

Diseño de robot móvil para detección de agentes contaminantes, con mapeo 3D del terreno para prevención de accidentes en yacimientos mineros subterráneos

Aspilcueta Romero, Shariff Kiara

Escuela Profesional de Ingeniería Mecatrónica - Universidad Ricardo Palma
Lima, Perú

Shariff.aspilcueta@urp.edu.pe

Abstract– The present thesis titled "Design of a mobile robot for the detection of pollutants, with 3d terrain mapping for accident prevention in subway mining sites", composed mainly by the objective of designing and implementing a mobile robot for the collection of pollutants in the air and soil, implemented with a mapping system in order to perform an analysis to choose the necessary measures for the prevention of accidents in subway mines. It was successfully implemented with the My-Rio 1900 embedded system that was able to collect data from the 6 pollutant gas sensors and analyze the information provided by the Lidiar sensor and then process it to build a 3D image of the subway mine. All this information was collected and transmitted to a computer where it was reflected in the graphs provided by LabVIEW, which allowed taking accurate and precise preventive measures. As a result of this thesis, a mobile robot was implemented to detect contaminating agents, with 3D mapping of the terrain for accident prevention, which will allow the number of accidents in mines to decrease, giving greater peace of mind to workers.

Key words: Embedded System, Mobile Robot, 3D Mapping, Toxic Gases.

I. INTRODUCCIÓN

Según la Organización Internacional del Trabajo - OIT (2018), menciona que la minería es una actividad económica donde se emplea cerca del 1% de la fuerza laboral a nivel internacional. Sin embargo, es una de las actividades más peligrosas para el trabajador porque se calcula que genera el 8% de los accidentes mortales a nivel internacional.

Según el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería - Osinergmin (2020), el Perú cuenta con una excelente ubicación geográfica gozando de una vasta y variada riqueza geológica por explorar y explotar. Por ello, durante esta última década, la minería ha tomado un papel más importante en la economía del país, esto se vio reflejado en el anuario Minero realizado en 2020 por Osinergmin, donde se cataloga al Perú a nivel mundial como el cuarto principal yacimiento más grande del país y el segundo país con una mayor exportación de cobre, teniendo una participación del 11% al nivel mundial. Sin embargo, esta actividad tiene muchos problemas relacionados con el impacto ambiental y la salud ocupacional

que puede causar sus actividades diarias, afectando a un gran número de personas. De acuerdo con Osinergmin (2022), en su Observatorio Energético Minero se presentó el número de las supervisiones realizadas y el número de víctimas en los últimos 15 años donde se muestra que en el año 2021 se presentó alrededor de 56 accidentes mortales, siendo un número mayor a los años anteriores, en el año 2020 fueron de 18, mientras en el año 2019 fue de 25. Así mismo, en el 2021, se tuvieron que realizar 429 supervisiones para poder verificar que el ambiente sea el más adecuado para ejercer aquella actividad.

Por los motivos explicados anteriormente, este trabajo de tesis presenta el diseño de un robot móvil para la detección de agentes contaminantes, con mapeo del terreno para la prevención de accidentes en yacimientos mineros subterráneos.

II. MARCO CONCEPTUAL

A. Robótica móvil

La robótica móvil ha evolucionado de forma exponencial a lo largo de los años, siendo, actualmente, considerado como un área de la tecnología avanzada capaz de resolver problemas de alta complejidad (Bermúdez, 2002). Este se define como un “dispositivo de transporte automático, es decir, una plataforma mecánica dotada de un sistema de locomoción capaz de navegar a través de un determinado ambiente de trabajo, dotado de cierto nivel de autonomía para su desplazamiento portando cargas” (Bambino, 2008).

Su finalidad está basada en posibilitar el trabajo en ambientes no estructurados y en condiciones cambiantes, lugares de difícil acceso para el hombre o donde la suciedad, las sustancias presentes o las condiciones climáticas hacen imposible su presencia (Siegwart, Nourbakhsh y Scaramuzza, 2011).

