centrales eléctricas, fábricas, corredores de oleoductos, operaciones de rescate de emergencia, detección de incendios, investigaciones científicas y otras aplicaciones. Puede sortear obstáculos con agilidad y desplazarse por escaleras industriales con escalones abiertos en entornos desafiantes y cambiantes. Puede navegar y operar de manera autónoma en entornos extremos como la oscuridad, la luz fuerte, el parpadeo e incluso sin ninguna fuente de luz.

### **Sistemas inspección subterránea**

- **Sensor de gas**  
Indica la presencia de un gas específico y, en algunos casos, la concentración del gas. De acuerdo al tipo de gas se puede agrupar en dos grupos: sensores de gases combustibles, generalmente sensores catalíticos e infrarrojos y sensores de gases tóxicos, generalmente sensores electroquímicos y de semiconductores de óxido de metal.
- **Sensor de temperatura**  
También denominado termosensor, permite medir la temperatura mediante una señal eléctrica. Dependiendo de su funcionamiento existen dos tipos: termistores PTC, se señala el aumento de temperatura con una mayor resistencia y

termistores NTC, el aumento de la temperatura está basado en una reducción de la resistencia interna.

### **Evaluación del rendimiento mecánico**

El diseño del sistema de locomoción del robot cuadrúpedo no depende solo del espacio de trabajo, sino que también de medidas técnicas como maniobrabilidad, controlabilidad, condición del terreno, eficiencia y estabilidad.

Binnard [2] sugiere usar el NWC (Normalizing Work Capacity) para medir el desempeño mecánico de un robot cuadrúpedo. Este indicador permite observar la relación directamente proporcional entre NS (Normalized Speed) and PLC (Payload Capacity). En función a este indicador [1] llegó a la conclusión de que el robot TITAN-XIII and SCALF-1 tienen una mejor velocidad normalizada NS y un mejor desempeño mecánico en robots cuadrúpedos eléctricos e hidráulicos respectivamente.

Para asegurar que el robot tenga un buen desempeño es importante evaluar lo siguiente:

- **Actuadores:** Ejecución de la dinámica de marcha.
- **Estructura/Chasis:** Será necesario que el chasis sea fuerte y a la vez flexible. Es indispensable tener control de la estabilidad y tolerancia del sistema frente a distintos escenarios.
- **Sensores (Encoders, Acelerómetros, Giroscopios, Sensores de par y proximidad):** Será necesario tener un sistema que permita la calibración automática de estos dispositivos.
- **Sistemas de comunicación:** Si se le incorpora la capacidad de telemetría, será indispensable tener control de la latencia.
- **Unidad de Procesamiento de Datos:** Tiene que realizar el procesamiento de grandes cantidades de datos con el menor consumo de potencia posible y con la menor cantidad de recursos. Su principal tarea será tener el control de la dinámica de marcha.
- **Sistemas de Navegación y Percepción (GPS, LIDAR):** Se sugiere emplear Filtros Kalman y sus variantes para la estimación y corrección de errores en la percepción y navegación.



## **Hipótesis**

La implementación de un robot cuadrúpedo para labores de inspección en minería puede mejorar significativamente las operaciones mineras al aumentar la eficiencia, mejorar la seguridad y reducir los costos operativos. Este robot, programado con algoritmos de navegación y sensores para la recolección de datos importantes, será capaz de navegar de manera efectiva en terrenos irregulares y condiciones adversas típicas de los entornos mineros, evitar obstáculos, y recolectar y transmitir datos.

Estos datos, pueden proporcionar información valiosa que puede ayudar a los operadores mineros a tomar decisiones más acertadas y oportunas, lo que puede resultar en una mayor eficiencia operativa. Además, al reducir la necesidad de que los trabajadores realicen tareas de inspección en entornos potencialmente peligrosos, el robot puede ayudar a reducir la cantidad de accidentes en operaciones mineras subterráneas.

