

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION
FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS
ESCUELA DE FORMACION PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS



T E S I S

**Optimización del proceso de calibración del espesor de shotcrete
mediante el uso de un sistema neumático en el robot lanzador en
labores subterráneas en la unidad minera Cerro Lindo**

Para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autor:

Bach. Zandro Elmer VILLAVICENCIO CÁRHUAZ

Asesor:

Mg Silvestre Fabián BENAVIDES CHAGUA

Cerro de Pasco - Perú – 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION
FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS
ESCUELA DE FORMACION PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS



T E S I S

**Optimización del proceso de calibración del espesor de shotcrete
mediante el uso de un sistema neumático en el robot lanzador en
labores subterráneas en la unidad minera Cerro Lindo**

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Dr. Agustin Arturo AGUIRRE ADAUTO
PRESIDENTE

Mg. Vicente Cesar DAVILA CORDOVA
MIEMBRO

Mg. Nelson MONTALVO CARHUARICRA
MIEMBRO



UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

Facultad de Ingeniería de Minas

Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas

"Año de la Recuperación y Consolidación de la Economía Peruana"



INFORME DE ORIGINALIDAD N° 041-2025

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión ha realizado el análisis con exclusiones en el Software Turnitin Originality, que a continuación se detalla:

Presentado por:

Bach. VILLAVICENCIO CÁRHUAZ Zandro Elmer

Escuela de Formación Profesional

Ingeniería de Minas

Tipo de trabajo:

Tesis

Título del trabajo

"Optimización del Proceso de Calibración del Espesor de shotcrete mediante el uso de un Sistema Neumático en el robot lanzador en labores subterráneas en la unidad minera Cerro Lindo"

Asesor:

Mg. Silvestre Fabian BENAVIDES CHAGUA

Índice de Similitud: **3 %**

Calificativo

APROBADO

Se adjunta al presente el informe y el reporte de evaluación del software similitud.

Cerro de Pasco, 7 de noviembre de 2025.

Sello y Firma del responsable
de la Unidad de Investigación

DEDICATORIA

A mi familia, por ser el pilar fundamental en cada paso de mi vida.

Agradezco su amor incondicional, su apoyo incansable y su fe en mí, incluso en los momentos más desafiantes.

En especial, a mi hijo, mi mayor motivación y la razón por la que nunca dejé de esforzarme. Este logro es tan suyo como mío.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más profundo agradecimiento a mis docentes, compañeros de estudio y colegas de profesión, quienes, con sus conocimientos, consejos y compañía, enriquecieron este proceso de formación.

A mis amigos del sector minero, gracias por su compromiso, experiencia y valioso aporte durante el desarrollo de esta investigación; su dedicación en el día a día ha sido una fuente constante de aprendizaje y admiración.

A mis padres, por ser mi ejemplo de perseverancia, responsabilidad y principios sólidos; sus enseñanzas han guiado cada una de mis decisiones a lo largo de este camino.

RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo optimizar el proceso de calibración del espesor del shotcrete en labores subterráneas de la Unidad Minera Cerro Lindo mediante la implementación de un sistema neumático automatizado integrado en el robot lanzador. Actualmente, el proceso tradicional manual expone a los operadores a condiciones inseguras, es lento e impreciso. La propuesta técnica consiste en un porta calibrador neumático que permite la colocación automática, rápida y precisa de calibradores sin exponer al personal a la línea de fuego.

El estudio se desarrolló mediante un diseño cuasi-experimental con enfoque cuantitativo, comparando frentes donde se aplicó el sistema neumático con frentes donde se utilizó el método manual. Los resultados demostraron una reducción significativa del tiempo de calibración (59.09 %), incremento en la precisión del espesor proyectado, y eliminación de la exposición directa al riesgo. Asimismo, se evidenció la adaptabilidad del sistema al entorno operativo subterráneo, con aceptación positiva por parte del personal técnico.

La implementación del sistema propuesto representa un avance en eficiencia, seguridad y control de calidad en el sostenimiento con shotcrete. Se recomienda su aplicación estandarizada en operaciones subterráneas similares.

Palabras clave: shotcrete, calibración, sistema neumático, robot lanzador, seguridad operativa.

ABSTRACT

This thesis aims to optimize the process of shotcrete thickness calibration in underground workings at Cerro Lindo Mining Unit through the implementation of an automated pneumatic system integrated into the shotcrete robot. The current manual method exposes operators to hazardous conditions, and it is both slow and inaccurate. The proposed solution consists of a pneumatic calibrator holder that enables fast, automatic, and precise placement of gauges without exposing personnel to the line of fire.

The study followed a quasi-experimental, quantitative design comparing workplaces using the pneumatic system with those using the manual method. Results showed a significant reduction in calibration time (59.09%), increased accuracy in applied thickness, and complete elimination of direct operator exposure. The system also proved adaptable to underground operating environments, receiving positive feedback from technical staff.

The implementation of the proposed system constitutes a meaningful improvement in efficiency, safety, and quality control of shotcrete support. Its standardized application is recommended in similar underground operations.

Keywords: shotcrete, calibration, pneumatic system, robotic arm, operational safety.

INTRODUCCIÓN

Para iniciar, la actividad de la minería subterránea se presenta como una de las tareas más desafiantes y peligrosas en el ámbito minero, especialmente en lo que respecta al sostenimiento de las excavaciones subterráneas, un aspecto clave para proteger a los trabajadores y mantener la estabilidad estructural. Entre las técnicas que se utilizan en minería subterránea es el concreto proyectado ó shotcrete consolidándose como una solución altamente efectiva para estabilizar el macizo rocoso. Sin embargo, su desempeño depende en gran medida del espesor aplicado, ya que de ello dependen la resistencia y la durabilidad del sostenimiento. En mina Cerro Lindo el control de espesor del shotcrete se realiza de manera manual, exponiendo a los trabajadores a diferentes riesgos. Además de ser un proceso lento, esta práctica evidencia variaciones en la precisión y afecta la eficiencia general del proceso. Con el propósito de mejorar la seguridad y la calidad del trabajo, esta investigación plantea incorporar un sistema neumático automatizado en los robots lanzadores. La idea es optimizar la calibración del espesor, logrando aplicaciones más exactas y reduciendo la exposición del personal en un shotcrete fresco. El estudio busca evaluar la viabilidad técnica y operativa de esta propuesta, comparando los resultados del sistema automatizado con los del método manual en términos de tiempo de aplicación, exactitud del espesor y nivel de riesgo. Se espera que la automatización permita acelerar las labores, mejorar la confiabilidad de las mediciones y fortalecer la seguridad de los trabajadores. Mediante un diseño cuasi experimental y la toma de datos en campo, se pretende demostrar que el uso del sistema neumático representa una alternativa efectiva, precisa y segura, con potencial para replicarse en otras operaciones subterráneas, contribuyendo así al avance tecnológico y a la sostenibilidad de la minería moderna.

Referente a los costos operativos este estudio toma como referencia diversas experiencias previas, entre ellas las desarrolladas en la mina Cerro Lindo, con el

propósito de analizar las causas que originan diferencias en los costos y rendimientos durante las etapas de producción, transporte y sostenimiento con shotcrete.

El contenido del trabajo se desarrolla en cuatro capítulos:

En el primer capítulo, se plantea el problema central, relacionado con la necesidad de optimizar el sostenimiento con shotcrete para reducir los costos actuales. También se presentan los objetivos del estudio, su justificación, las preguntas de investigación y los alcances definidos, haciendo especial énfasis en las condiciones de trabajo observadas y en los resultados que se espera alcanzar.

El segundo capítulo aborda el marco teórico, incluyendo una descripción de los métodos de sostenimiento empleados, las técnicas de aplicación del shotcrete, las características geológicas de la mina, sus reservas, la producción anual y el diseño del método de explotación. A partir de distintas fuentes revisadas reinterpretadas para este contexto se analizan las fortalezas y debilidades del proceso actual, concluyendo con la definición de las variables e hipótesis que orientan el estudio hacia una mejora en la eficiencia y la reducción de costos.