Además, se caracteriza por estar implementado con sensores que permiten monitorear a cada momento su posición relativa de su punto de origen y su punto de destino, su control normalmente es de lazo cerrado y su desplazamiento es

proporcionado mediante dispositivos de locomoción, tales como ruedas, patas, orugas, etc. (Barrientos y García, 2007).

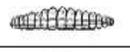
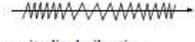
Type of motion	Resistance to motion	Basic kinematics of motion
Flow in a Channel 	Hydrodynamic forces	Eddies 
Crawl 	Friction forces	Longitudinal vibration 
Sliding 	Friction forces	Transverse vibration 
Running 	Loss of kinetic energy	Oscillatory movement of a multi-link pendulum 
Jumping 	Loss of kinetic energy	Oscillatory movement of a multi-link pendulum 
Walking 	Gravitational forces	Rolling of a polygon (see figure 2.2) 

Fig.1 Tipos de locomoción en un robot móvil

B. Modelo de Cintas de Orugas

Mientras que el modelo diferencial general supone un perfecto contacto de rodadura entre las ruedas y el suelo, no sucede lo mismo con el modelo de cintas orugas ya que tiene una mayor superficie de contacto entre las ruedas y el suelo, requiriendo el deslizamiento de ruedas para cambiar la dirección, para un análisis más detallado, ver la figura 2. Este aspecto es importante, porque este robot se desplazará con mayor facilidad en terrenos más accidentados.

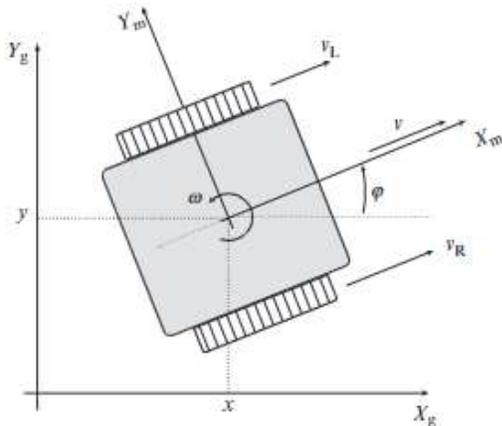


Fig.2 Esquema de un modelo con cintas orugas

C. Modelo cinemático de robot diferencial con cintas

Un modelo se define como un conjunto de ecuaciones diferenciales matemáticas que representan el comportamiento de un robot. Teniendo en cuenta aquello, el modelado cinemático y dinámico constituye una cuestión clase relacionada con este tipo de modelo de robot móvil, con el objetivo de diseñar algoritmos de planificación y controladores de movimiento para estimar la localización del

robot, para su implementación y simulación de otros softwares. (González R., Rodríguez F. y Guzmán J., 2014)

Como se ha introducido anteriormente, cuando un robot móvil opera en condiciones fuera de la carretera, el problema de modelado requiere estudiar y analizar varios fenómenos que afectan a la movilidad y controlabilidad del robot. En este sentido, el deslizamiento constituye uno de los fenómenos más importantes en relación con el terreno del robot.

Entonces conociendo que $ie > 0$, podemos resaltar que la velocidad lineal de las cintas deslizantes es mayor a la velocidad del robot móvil. De tal manera, en la figura 9, se muestra los diferentes tipos de desplazamiento que este robot puede realizar; trayectorias curvas o rectas, teniendo siempre un deslizamiento longitudinal entre las cintas y el terreno donde se desplazaría. (González R., Rodríguez F. y Guzmán J., 2014)

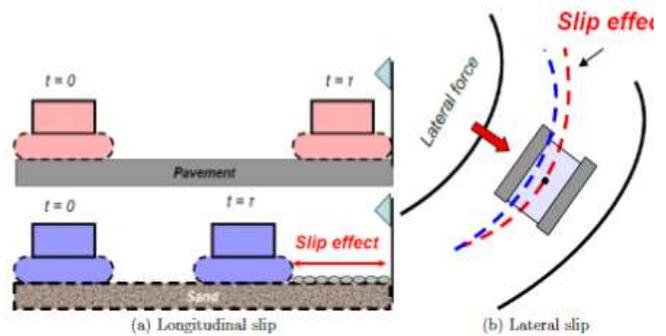


Fig.3 Diagrama del desplazamiento de un robot con cintas deslizantes

D. Agentes contaminantes en la minería

Debemos de saber que, los agentes contaminantes tóxicos están conformados por materia no viva que se presenta de manera de gases, vapor, líquidos, humo y mezclas. Estos agentes afectan a las vías respiratorias, siendo esta una de las vías más importantes donde entrar agentes contaminantes. (UOCRA, 2009)