Por lo tanto, se espera que la implementación de este robot cuadrúpedo no solo mejore la eficiencia operacional y la seguridad, sino que también tenga un impacto positivo en los costos operativos, ya que puede reducir la necesidad de intervención humana en ambientes peligrosos y los costos asociados con los accidentes y lesiones en campamentos mineros subterráneos.

## **Resultados y contribuciones**

El proyecto propone el desarrollo de un robot cuadrúpedo para monitoreo e inspección en minas subterráneas. Este proyecto tiene el potencial de aportar contribuciones valiosas en el campo de la robótica y la minería.

Se espera diseñar y construir un robot cuadrúpedo eficiente, capaz de navegar de manera teleoperada en entornos subterráneos desafiantes. Se planea que el robot, equipado con sensores, pueda realizar tareas de monitoreo e inspección analizando los datos que recolecta de su entorno.

El robot podría contribuir en mejorar la seguridad de las labores de inspección reduciendo la necesidad de que los trabajadores ingresen a áreas potencialmente peligrosas.

En resumen, este proyecto tiene el potencial de aportar avances significativos en la seguridad y eficiencia de las operaciones mineras. La implementación exitosa de este proyecto podría sentar las bases para futuras investigaciones y aplicaciones de robots cuadrúpedos en una variedad de industrias y contextos.



## **Descripción técnica**

El desarrollo del proyecto se realizará una primera etapa en un entorno simulado, para esta etapa se usarán distintos softwares. Para el diseño mecánico se usarán Inventor y SolidWorks para el modelado 3D y las simulaciones de cargas y esfuerzos de robot. Para la parte de software se usará Rviz para exportar y visualizar los modelos diseñados en la parte mecánica, luego se añadirán los plugin necesarios para realizar una correcta integración con el simulador Gazebo para que el robot este listo en un entorno virtual para recibir los algoritmos que se desarrollaran en ROS2, en este software se programarán los algoritmos correspondientes a la navegación, control, tele operación y percepción.

En la segunda etapa se realizarán las pruebas en un entorno real. Para esto se necesita el desarrollo de tarjetas electrónicas usando el software Altium Designer, estas tarjetas servirán para integrar todos los sensores y la unidad de procesamiento. Luego en una Jetson Orin Nano se instalarán todos los paquetes desarrollados en la primera etapa y se procederá a ensamblar el sistema completo.

Se abordarán cuatro aspectos clave durante el desarrollo: percepción, planificación, comunicación y control. Los algoritmos de percepción permitirán al robot interpretar la transmisión de video y detectar en tiempo real elementos usando sus sensores exteroceptivos, proporcionando información acerca de los cambios en su entorno. Se desarrollarán algoritmos de planificación de trayectorias para garantizar un movimiento seguro y eficiente. Se establecerán sistemas resilientes de comunicación para la interacción con operadores humanos a distancia de manera segura en entornos denegados, facilitando la supervisión remota y la transmisión de datos. Además, se implementarán algoritmos de control para garantizar una locomoción fluida y estable del robot en diversos terrenos y condiciones operativas.

## **Metodología y enfoque**

Para este proyecto se usará la metodología VDI-2206 en el análisis y desarrollo del sistema mecatrónico. Esta metodología se centra en el enfoque sistemático y estructurado para el desarrollo de sistemas complejos, como robots, garantizando la satisfacción de los

requisitos y la gestión eficiente de riesgos. Esta metodología consta de las siguientes etapas:

### **1. Definición de objetivos y requisitos**

En esta etapa, se establecerán los objetivos del proyecto y se identificarán los requisitos del sistema en términos de funcionalidad, rendimiento y seguridad, así como los alcances que se esperan al terminar el proyecto. Se involucrarán a todas las partes interesadas relevantes, incluidos profesionales involucrados en la minería para garantizar una comprensión clara sobre las problemáticas reales en el sector.