El tercer capítulo describe la metodología aplicada, detallando el tipo, nivel y diseño de investigación, junto con las técnicas utilizadas para recolectar y analizar la información. Este enfoque busca reflejar la realidad operativa de la mina, utilizando datos de campo y observaciones directas.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos, que incluyen las simulaciones del proceso de proyección del shotcrete por vía húmeda, el análisis de los costos asociados a cada etapa y las conclusiones del presente estudio. Así mismo las principales propuestas destacan la creación de un laboratorio de control de calidad, capacitaciones específicas para los operadores de robots.

En síntesis, el estudio propone mejorar el sostenimiento con shotcrete en la Unidad Minera Cerro Lindo mediante un sistema neumático automatizado que refuerce la seguridad, precisión y eficiencia del proceso. Los resultados obtenidos demuestran

su viabilidad técnica y su potencial para modernizar las operaciones subterráneas, impulsando el avance tecnológico en la minería.

INDICE

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN	
INDICE	

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1. Identificación y determinación del problema	1
1.2. Delimitación de la investigación	2
1.3. Formulación del problema	12
1.3.1. Problema general	12
1.3.2. Problemas específicos	13
1.4. Formulación de objetivos	13
1.4.1. Objetivo general	13
1.4.2. Objetivos específicos	13
1.5. Justificación de la investigación	13
1.6. Limitaciones de la investigación	14

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes de estudio	16
2.2. Bases teóricas – científicas	22
2.2.1. Optimización del Proceso de Calibración del Espesor de shotcrete	22
2.2.2. Uso del Sistema Neumático en el robot lanzador	34
2.3. Definición de términos básicas	47
2.4. Formulación de hipótesis	48
2.4.1. Hipótesis general.....	48

2.4.2. Hipótesis específica	48
2.5. Identificación de variables	49
2.6. Definición operacional de variables e indicadores	50

CAPITULO III

METODOLOGIA Y TECNICAS DE INVESTIGACION

3.1. Tipo de investigación	51
3.2. Nivel de investigación	51
3.3. Métodos de investigación	52
3.4. Diseño de investigación	52
3.5. Población y muestra	52
3.6. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos	52
3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación	53
3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	53
3.9. Tratamiento estadístico	53
3.10. Orientación Ética Filosófica y Epistémica	54

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo	55
4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados.....	56
4.3. Prueba de hipótesis	60
4.4. Discusión de resultados.....	63

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ANEXOS

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Composición típica del shotcrete vía húmeda (diseño referencial)</i>	30
Tabla 2 <i>Propiedades técnicas del material lanzado</i>	30
Tabla 3 <i>Matriz de Operalización</i>	50
Tabla 4 <i>Comparación de Calibración entre el Método Manual y Neumático</i>	57
Tabla 5 <i>Cuadro Comparativo Calibración Manual vs Neumática</i>	61

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Mapa de Ubicación de U.M. Cerro Lindo en la Región de Ica.....</i>	3
Figura 2	<i>Geología Regional de la Unidad Minera Cerro Lindo</i>	5
Figura 3	<i>Columna Estrategicas.....</i>	7
Figura 4	<i>Geologia del Yacimiento Cerro Lindo Nv. 1820</i>	10
Figura 5	<i>Equipo Robot Lanzador Spm 4210 Wetkret (Putzmeister).....</i>	23
Figura 6	<i>Equipo Robot Lanzador Alpha 30 (Normet)</i>	25
Figura 7	<i>Equipo Camión Mezclador (Putzmeister)</i>	27
Figura 8	<i>Sostenimiento con Shotcrete con Robot Lanzador.....</i>	32
Figura 9	<i>Instrumento de recolección de datos.....</i>	61

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1. Identificación y determinación del problema

Las operaciones en minas subterráneas requieren de una atención especial al sostenimiento de las excavaciones, ya que de esto depende la estabilidad del terreno como la seguridad de los trabajadores y la continuidad operativa de la mina. En el sostenimiento con shotcrete vía húmeda, se ha posicionado como una de las alternativas más efectivas debido a su capacidad para adaptarse a diferentes condiciones geológicas y ofrecer una solución rápida y resistente frente a la inestabilidad de las galerías. Su uso contribuye directamente a proteger a los trabajadores y mantener la integridad estructural de las labores subterráneas.

No obstante, la efectividad del sostenimiento con shotcrete depende en gran medida de aplicar con el espesor requerido, conforme a los parámetros establecidos por el área de geomecánica para asegurar su resistencia y durabilidad. En la actualidad, la verificación del espesor se realiza de forma manual, utilizando calibradores que son colocados al término del sostenimiento. Si bien este método cumple la función, presenta serios inconvenientes. Por un lado, los trabajadores deben acercarse al robot lanzador y shotcrete fresco exponiéndose a riesgos significativos que podría desencadenarse en accidentes

graves. Así mismo la colocación manual de los calibradores puede llevar a errores de alineación, afectando la calidad del sostenimiento consumiendo un valioso tiempo, lo que repercute directamente en la productividad y los costos operativos.

Ante estas situaciones, surge la necesidad de optimizar el proceso de calibración para medir el espesor del shotcrete. Inspirados en estudios previos como los estudios realizados en la Unidad Minera Cerro Lindo, este trabajo busca la implementación un sistema neumático automatizado acoplado en el brazo del robot lanzador. Este sistema tiene como finalidad el control del espesor del shotcrete, permitiendo una colocación más rápida, precisa y, sobre todo, segura de los calibradores. La automatización no solo mejoraría la eficiencia operativa, sino que también eliminaría la exposición de los trabajadores a zonas de riesgo, contribuyendo a la seguridad de los trabajadores y una operación minera moderna.

La calibración neumática tiene como objetivo optimizar aspectos importantes, como la medición del espesor, la reducción de tiempos y la eliminación de la exposición de los trabajadores a shotcrete fresco. De esta forma, se espera lograr avances significativos en seguridad, calidad del sostenimiento y productividad en las operaciones subterráneas de Cerro Lindo, con un enfoque que podría replicarse en otras minas.

1.2. Delimitación de la investigación

Para comenzar, este estudio se llevó a cabo en la Unidad Minera Cerro Lindo, situada en el distrito de Chavín, provincia de Chincha, en el departamento de Ica, Perú. Más precisamente, se localiza en el paraje de Huapunga, en la quebrada de Topara, que marca el límite entre Chincha (Ica) y Cañete (Lima). Según información geográfica (adaptada de fuentes como el Instituto Geológico Nacional), la mina se encuentra en la carta geológica IGN 25-L, a una altitud aproximada de 1820 metros sobre el nivel del mar. Este yacimiento, operado

por Nexa Resources, es un importante centro polimetálico dedicado a la extracción de minerales como zinc, plomo y cobre. La selección de este lugar para la investigación no solo responde a su relevancia en el sector minero peruano, sino también a la urgente necesidad de mejorar sus procesos operativos, particularmente en lo que respecta al sostenimiento de las excavaciones subterráneas mediante la aplicación de concreto proyectado o shotcrete (véase la figura 1).

Figura 1 Mapa de Ubicación de U.M. Cerro Lindo en la Región de Ica



Nota. Mapa detallado que muestra la ubicación de Cerro Lindo en relación con San Vicente de Cañete y Chíncha Alta. Obtenido de Google Imagen.