En toda actividad minera, se produce contaminación con el medio ambiente, donde irá varían la intensidad de este, dependiendo de las actividades y medidas preventivas tome la empresa.

E. Navegación autónoma

El sistema de navegación se concibe con la idea de dotar al robot con la capacidad para ir a puntos específicos del entorno o si se desea, a cualquier punto del entorno de trabajo. Para esto, el robot debe conocer el entorno en el que se mueve, evadir obstáculos estáticos mediante la generación de una trayectoria autónoma y segura al punto de navegación establecido. Adicionalmente, debe ser capaz de detectar cualquier obstáculo dinámico no representado en su mapa de navegación.

Con toda esta información recopilada, el algoritmo de navegación debe generar los comandos de movimientos

idóneos para que el robot pueda navegar segura y eficazmente en el entorno donde se encuentra. De esta manera se conforma y desarrolla el sistema de navegación programado para los robots móviles del Laboratorio LabFabEx de la Universidad Nacional de Colombia, basados en el algoritmo de navegación Hector Navigation de los mismos desarrolladores de la técnica de localización y mapeo simultáneo Hector SLAM.

Los mapas o representaciones del entorno son importantes en la robótica móvil debido a su obligatorio uso para tareas de navegación, actualización y exploración del entorno mismo. En la navegación de robots móviles puede ser muy útil el uso de planos de los espacios donde se supone navegará y actuará el robot, sin embargo, estos mapas o planos tienen la gran limitante de que muchas veces las edificaciones no tienen las dimensiones ni la disposición final que se encuentra en los planos, además, los mapas o planos de las edificaciones no tienen presente ni en cuenta el mobiliario o disposición interna de los mismos dentro de los espacios.

F. Planeado de Trayectorias

Se reconoce a la planeación de trayectorias como la búsqueda de una sucesión de posiciones de un robot que permiten llevarlo de un estado inicial a uno final, entendiéndose como estado a la descripción de la ubicación del robot referenciada a un marco absoluto generalmente expresada por la combinación de las coordenadas cartesianas del centro del robot y la posición angular del eje principal de éste. La configuración que adquiere la trayectoria se define por la distribución de los obstáculos a lo largo de todo el ambiente de trabajo y por supuesto de la geometría del robot, así como de sus capacidades del movimiento (Yamashita et al., 2003).

De esta manera, la topología del ambiente del trabajo, restringirá el espacio libre de obstáculos por el cual se pueden expresar las posibles trayectorias para alcanzar el estado final deseado. Generalmente se recurre a discretizar la presentación del espacio en el ambiente de trabajo con lo que se extrae una representación segura, es decir, se tendrá garantía que el espacio libre podrá ser ocupado por el robot sin riesgo de colisión, por lo que es necesario que tal discretización se haga en relación a las características geométricas tanto del robot como de los obstáculos (Sugar y Kumar, 2001).

La planeación de trayectorias puede realizarse de una forma dinámica, considerando la posición actual del vehículo y los puntos intermedios de paso definidos en la planeación de la ruta. La definición de la trayectoria debe tener en cuenta las características cinemáticas del vehículo, por ejemplo: en vehículos con rueda y tracción convencional, interesa definir trayectorias de curvatura continua que pueden ejecutarse con el menor tiempo posible (Sugar y Kumar, 2001).