### **2. Análisis de sistemas**

Se realizará un análisis exhaustivo de los robots cuadrúpedos existentes como el ANYmal de ANYbotics AG, el Spot de Boston Dynamics o los X20 y X30 de Deep Robotics siendo cada una de estas marcas reconocidas en la fabricación de robots cuadrúpedos en cada uno de sus continentes aplicando su tecnología en sectores como el que se está abordando y afines, también se estudiarán las tecnologías disponibles relacionadas con la robótica y la seguridad minera. Esto incluirá la evaluación de componentes como sensores LiDAR, cámaras de profundidad, sensores de gas y plataformas de procesamiento de datos como Jetson Orin Nano, y software como ROS2 y Gazebo.

### **3. Conceptualización y diseño preliminar**

Basándose en los requisitos definidos, se desarrollarán conceptos de diseño preliminares para el robot cuadrúpedo que se actualizarán en base a pruebas a lo largo del proyecto. Se considerarán aspectos como la locomoción, la percepción del entorno, la comunicación y el control.

### **4. Diseño detallado**

Se llevará a cabo el diseño detallado del robot, teniendo en cuenta aspectos mecánicos, electrónicos, de software de comunicación, control y percepción. Se realizarán análisis de tolerancia a fallos y se diseñarán sistemas de redundancia para garantizar la fiabilidad operativa en entornos mineros exigentes.

### **5. Implementación y pruebas**

Se construirá el robot cuadrúpedo y se implementará el software asociado. Se realizarán pruebas incrementales como metodología, esto implica desglosar en



módulos individuales el desarrollo del proyecto y probarlos de forma aislada e integrarlos por etapas. Esto para detectar defectos en una fase temprana, reducir la complejidad y aumentar la cobertura de las pruebas. El objetivo es cumplir con los requerimientos técnicos y de seguridad.

## **6. Validación y verificación**

Se harán pruebas en laboratorio para validar el desempeño del robot, cabe recalcar que esta sería la última fase de todas las del proyecto, y que estas fases serán estructuradas de tal manera que se pueda probar el concepto planteado. En esta fase se recopilarán datos y se realizará una evaluación detallada del cumplimiento de los objetivos planteados en la primera parte, requisitos para solucionar las problemáticas investigadas y las normativas de seguridad.

## **7. Operación**

Se escribirá un manual con información para los operadores del robot basada en funcionalidades validadas a lo largo del proyecto para garantizar una operación correcta y segura.

## **Cronograma**

[illegible]



## Referencias

- [1] Priyaranjan Biswa. (2020). Development of quadruped walking robots: A review <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447920302501>
- [2] Michael Binnard. (1995). Desing of a Small Pneumatic Walking Robot. <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/10422/37623463-MIT.pdf?sequence=2>
- [3] Abdullah Aamir Hayat (2018). Tarantula: Design, Modeling, and Kinematic Identification of a Quadruped Wheeled Robot. <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/1/94>
- [4] Yeunhee Kim. (2021). Origami Pump Actuator Based Pneumatic Quadruped Robot (OPARO). <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9374927>
- [5] Statista. (2023). Número de accidentes mineros en Perú por tipo. Recuperado de <https://es.statista.com/estadisticas/1317928/numero-de-accidentes-mineros-en-peru-por-tipo/>
- [6] Unitree. (2022). Go1. Recuperado de <https://www.unitree.com/products/go1>
- [7] Boston Dynamics. (2021). Spot. Recuperado de <https://www.bostondynamics.com/spot>
- [8] Deep Robotics. (2023). X30. Recuperado de <https://www.deeprobotics.ai/x30>

***Dr. Ing. Ricardo Rodriguez Bustinza***

[https://ctivitae.concytec.gob.pe/appDirectorioCTI/VerDatosInvestigador.do?id\\_investigador=11196](https://ctivitae.concytec.gob.pe/appDirectorioCTI/VerDatosInvestigador.do?id_investigador=11196)  
[robust@uni.edu.pe](mailto:robust@uni.edu.pe)  
989730215