Para iniciar el trabajo de campo, el acceso a la Unidad Minera Cerro Lindo se realizó partiendo de la ciudad de Lima, recorriendo cerca de 180 kilómetros por la carretera Panamericana Sur hasta llegar al desvío hacia Jahuay. Desde ese punto el camio recorrido fue en trocha de 60 kilómetros hasta las instalaciones de la mina. El viaje fue realizado con una camioneta 4x4, con

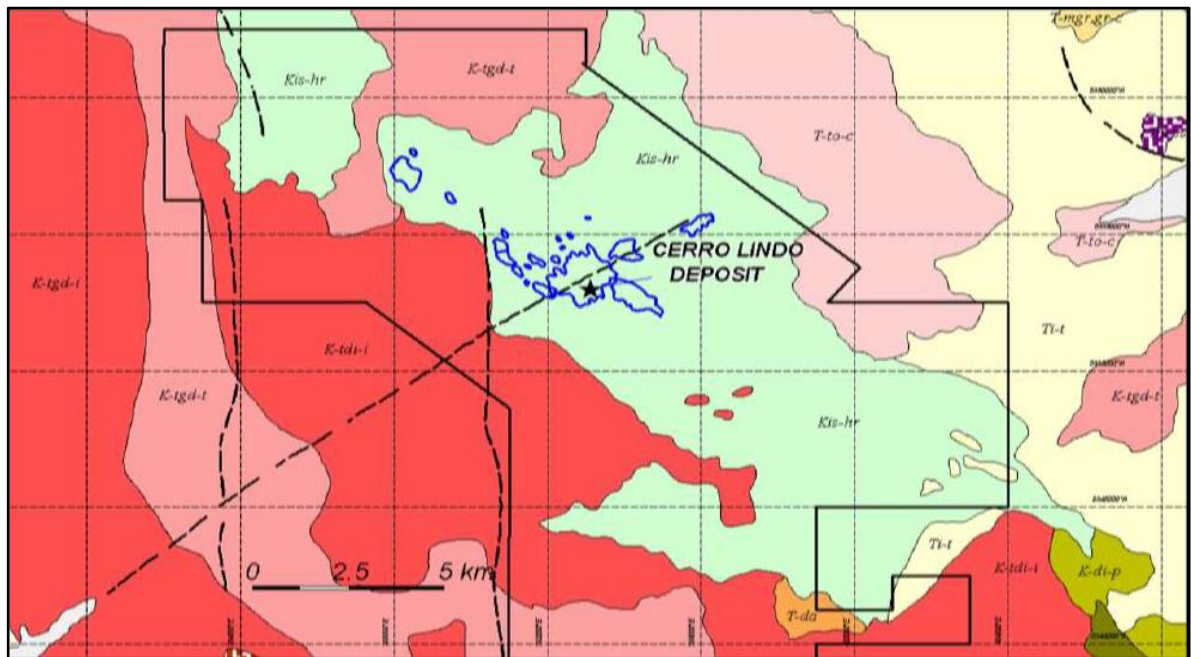
una duración estimada de 5 y 6 horas, dependiendo de las condiciones climáticas o el estado de la vía, este recorrido permitió resaltar la importancia de una logística bien planificada para el transporte de personal y materiales. Resultando ser un factor relevante para llevar a cabo la investigación, permitiendo optimizar tiempos y recursos en el proceso.

En cuanto al entorno geológico, la Unidad Minera Cerro Lindo forma parte del Grupo Casma correspondiente al periodo del Cretácico, Esta geología se distingue por la presencia de secuencias de rocas volcánicas y sedimentarias. De acuerdo con los estudios previos (interpretados en el presente trabajo), la mineralización presente en Cerro Lindo está asociada a los procesos volcánicos submarinos que dieron lugar a depósitos de sulfuros masivos, típicos de los sistemas VMS (Volcanogenic Massive Sulfide). Esta configuración geológica ha tenido una influencia directa en la elección de métodos de explotación, así como en la necesidad de implementar tecnologías avanzadas para el sostenimiento subterráneo, constituyendo los ejes principales de la presente investigación.

Geología Regional

El yacimiento de Cerro Lindo forma parte del Grupo Casma, de edad Albiana (Cretácico), una formación volcánica-sedimentaria que se extiende a lo largo de la costa occidental del Perú. Este grupo se desarrolló en una cuenca marginal ensiálica que no llegó a completarse. Según descripciones geológicas generales, el Grupo Casma constituye un arco volcánico con afloramientos que siguen un rumbo noroeste-sureste, coincidente con la orientación del depósito de Cerro Lindo. El yacimiento se ubica específicamente en la Formación Huaranguillo, de edad Albiana media a Senoniana (Cretácico medio), que se encuentra superpuesta como un “roof pendant” sobre intrusivos del Batolito de la Costa (véase la figura 2).

Figura 2 Geología Regional de la Unidad Minera Cerro Lindo



Nota. Mapa geológico que muestra la geología regional de la Unidad Minera Cerro Lindo. Obtenido de Informes Cerro Lindo.

Comenzando con el análisis, la Formación Huaranguillo se observa en la quebrada homónima, al noreste de la hacienda Lunche, en las cercanías del río San Juan. Esta formación, con un espesor aproximado de 3000 metros, se divide en dos miembros principales:

Miembro Inferior: Está compuesto por lutitas pizarrosas de textura laminada, junto con cenizas volcánicas y lutitas que se alternan con capas andesíticas de espesor medio. Ocasionalmente, también se encuentran niveles de calizas finas con estratificación marcada.

Miembro Superior: Se caracteriza por calizas negras dispuestas en capas de entre 5 y 40 centímetros. Hacia la parte superior, estas se mezclan con horizontes de lutitas pizarrosas laminares y algunos lechos de material volcánico.

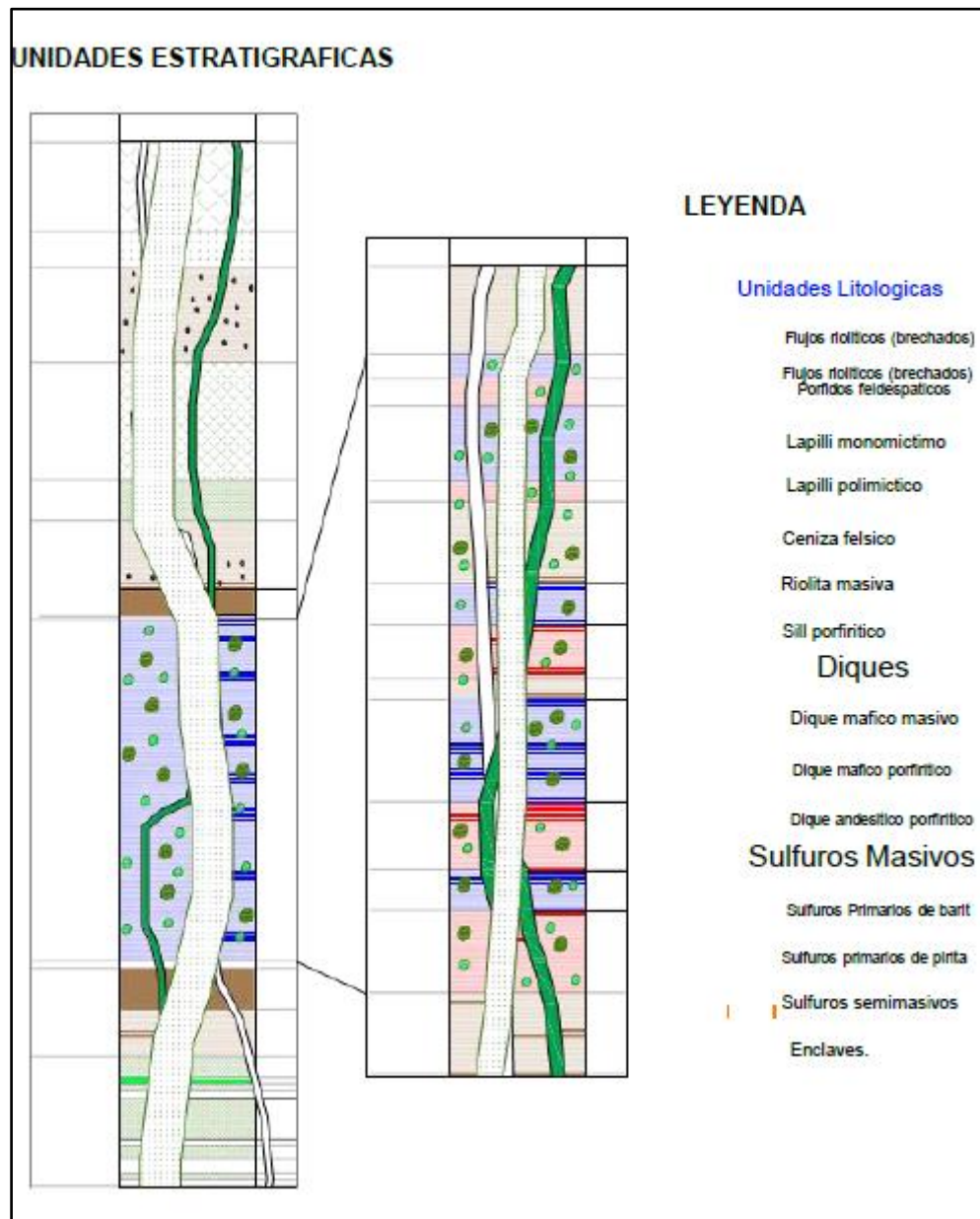
La Formación Huaranguillo forma parte de la cuenca volcánico-sedimentaria Cañete, que se desarrolló al mismo tiempo que las cuencas de Huarmey y Lancones, ubicadas más al norte. Estas cuencas, según estudios