III. DESARROLLO DE LA SOLUCION

A. Planteamiento del proyecto

En la figura 12 se muestra el diagrama mecatrónico de control con los distintos sensores y controladores involucrados en el funcionamiento del robot móvil. Como el centro de control del sistema, se encuentra la placa MyRio 1900, que se encarga de ejecutar el análisis y recolección de información por el software y entregándola de una manera que pueda ser leída desde diferentes campos de la ciencia.

Este robot puede determinar el nivel de toxicidad de los gases que se puede encontrar en una mina subterránea, donde al reconocer el nivel de peligro, el software brinda recomendaciones que se debe de tomar en cuenta a la hora de realizar una exploración. Así mismo, el sistema de control contiene un sensor que realiza un mapeo 3d de la zona, brindando información al usuario para conocer las características geográficas y tomar las medidas preventivas correspondientes.



Fig.3 Diagrama mecatrónico de un robot móvil autónomo

El desarrollo de los sistemas involucrados en el robot móvil para la detección de gases tóxicos y mapeo 3d de minas subterráneas para la toma de medidas preventivas. En primer lugar, se tuvo en consideración el diseño del sistema locomotor del robot, tomándose diversas consideraciones previas de diferentes trabajos anteriores, una vez planteado aquello se tuvo en cuenta las dimensiones de este robot y sus características necesarias que posee el robot móvil. Una vez, obtenido la idea preliminar, se realizó el diseño con las anotaciones anteriores para luego realizar la digitalización de las piezas y su ensamblado.

Después, se realizó la selección de variables ambientales necesarias para el análisis, y luego se escogió los sensores más adecuados para el sistema. Teniendo en cuenta esto, se implementó del sistema electrónico. Al tener listo el sistema electrónico, se pudo diseñar el sistema eléctrico para observar que características necesitaba el robot móvil y sus

requerimientos de alimentación, haciendo posible la alimentación completa del robot.

Con el diseño del sistema electrónico, se implementó los tres sistemas y dando pie a realizar la configuración y programación en LabVIEW, definiendo los parámetros que el robot posee. Por último, se realizó las pruebas en campo y modificándose los errores que se obtuvieron, validando los resultados.

B. Ejecución del proyecto



Fig.4 Flujograma del desarrollo de la solución propuesta

En primera instancia de la figura anterior, tenemos la introducción, donde mediante una lluvia de ideas y buscando referencias externas escogeremos los sistemas que debe integrar el robot móvil autónomo.

El primer sistema es el de locomoción, en este se diseña un controlador compatible y que presente mejor respuesta con el motor seleccionado, esto permite un desplazamiento estable del robot. Además, se diseña las orugas en un software de diseño 3D con los parámetros deseados.

Luego se diseña el compartimiento en el software de diseño 3D – SolidWorks. Este presenta dimensiones adecuadas para poder desplazarse en terrenos rocosos.

En la parte del software, el sistema de evasión se da por los resultados obtenidos por los sensores escogidos previamente, recordando que también se implementa un sensor para mapear la ruta del robot móvil. Después, para la redirección, por medio de la programación de Python se programa un algoritmo para redireccionar el robot móvil tras comparar fotografías tomadas de su entorno.

Para el panel de control donde se ubica el MyRio 1900, la cámara y demás, es ubicado en la central del robot. En la parte posterior de este, se coloca la antena para la comunicación por radiofrecuencia entre el robot y el supervisor encargado. Estos dos se comunican por medio de un interfaz amigable que recibe y transmite datos a tiempo real. Después de implementar todos estos componentes se procesa a obtener los resultados.

IV. ANALISIS DE RESULTADOS

En estas pruebas se evaluó los resultados obtenidos en las pruebas realizadas para la funcionalidad definida dentro del alcance del robot para la detección de gases tóxicos, con mapeo 3d del terreno para prevención de accidentes en yacimientos mineros subterráneos.

Los resultados obtenidos en cada una de las pruebas planteadas, son indicativos del eficiente diseño realizado, sirviendo de referencia en cuanto al cumplimiento de los objetivos propuestos, confirmando la problemática planteada.

A. Pruebas del proyecto

1) Prueba de Fuerza del Sistema Mecánico

Para realizar la prueba de fuerzas sobre el sistema mecánico se usó el software de SolidWorks, que permitió realizar un análisis de elementos finitos, el cual se basa en una técnica de simulación por computadora donde se aplican diversas fuerzas sobre el diseño del chasis para determinar un análisis estructural permitiendo la determinación de efectos como: las deformaciones, estiramientos o estrés.

Esta prueba se hace con la finalidad de poder cumplir con uno de los objetivos planteados en la presente tesis, el diseñar un sistema mecánico robusto y potente para realizar la navegación en condiciones geográficas rocosas. Por ello, este software permitió conocer las condiciones que se encontraría el chasis en determinadas situaciones donde se aplique fuerzas externas.

2) Prueba de precisión de los sensores de Gases contaminados

La segunda prueba a realizar fue determinar la precisión de la toma de valores realizados por los 6 sensores de los gases tóxicos. En esta prueba se usó el software de LabVIEW porque los datos se presentarán en esta plataforma mediante un gráfico. En la siguiente figura se podrá observar la interfaz del programa.

La prueba se realizó con la finalidad de que el robot móvil sea capaz de medir las condiciones ambientales con una precisión alta, para ello, se hizo la toma de los valores de un determinado lugar con artefactos profesionales y a su vez, se tomaron los diferentes niveles de contaminación de los distintos gases con el circuito planteado, para después compararlo.

B. Resultados del proyecto

1) Resultados de la Prueba de Fuerza del Sistema Mecánico

En la prueba uno, se verificó que los cálculos realizados para el diseño de la parte mecánica estén funcionados y trabajando como se esperaba. En primer lugar, se tuvo que verificar el ensamblaje del mecanismo diseñado, teniendo

como prioridad que las cintas deslizantes estén sujetas a los eslabones correspondientes. Tras aquello, se realizó el análisis de elementos finitos, donde se aplicaron fuerzas externas equivalentes a golpes en diferentes intensidades. En la figura 4, se muestra el resultado final de un análisis de elementos finitos, brindando la información necesaria para conocer el estado de la estructura tras las fuerzas aplicadas.

Este análisis, da como resultado que el diseño del chasis del robot móvil es el adecuado, así como la elección del material que fue la plancha de aluminio, porque las fuerzas aplicadas no logran deformar en gran medida el armazón del robot dando como indicativo que el diseño es capaz de proteger al circuito electrónico de choques o algún derrumbe que podría ocurrir dentro de un yacimiento minero subterráneo.

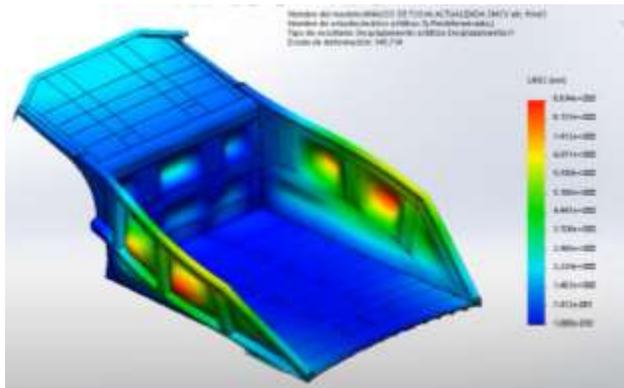


Fig.5 Referencia del Análisis de Elementos Finitos

2) Resultados de Prueba de precisión de los sensores de Gases contaminados

En la prueba dos, se verificó la precisión de la toma de los valores por los 6 sensores escogidos para medir los distintos niveles de contaminación de los gases. Se comparó los valores recogidos por los instrumentos profesionales y los valores escogidos por el circuito diseñado en esta presente tesis. Teniendo como resultado, una precisión alta, brindando la seguridad que los sensores escogidos son los correctos, ya que, la toma de medidas preventivas se basa en esta información recopilada.