geológicos generales, constituyen un gran metalotecto que abarca el flanco oeste de la Cordillera Occidental y la llanura costera peruana. Las unidades volcánico-sedimentarias de esta región se acumularon en un contexto de arco de islas, asociado a una cuenca de tipo “back arc” generada por movimientos tectónicos extensionales durante un proceso de subducción. Este régimen extensional provocó un aumento del gradiente geotérmico y un adelgazamiento de la corteza continental, aunque sin llegar a fracturarla completamente ni formar corteza oceánica, lo que clasifica a la cuenca como un “back arc” abortado.

Geología Local

A nivel local, la estratigrafía de Cerro Lindo está dominada por lavas masivas y brechadas, junto con materiales piroclásticos de composición riolítica a riodacítica. Las lavas de composición intermedia son escasas. Basado en análisis de 70 perforaciones en los cuerpos 2 y 5 (según investigaciones previas adaptadas aquí), se ha reconstruido una columna estratigráfica detallada para el yacimiento. Este se encuentra ubicado entre las unidades Topara y Huapunga, que consisten en secuencias piroclásticas distales o removilizadas, formadas por tufos, cenizas y lapilli, tanto monomícticos como polimícticos. Estas unidades piroclásticas se hallan dentro de secuencias efusivas, principalmente brechas de flujo y, en menor medida, flujos masivos de textura afanítica.

Figura 3 Columna Estrategicas



Nota. Columna estratigráfica detallando las unidades litológicas, diques y sulfuros masivos. Obtenido de Informes Cerro Lindo.

Rocas Intrusivas

Para empezar, las rocas intrusivas del Batolito de la Costa, formadas entre el Cretácico Superior y el Terciario durante un período de aproximadamente 64 millones de años, son principalmente granodioritas que rodean las unidades volcánico-sedimentarias, las cuales se presentan como un “techo colgado” o roof pendant. También se observan afloramientos menores de microdiorita, diorita y gabro, de mayor antigüedad y menor extensión. Además,

abundan diques, especialmente andesíticos porfiríticos, que atraviesan las secuencias volcánico-sedimentarias, aprovechando discontinuidades como fallas importantes para intruir y actuar como separadores del cuerpo mineralizado.

Metamorfismo

Las rocas intrusivas del Batolito de la Costa generaron un metamorfismo regional significativo en las unidades volcánico-sedimentarias, transformándolas mayormente en hornfels. Estas rocas presentan un ensamblaje mineralógico de cuarzo, feldespatos potásicos, muscovita, biotita y andalucita, con texturas porfidoblásticas que varían en forma y tamaño. Este metamorfismo se observa con mayor claridad en las zonas profundas de la caja piso. Estudios especializados (adaptados de investigaciones previas) sugieren que la andalucita se formó en las primeras etapas del metamorfismo progrado, resultado de alteraciones hidrotermales relacionadas con los fluidos que dieron origen al sistema VMS. Posteriormente, esta fue reemplazada por micas, como la muscovita. El metamorfismo también provocó la recristalización de los sulfuros masivos, un proceso con implicaciones económicas relevantes, ya que facilita la liberación de minerales durante el procesamiento metalúrgico.

Geología Estructural

El yacimiento de Cerro Lindo está marcado por un patrón estructural definido por plegamientos en las capas mineralizadas y bloques delimitados por fallas. No se observan estructuras de esquistosidad derivadas de la presión litostática regional. Según análisis geológicos generales, se identifican tres sistemas de fallas principales:

- **Fallas NW:** Estas son estructuras antiguas, previas a la deposición de los sulfuros masivos, que influyeron en la mineralización al definir el paleorrelieve y la forma de la cuenca donde se acumularon los sulfuros. Las fallas 35 y 75, ubicadas fuera del cuerpo mineralizado, pertenecen a este

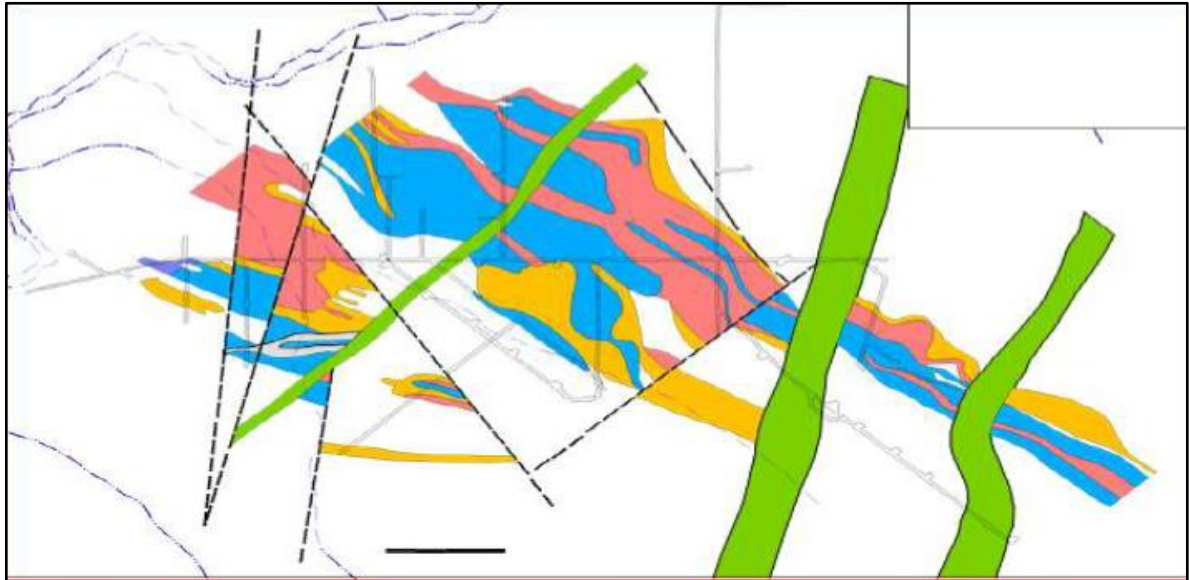
sistema y están asociadas a cambios abruptos en el espesor de las unidades litológicas.

- **Fallas NE:** Igualmente relevantes, estas fallas transversales al depósito controlaron el paleorrelieve y sirvieron como conductos para la mineralización, incluyendo los denominados “stringers”. También están ocupadas por diques andesíticos porfiríticos, siendo la falla 60 un ejemplo representativo.
- **Fallas NS:** Este sistema de fallas inversas, posterior a la mineralización, afecta principalmente el cuerpo 1, complicando su interpretación. En el cuerpo 5, el desplazamiento transversal es mínimo, por lo que su impacto es limitado.

Mineralización

El yacimiento principal de sulfuros masivos en Cerro Lindo se extiende a lo largo de 850 metros, con una profundidad de 450 metros y un espesor promedio de 230 metros, abarcando tres cuerpos mineralizados. Su rumbo es noroeste, con un buzamiento de 65 grados hacia el suroeste, alineado con el afloramiento volcánico y la cuenca Casma. Se estima que contiene más de 200 millones de toneladas de sulfuros masivos. El yacimiento se divide en tres lentes principales (C1, C2 y C5), mientras que los cuerpos 3 (a mayor profundidad que el cuerpo 1) y 4 (al este del yacimiento principal) presentan características similares, aunque no se analizaron en detalle en este estudio.

Figura 4 Geología del Yacimiento Cerro Lindo Nv. 1820



Nota. Mapa geológico del yacimiento Cerro Lindo en el nivel 1820. Obtenido de Informes de la Unidad Minera Cerro Lindo.

Legenda de Litología y Mineralización

Para introducir el tema, el yacimiento de Cerro Lindo presenta una mineralización que se clasifica en varias categorías, detalladas a continuación según observaciones geológicas generales:

- **SPB-Zn (Sulfuros de barita primaria ricos en zinc):** Estos sulfuros masivos, caracterizados por su bandeamiento, contienen más del 50% de sulfuros, incluyendo baritina (sulfato de bario) en proporciones superiores al 10%. La baritina se depositó simultáneamente con los sulfuros, formando bandas de esfalerita marrón, pirita y baritina, lo que los distingue por su textura bandeada.
- **SPB-Cu (Sulfuros de barita primaria ricos en cobre):** Similarmente, estos sulfuros masivos tienen más del 50% de sulfuros, con baritina superior al 10%. Su textura es homogénea, compuesta por baritina, pirita, pirrotina, calcopirita y esfalerita negra (marmatita). Estos minerales de alta temperatura reemplazan metasomáticamente a la baritina y la pirita, indicando condiciones de formación más cálidas.

- **SPP (Sulfuros de pirita primaria):** Ricos en hierro, estos sulfuros contienen menos del 10% de baritina y presentan calcopirita intersticial. Su textura es homogénea y granular, con granos que varían de finos a muy gruesos.
- **SSM (Sulfuros semimasivos):** Estas rocas volcánicas contienen entre 20% y 50% de sulfuros piritosos, mayormente estériles, que se presentan diseminados, en venillas o en espacios estructurales. La mineralización es de grano fino, y la pirita diseminada es común en la caja piso.

Metasomatismo

Análisis detallados (basados en estudios previos) revelan un proceso de metasomatismo donde los sulfuros piritosos ricos en cobre (SPP) reemplazan a los sulfuros de barita ricos en zinc (SPB-Zn) durante la evolución del yacimiento. Observaciones en galerías y sondajes muestran enclaves métricos de SPB-Zn “flotando” dentro de los SPP-Cu, con los SPB-Cu siempre en contacto con SPB-Zn y SPP. Este reemplazo de minerales de baja temperatura (pirita, baritina, esfalerita) por los de alta temperatura (calcopirita, pirrotina) indica que los sulfuros piritosos se formaron en condiciones más cálidas, precipitando cobre y hierro en los contactos con horizontes baríticos previamente depositados. Este proceso genera cambios significativos en los contenidos de zinc y cobre, además de enclaves de rocas volcánicas con altos valores de plomo, plata y cobre.

Zonamiento

La distribución de metales en Cerro Lindo depende de controles litológicos y estructurales. Litológicamente, el zinc y el cobre están asociados a los sulfuros masivos y sus contactos, con una ratio promedio de $Cu/(Cu+Zn)$ de 0.263 en sulfuros baríticos y 0.682 en sulfuros piritosos. Estructuralmente, los valores de zinc, cobre y el espesor de la mineralización aumentan cerca de la falla principal 35 y las fallas transversales NE.

Alteración

La alteración hidrotermal más común en el yacimiento, especialmente en la caja piso, es la sericitización, que se extiende más allá de los sulfuros masivos. La presencia de andalucita, formada durante un metamorfismo progrado de bajo grado a unos 450 °C, fue posteriormente reemplazada por moscovita, según estudios geológicos adaptados. Esta alteración implica pérdidas de sodio y calcio, típicas de yacimientos VMS, y es más intensa en las cajas piso de los cuerpos 2 y 5, donde las texturas volcánicas originales desaparecen. La silicificación, asociada a zonas de “stringers” con pirita, está vinculada a altos contenidos de cobre.

Geología Local y Estructural

A nivel local, la geología de Cerro Lindo está dominada por brechas riolíticas, flujos volcánicos y unidades piroclásticas, con los cuerpos mineralizados alojados principalmente en las unidades Huapunga y Topara, compuestas de brechas y tufos. Estas características geológicas influyeron directamente en la elección del shotcrete como método de sostenimiento para garantizar la estabilidad de las labores subterráneas. Estructuralmente, las fallas regionales con rumbos NW, NE y NS jugaron un papel clave en la distribución de la mineralización, pero también afectaron la estabilidad de las excavaciones, condicionando el diseño de los sistemas de sostenimiento como el shotcrete para adaptarse a estas particularidades.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Cómo optimizar el proceso de calibración del espesor de shotcrete en labores subterráneas mediante el uso de un sistema neumático automatizado en el robot lanzador en la Unidad Minera Cerro Lindo?

1.3.2. Problemas específicos

PE1: ¿Cuáles son las limitaciones del sistema manual actual para la calibración del espesor de shotcrete?

PE2: ¿Qué mejoras en tiempo, seguridad y precisión se obtienen con el uso del sistema neumático propuesto?

PE3: ¿Cuál es el impacto operativo de incorporar el sistema en los procesos rutinarios de sostenimiento?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivo general

Optimizar el proceso de calibración del espesor de shotcrete mediante la implementación de un sistema neumático en el robot lanzador en labores subterráneas de la Unidad Minera Cerro Lindo.

1.4.2. Objetivos específicos

OE1: Identificar las deficiencias del sistema manual de calibración de shotcrete.

OE2: Diseñar y validar un sistema neumático para colocación de calibradores.

OE3: Identificar el impacto operativo de incorporar el sistema neumático en los procesos rutinarios de sostenimiento.

1.5. Justificación de la investigación

La presente investigación se justifica debido la necesidad de mejorar los estándares de seguridad y eficiencia en los procesos de sostenimiento en minería subterránea, con especial relevancia en la calibración del espesor del shotcrete en la Unidad Minera Cerro Lindo. En la actualidad la calibración se realiza de forma manual, lo que representa limitaciones operativas y de seguridad. Los trabajadores deben exponerse al shotcrete fresco con riesgo de caída de rocas y shotcrete, el método de calibración manual generara errores

en la medición del espesor y demoras considerables en la ejecución de las labores, afectando la productividad general de la operación.

Ante esta situación, se plantea la implementación de un sistema neumático automatizado integrado al brazo del robot lanzador como una alternativa innovadora para optimizar el proceso de calibración. Este sistema permitiría reducir el tiempo de instalación de los calibradores, mejorar la precisión en el control del espesor y eliminar la exposición directa de los trabajadores, elevando significativamente los niveles de seguridad. Asimismo, la automatización contribuiría a lograr un sostenimiento más confiable y duradero, lo que se traduciría en una mayor estabilidad de las excavaciones subterráneas y en la reducción de costos operativos relacionados al proceso de calibración.

En un sentido más amplio, los resultados de esta investigación podrían marcar un precedente en la aplicación de tecnologías automatizadas dentro del sector minero subterráneo. La experiencia desarrollada en Cerro Lindo serviría como referente para otras operaciones, tanto a nivel nacional como internacional, impulsando una minería más moderna, segura y eficiente, alineada con las exigencias actuales de productividad y sostenibilidad del rubro.

1.6. Limitaciones de la investigación

Se enfrentó varias limitaciones que deben considerarse en el análisis de sus resultados. En primer lugar, la disponibilidad de datos de calibración en diferentes tipos de labores subterráneas fue limitada, lo que redujo la cantidad de muestras y frentes donde se pudo aplicar el sistema neumático en comparación con los procedimientos manuales. Como consecuencia los resultados presentados no relejan todas las variaciones geológicas y operativas que podrían encontrarse en las minas de mayor dimensión o en condiciones geotécnicas diferentes.

De igual manera la realización de pruebas de campo estuvo condicionada por los tiempos de operación y continuidad de las actividades productivas en las labores de la Unidad Minera Cerro Lindo. Esta situación limitó la posibilidad de implementar el sistema neumático en más frentes de trabajo, lo que podría restringir la extrapolación de los resultados a una escala más amplia.