V. CONCLUSIONES

✓ Se logró diseñar y simular que el sistema mecánico de un robot detector de gases contaminados con mapeo 3d sea robusto para poder desplazarse en condiciones geográficas rocosas dentro de un yacimiento minero subterráneo, se realizó pruebas en SolidWorks para el análisis de elementos finitos para el chasis del robot móvil, dando como resultado una deformación de 10 mm tanto como en la estructura como en las cintas deslizantes, debido a la elección del material que fue plancha de aluminio.

✓ Se logró diseñar el sistema de sensores de gases que permite medir las condiciones ambientes de una mina subterránea, enfocándose en 6 gases tóxicos más presentes en este tipo de lugares, los valores tomados por el sistema electrónicos se mostraron en el software de LabVIEW. Además, se evaluó nivel de precisión de la recolección de información al compararla con datos obtenidos de instrumentos profesionales donde se obtuvo precisión mayor que el 98% en la toma de valores de los diferentes gases

RECOMENDACIONES

Se recomienda que los circuitos eléctricos y electrónicos que constituyen al robot móvil, ya tengan un lugar predeterminado en el chasis del robot, de esta forma, poder anclarlo a este. Además, se recomienda para futuras investigaciones un diseño de chasis más liviano, las divisiones dentro del chasis podrían ser implementado con una sobre base de impresión 3D, disminuyendo el peso del robot.

Se recomienda siempre calibrar los sensores electrónicos antes de cualquier implementación para evitar tomar valores de manera errónea. De esta manera. Para futuras investigaciones, es aconsejable que se pueda ampliar las variables que se censa para tener un panorama más amplio del ambiente, para que las tomas de medidas sean más precisas.

REFERENCIAS

- [1] Cabrera A. & Delgado G. (2014). Diseño y construcción de un robot para mapeo y exploración de minas subterráneas. Universidad del Uzuay. Cuenca, Ecuador.
- [2] EMIS (2022) Consorcio de ingenieros ejecutores mineros S.A. Recuperado de: https://www.emis.com/php/company-profile/PE/Consorcio_De_Ingenieros_Ejecutores_Mineros_SA_es_3934866.html
- [3] Klancar G., Zdesar A., Blazic S. y Skrjanc I., (2017) Wheeled Mobile Robotics. Editorial Butterworth-Heinemann
- [4] Glöde (2021) “Autonomous Control of a Mobile Robot with Incremental Deep Learning Neural Networks” Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
- [5] González R., Rodríguez F. y Guzmán J., (2014) Autonomous Tracked Robots in Planar Off -Road Conditions. Editorial Hill
- [6] Miao (2009) Robot Path Planning in Dynamic Enviroments using a Simulated Annealing Based Approach. Queensland University of Technology. Brisbane, Australia.
- [7] Ministerio de Energía y Minas (2021) Anuario Minero 2021. Lima, Perú. Editorial Oficina de Imagen Institucional y Comunicaciones

- [8] Ministerio de Energía y Minas (2022). Estadística de accidentes mortales en el sector minero., Recuperado de: https://www.minem.gob.pe/_estadistica.php?idSector=1&idEstadistica=12464
- [9] Muñoz C. (2019) Diseño e implementación de un robot móvil basado en tecnologías de teleoperación open-source para la toma de acciones de seguridad preventivas e inmediatas en casos de accidentes en minas subterráneas. Universidad Ricardo Palma. Lima, Perú.
- [10] Muñoz J. (2019) Desarrollo de un sistema de exploración y mapeo en tres dimensiones para un robot móvil. Universidad Tecnológica del Perú. Lima, Perú.
- [11] Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (2022) Observatorio Energético Minero. Recuperado de: <http://observatorio.osinergmin.gob.pe/>
- [12] Organización Internacional del Trabajo (2022) La minería: un trabajo peligroso. Recuperado de: https://www.ilo.org/safework/areasofwork/hazardous-work/WCMS_356574/lang--es/index.htm
- [13] Palma D. (2019) “Prototipo robótico de inspección y adquisición de datos en la pequeña minería” Universidad Andrés Bello. Chile.
- [14] Siegwart R. y Nourbakhsh I. (2004) Autonomous Mobile Robots. Editorial Mit Publisher Madrid, España: Editorial Dextra.