Otro aspecto relevante fue la adaptación técnica del sistema neumático en equipo al robot lanzador existente en la operación. Aunque el sistema neumático fue diseñado para integrarse al equipo sin modificaciones estructurales importantes, el proceso de adaptación técnica requirió tiempo y recursos para asegurar su funcionamiento óptimo, lo que retrasó la implementación y evaluación del sistema.

A pesar de estas limitaciones, los resultados durante la investigación proporcionan una base sólida para considerar la viabilidad del sistema neumático en la optimización de la calibración del espesor de shotcrete en operaciones subterráneas y abren la puerta a futuras investigaciones que puedan superar estas restricciones y evaluar el sistema en una mayor diversidad de condiciones operativas.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes de estudio

A nivel local

En Cerro de Pasco, León Arotinco (2024). En su tesis titulada "Diseño y control de calidad para la mezcla de concreto lanzado vía húmeda robotizado. Unidad Económica Animón Compañía Minera Chungar, S.A. Región Pasco". Tesis para optar el título de Ingeniero de Minas, por la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, concluyó que:

La optimización en el diseño de mezcla y control de calidad del concreto lanzado mediante el uso de sistemas robotizados ha logrado mejorar significativamente la seguridad en las labores mineras subterráneas, incrementando la productividad y reduciendo la cantidad de accidentes, particularmente aquellos relacionados con la caída de rocas. Además, la implementación de estos sistemas ha permitido aumentar la eficiencia operativa, logrando una mejora notable en la producción de material procesado.

Comentario:

Este estudio es especialmente significativo para el desarrollo de mi tesis, ya que evidencia cómo la combinación entre un diseño de mezcla y un control de calidad riguroso en la aplicación del shotcrete mediante equipos robotizados

puede generar un cambio notable en las condiciones de trabajo dentro de la minería subterránea. Estas mejoras no solo se reflejan los niveles de seguridad, sino también la eficiencia operativa. La información obtenida servirá como base para la implementación de un sistema neumático automatizado orientado a la calibración del espesor del shotcrete en la Mina Cerro Lindo, lo que permitirá optimizar los procesos, reducir tiempos de operación y minimizar los riesgos laborales, en línea con los objetivos principales de esta investigación.

A nivel nacional

En Huancayo, Monge Porras (2022). En su tesis titulada "Reducción de rebote de shotcrete vía seca mediante la optimización del sostenimiento en la Zona Cuerpos de la Unidad Americana Alpayana S.A. – 2022". Tesis para optar el título de Ingeniero de Minas, por la Universidad Nacional del Centro del Perú, concluyó que:

La optimización del sostenimiento ha permitido reducir significativamente el rebote del shotcrete vía seca de 33.2% a 15.6%, logrando una reducción del 17.6%. Además, se identificaron los problemas operativos y logísticos que influyen en el alto rebote del shotcrete y se mejoró el indicador de m³ por metro lineal sostenido.

Comentario:

Este estudio es muy relevante para mi tesis, ya que demuestra cómo la optimización del sostenimiento en la minería subterránea, específicamente en la aplicación de shotcrete, puede mejorar tanto la eficiencia como la calidad de los procesos. La reducción del rebote en la aplicación de shotcrete vía seca es un aspecto crítico que influye directamente en los costos operativos y en la seguridad de las labores mineras. Los hallazgos sobre la identificación de problemas de la operación proporcionan enfoques valiosos para optimizar el proceso de calibración de shotcrete en la Unidad Minera Cerro Lindo, conectando de manera directa con los objetivos de mi investigación.

En Huancayo, Cárdenas Yauri y Porras Sarmiento (2025). En su tesis titulada “Evaluación técnica económica de shotcrete vía seca para su implementación en labores de avance, minera artesanal comunal Acopalca”. Tesis para optar el título de Ingeniero de Minas, por la Universidad Continental, concluyó que:

El sostenimiento shotcrete vía seca ha demostrado tener beneficios económicos relevantes, como la eficiencia en el uso de materiales, la reducción de tiempos y costos en la operación, así como la mejora en la seguridad. La evaluación técnica y económica evidenció que esta tecnología contribuye a la optimización de la productividad, reduciendo riesgos y aumentando la durabilidad de las aplicaciones de sostenimiento.

Comentario:

Este estudio resulta especialmente valioso para el desarrollo de mi tesis, ya que evidencia cómo la evaluación técnica y económica de la tecnología de shotcrete puede generar impactos positivos tanto en la productividad como en la seguridad de las operaciones mineras. La incorporación de estos hallazgos refuerza la relevancia de implementar un sistema neumático automatizado para la calibración del shotcrete, una innovación que permitiría optimizar la eficiencia operativa en la Unidad Minera Cerro Lindo y, al mismo tiempo, incrementar la rentabilidad y las condiciones de seguridad.

A nivel internacional

En Santiago, Salvador Cobo (2020). En su tesis titulada “Evaluación de automatización de operaciones unitarias en minería subterránea”. Tesis para optar el título de Ingeniero Civil de Minas, por la Universidad de Chile, concluyó que:

El estudio concluye que la automatización de las operaciones mineras subterráneas presenta oportunidades relevantes para mejorar la seguridad y la productividad. En específico, se identificaron 58 operaciones que podrían ser

automatizadas, destacando que las operaciones de preparación minera y operación mina tienen un mayor potencial de ser automatizadas a corto y mediano plazo. La implementación de tecnologías autónomas y telecomandadas se asocia con la reducción de riesgos laborales, mejorando la seguridad de los trabajadores y aumentando la eficiencia operativa. A través de un análisis detallado de las operaciones y los costos-beneficios, se determinó que, si bien algunas operaciones pueden automatizarse en el corto plazo, la mayoría de las operaciones complejas requerirán más tiempo debido a la interacción con el personal y la variabilidad de las condiciones de laborales. Las oportunidades de automatización sobresalen especialmente en tareas que conllevan un alto nivel de riesgo y en aquellas que tienen un impacto relevante enfocado en la producción minera.

Comentario:

Este estudio resulta importante y relevante para el desarrollo de mi investigación, ya que analiza cómo la automatización dentro de la minería subterránea puede contribuir a optimizar procesos caracterizados por su alta variabilidad y riesgo operativo. Los resultados presentados ofrecen una visión enriquecedora sobre la aplicación de tecnologías autónomas en distintos entornos mineros, destacando su potencial para mejorar tanto la seguridad como la productividad. Estos aportes respaldan el propósito central de mi trabajo: la implementación de un sistema neumático automatizado para la calibración del shotcrete en la Unidad Minera Cerro Lindo, una iniciativa orientada a fortalecer la eficiencia operativa y reducir la exposición del personal a condiciones peligrosas.

En cuanto al marco técnico, es pertinente considerar lo expuesto por Santiago García Guzmán en la Guía Chilena del Hormigón Proyectado (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2014), donde se indica que el término “hormigón proyectado” se emplea en Chile como equivalente al shotcrete. De

acuerdo con el American Concrete Institute, este material corresponde a un tipo de concreto que se aplica mediante una proyección neumática a alta velocidad a través de una boquilla, lo que permite su adherencia y distribución eficiente sobre diversas superficies, especialmente en entornos subterráneos donde la rapidez y calidad del sostenimiento resultan esenciales.

Comentario:

Esta definición técnica constituye un pilar especial en el desarrollo de mi investigación, ya que establece un marco conceptual y operativo del shotcrete coherente con los lineamientos del American Concrete Institute (ACI) y su aplicación en el contexto latinoamericano. La mención al proceso de proyección neumática a alta velocidad mediante una boquilla resulta especialmente relevante para el diseño de un sistema automatizado de calibración en la Unidad Minera Cerro Lindo. Comprender que la eficacia del shotcrete depende directamente de variables como la presión, la velocidad y el control de la mezcla permite justificar la incorporación de sensores y mecanismos neumáticos inteligentes que garanticen una dosificación uniforme, reduzcan el rebote del material y optimicen la adherencia en entornos subterráneos de alta exigencia. De este modo, la base conceptual revisada sustenta técnicamente la propuesta planteada y asegura su coherencia con los estándares internacionales de calidad, eficiencia y seguridad en la aplicación del concreto proyectado.

Además, según lo expuesto por autores como Bernard (2015) en la guía técnica *Recommended Practice: Shotcreting in Australia*, publicada por la Australian Shotcrete Society junto con el Concrete Institute of Australia, la Sociedad Australiana de Shotcrete, creada en 1998, es una organización sin fines de lucro dedicada a promover el uso del hormigón proyectado en sectores como la minería y la construcción en Australia. Su misión incluye destacar los beneficios de este material, fomentar prácticas adecuadas en su aplicación y

educar a diseñadores y especificadores sobre cómo aprovechar al máximo sus propiedades para obtener resultados óptimos.

Comentario:

Este documento es altamente relevante para mi investigación, ya que proporciona un marco institucional y técnico sobre las buenas prácticas en el uso del shotcrete, especialmente en contextos mineros. La promoción de estándares de calidad, formación técnica y difusión de tecnologías concretas en Australia refuerza la necesidad de implementar sistemas automatizados que garanticen precisión, seguridad y eficiencia en la aplicación del shotcrete. En específico, el respaldo del Concrete Institute of Australia fortalece el enfoque de mi propuesta para desarrollar un sistema neumático automatizado en la Unidad Minera Cerro Lindo, en línea con las buenas prácticas internacionales que priorizan la optimización operativa y la reducción de riesgos en minería subterránea.

En Santiago, Diego Martín Landabur Mella (2020). En su tesis titulada “Metamateriales contruidos empleando robots modulares blandos”. Tesis para optar el título de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, por la Universidad de Chile, concluyó que:

Los robots modulares blandos permiten la construcción de estructuras adaptativas mediante el uso de resina elastomérica y lógica de control distribuida. La investigación demuestra que los sistemas pueden generar metamateriales con propiedades mecánicas programables, capaces de adaptarse a entornos deformables o irregulares. Se afianzo su capacidad de desplazamiento y reconfiguración en superficies complejas, lo que abre posibilidades para su aplicación en espacios confinados o de acceso limitado.

Comentario:

Este estudio específicamente es relevante para mi investigación, ya que aborda el diseño de sistemas robóticos blandos con capacidad de adaptación

estructural. Los resultados refuerzan la importancia de implementar tecnologías automatizadas que optimicen los procesos operativos, la seguridad y la precisión en procesos de aplicación de shotcrete en minería subterránea.

2.2. Bases teóricas – científicas

2.2.1. Optimización del Proceso de Calibración del Espesor de shotcrete

La optimización del proceso de calibración del espesor de shotcrete comprende a un conjunto de acciones técnicas y metodológicas orientadas a mejorar la precisión y la eficiencia en su verificación del espesor real del concreto proyectado sobre superficies rocosas u otras estructuras de soporte. Este proceso tiene como objetivo reducir las desviaciones entre el espesor diseñado y el ejecutado, asegurando que se cumplan los parámetros de calidad, resistencia y seguridad estructural establecidos en el proyecto.

En un entorno operativo, optimizar la calibración significa integrar procedimientos de medición más confiables, sistemas de control automatizado y análisis estadísticos que ayuden a identificar factores críticos —como la presión de proyección, la distancia de aplicación, la granulometría del agregado y la experiencia del operador— que afectan directamente la variabilidad del espesor.

Así mismo implica el uso herramientas de mejora continua que disminuyan el consumo de materiales, los tiempos de ensayo y los costos operativos, sin alterar la calidad del revestimiento. De esta forma, se genera conocimiento que puede aplicarse a futuros proyectos de sostenimiento, contribuyendo a la confiabilidad de las operaciones mineras y civiles donde el shotcrete es un elemento clave para la controlar el macizo rocoso.

Equipos involucrados en el proceso de lanzado de shotcrete:

Equipo Robot Lanzador Spm 4210 Wetkret (Putzmeister):

El SPM 4210 Wetkret es un equipo robotizado especialmente diseñado para la proyección de concreta vía húmeda (shotcrete) en entornos

subterráneos como minería y túneles. Su diseño robusto, alcance extendido y automatización permiten una aplicación eficiente, segura y de alta calidad del sostenimiento con shotcrete.

Figura 5 Equipo Robot Lanzador Spm 4210 Wetkret (Putzmeister)



Nota. Imagen del equipo robot lanzador SPM 4210 Wetkret. Obtenido de Manual del Fabricante Putzmeister.

Sistema de Proyección

- **Tipo de bomba:** Pistón hidráulico de doble efecto
- **Caudal de proyección:** Hasta 20 m³/h
- **Presión máxima de proyección:** 80 bar
- **Sistema de mezcla y aditivación:** Incorporado, con dosificación automática del acelerante en línea
- **Brazo de aplicación:** Telescópico con movimientos hidráulicos de alta precisión

Dimensiones y Alcance

- **Alcance vertical máximo:** 17 metros
- **Alcance horizontal máximo:** 14 metros
- **Altura mínima de trabajo:** ~2.5 metros

Capacidad de maniobra en galerías estrechas y medianas

Control y Automatización

Sistema de control:

- Manual mediante control remoto (inalámbrico)
- Sensores de presión y flujo para control en tiempo real
- Integración con sistemas de monitoreo de parámetros operativos y mantenimiento predictivo

Unidad Portante

- **Tipo de vehículo:** Diésel 4x4, diseñado para trabajo subterráneo
- **Motor:** Deutz TCD 2012 L04 2V, 95 kW @ 2,300 rpm
- **Velocidad de desplazamiento:** Hasta 20 km/h
- **Transmisión:** Hidrostática con tracción en las cuatro ruedas
- Radio de giro compacto para maniobrar en galerías reducidas.

Compatibilidad de Materiales

Shotcrete vía húmeda con:

- **Acelerantes de fraguado:** tipo alcalino o sin álcalis
- **Fibras sintéticas** (hasta 25 kg/m³)
- **Granulometría compatible:** Máx. 12 mm
- **Resistencia objetivo:** >30 MPa a 28 días

Seguridad y Ergonomía

- Cabina con protección ROPS/FOPS
- Luces LED de trabajo, cámaras traseras y sistema de frenos hidráulicos
- Sistema de parada de emergencia en brazo y vehículo
- Reducción de exposición del operador a zonas de caída gracias al control remoto

Equipo Robot Lanzador Alpha 30 (Normet)

El equipo ALPHA 30 es un equipo robotizado de proyección de concreto vía húmeda (shotcrete), desarrollado para condiciones exigentes de minería subterránea y túneles. Combina movilidad compacta, automatización precisa y alto alcance, mejorando la eficiencia y seguridad del proceso de sostenimiento.

Figura 6 Equipo Robot Lanzador Alpha 30 (Normet)



Nota. Imagen del equipo robot lanzador Alpha 30. Obtenido de Manual del Fabricante Normet.

Sistema de Proyección:

- **Método de lanzado:** Shotcrete vía húmeda
- **Tipo de bomba:** Bomba de pistón de doble efecto
- **Presión máxima de proyección:** 70 bar
- **Caudal nominal de aplicación:** 6 – 10 m³/h (dependiendo del diseño de mezcla)
- **Sistema de aditivación:**
Bomba dosificadora automática para acelerante
Mezcla en línea para fraguado rápido
- **Sistema de boquilla:** Giratoria de alta precisión y resistencia al desgaste

Dimensiones y Alcance:

- **Alcance vertical máximo del brazo lanzador:** ~9 metros
- **Alcance horizontal máximo:** ~7.5 metros

- **Ángulo de giro del brazo:** 360° (brazo multi-articulado)
- **Diseño compacto** para maniobras en labores estrechas (radio de giro reducido)

Control y Automatización

- **Tipo de control:**
Control remoto inalámbrico
Panel de mando ergonómico para operaciones desde distancia segura
- **Sistemas de seguridad integrados:** parada de emergencia, sensor de sobrepresión.
- **Opcional:** integración con sistemas de monitoreo de datos operativos
Unidad Portante
- **Chasis:** Bajo perfil (LP) diseñado para minería subterránea
- **Motor:** Diésel Deutz BF 4L 2011 o equivalente
- **Potencia nominal:** 74.4 kW (100 HP)
- **Tracción:** 4x4
- **Transmisión:** Hidrostática
- **Velocidad de desplazamiento:** hasta 20 km/h
- **Sistema de dirección:** articulada hidráulica

Compatibilidad de Materiales

- **Tipo de concreto:** Shotcrete vía húmeda
- **Granulometría máxima:** hasta 12 mm
- **Compatibilidad con fibras metálicas o sintéticas:** sí (hasta 25 kg/m³)
- **Dosificación de acelerante:** 5 – 7% del peso de cemento
- **Espesor recomendado de aplicación:** 4 – 7 cm por pasada
- **Resistencia esperada a compresión (28 días):** >30 MPa

Seguridad y Ergonomía

- Diseño que reduce la exposición directa del operador
- Sistema de iluminación LED para ambientes de baja visibilidad

- Paros de emergencia distribuidos en el equipo
- Compatible con sistemas de ventilación en interior mina
- Cabina con estructura opcional ROPS/FOPS (según configuración)

Equipo Camión Mezclador Mixkret 5 (Putzmeister):

El Mixkret 5 es un equipo diseñado especialmente para el transporte de concreto pre-mezclado en minería subterránea. Su diseño robusto, bajo perfil y alta capacidad lo hacen ideal para ambientes exigentes como los de la Unidad Minera Cerro Lindo, asegurando un suministro eficiente y continuo de concreto al frente de trabajo.

Figura 7 *Equipo Camión Mezclador (Putzmeister)*



Nota. Imagen del camión mezclador mixkret. Obtenido de Manual del Fabricante Putzmeister.

Unidad Portante

- **Diseño:** Vehículo de bajo perfil (Low Profile), ideal para galerías subterráneas con altura reducida
- **Motor:** Diésel Deutz TCD 2012 L06 2V, refrigerado por agua
- **Potencia máxima:** 130 HP (97 kW) a 2,300 rpm
- **Transmisión:** Hidrostática con tracción permanente en las cuatro ruedas (4x4)
- **Dirección:** Articulada hidráulica
- **Radio de giro interior:** ~3.5 m

Sistema de Mezcla y Transporte

- **Capacidad nominal del tambor:** 5 m³ de concreto
- **Velocidad máxima del tambor:** hasta 18 rpm
- **Tipo de tambor:** Giratorio con doble hélice interna para mezcla uniforme
- **Sistema de descarga:** Por inversión del giro del tambor
- **Altura de descarga:** Aproximadamente 1.2 – 1.5 m (adaptable a robots lanzadores como Alpha 30 o Putzmeister)

Desempeño y Autonomía

- **Velocidad de desplazamiento:** hasta 25 km/h en superficie plana
- **Pendiente máxima superable (con carga):** 30%
- **Tanque de combustible:** ~100 litros
- **Consumo estimado:** 12 – 15 L/h (dependiendo de la carga y pendiente)
- **Sistema de frenado:** Hidráulico en las 4 ruedas, con freno de parqueo independiente

Compatibilidad del Material Transportado

- **Tipo de concreto:** concreto pre-mezclado con fibra
- **Granulometría máxima del árido:** hasta 12 mm
- **Adición de fibras metálicas o sintéticas:** Compatible
- **Conservación de temperatura y trabajabilidad:** Sistema de rotación continuo para evitar segregación del concreto durante el trayecto

Seguridad y Ergonomía

- **Cabina:** Cerrada o abierta con techo reforzado (según versión), con visibilidad ampliada
- **Protección:** Estructura ROPS/FOPS opcional
- **Iluminación:** Sistema de luces LED delanteras y traseras para operación en túneles
- **Sistema de monitoreo:** Indicadores de velocidad, presión, revoluciones y nivel de combustible

- **Cámaras opcionales:** Para visión trasera en espacios estrechos

Mantenimiento y Operación

- **Facilidad de mantenimiento:** Accesos laterales y traseros para motor, tambor y sistemas hidráulicos
- **Tiempo estimado de carga y descarga:**
Carga en planta: 5 – 10 min
Descarga completa: 3 – 5 min
- **Sistema de lavado interno:** Opcional, para limpieza del tambor post-operación.

Características Técnicas del Material de Lanzado:

El shotcrete o hormigón proyectado vía húmeda es un material de sostenimiento ampliamente utilizado en minería subterránea por su capacidad de adherencia, resistencia temprana y versatilidad en condiciones geomecánicas variables. Su correcta formulación y aplicación son fundamentales para garantizar la estabilidad del macizo rocoso y la seguridad operativa.

Tipo de mezcla

- **Vía húmeda:** el shotcrete se produce en planta dosificadora, donde se mezclan todos los componentes con agua antes del transporte. La mezcla se traslada en camiones de bajo perfil mixkret y se proyecta mediante bombas de pistón a través de boquillas de los equipos robots lanzadores.
- Esta modalidad asegura una mezcla homogénea, mayor control de calidad y una aplicación continua y eficiente.

Tabla 1 Composición típica del shotcrete vía húmeda (diseño referencial)

Componente	Rango típico de dosificación
Cemento Portland Tipo I o IP	350 – 450 kg/m ³
Arena y agregados finos	1,000 – 1,200 kg/m ³
Agua de mezcla	160 – 180 litros/m ³ (r/c: 0.40 – 0.45)
Acelerante de fraguado	5 – 8% respecto al peso del cemento
Fibras de polipropileno	2 – 6 kg/m ³ sintéticas
Aditivos plastificantes/reductores de agua	según especificación del proveedor

Note. Tabla de elaboración propia

Tabla 2 Propiedades técnicas del material lanzado

Propiedad	Valor Recomendado
Resistencia a compresión (28 días)	≥ 30 MPa (diseño), con verificación ≥ 25 MPa (mínimo)
Adherencia al sustrato rocoso	> 0.5 MPa (ensayo de adherencia directa)
Espesor por capa proyectada	4 – 7 cm por pasada
Densidad del concreto fresco	2,200 – 2,400 kg/m ³
Contenido de aire	< 6%
Tiempo de fraguado inicial (con acelerante)	2 – 5 minutos
Retracción	Controlada mediante fibras y aditivos
Durabilidad	Alta, frente a ambientes húmedos y sulfatados

Note. Tabla de elaboración propia

Fibras reforzantes

- **Fibras sintéticas:** Complementan la matriz, reduciendo la formación de fisuras plásticas y secas.
 - ✓ Material: polipropileno, nylon
 - ✓ Uso recomendado: sostenimiento temporal o menor carga estructural

Compatibilidad con equipos de lanzado

- El diseño del material debe asegurar una granulometría máxima ≤ 12 mm para evitar obstrucciones en la boquilla y bomba de los robots lanzadores (como el SPM 4210 o Alpha 30).
- La fluidez y trabajabilidad deben adaptarse al tipo de bomba (de pistón) y a la longitud de manguera (hasta 40 m en algunos casos).
- El acelerante de fraguado se inyecta en línea en la boquilla, por lo que debe estar perfectamente dosificado y ser compatible químicamente con el cemento y otros aditivos.

Consideraciones técnicas para su aplicación

- El espesor del shotcrete debe ser calibrado previamente para asegurar una cobertura uniforme y cumplir con las especificaciones de sostenimiento.
- Es esencial realizar ensayos de calidad en campo: paneles de prueba, núcleos testigos, ensayo de pull-off (adherencia) etc.
- La temperatura, humedad relativa y ventilación influyen en el fraguado, por lo que el material debe adaptarse a las condiciones ambientales subterráneas.

El shotcrete vía húmeda representa una solución eficiente, rápida y adaptable para el sostenimiento de labores subterráneas. Su desempeño depende tanto de su diseño de mezcla, como de su correcta aplicación y calibración, siendo crucial el control del espesor proyectado, como lo aborda esta investigación. La combinación de un material correctamente formulado y un sistema automatizado de calibración permitirá optimizar la estabilidad de las excavaciones, mejorar la seguridad de los trabajadores y aumentar la productividad en operaciones mineras como Cerro Lindo.

Figura 8 *Sostenimiento con Shotcrete con Robot Lanzador*



Nota. Imagen de un equipo robotizado utilizado en operaciones mineras. Obtenido de Google imágenes.

Uso de shotcrete en minería subterránea: Métodos y tecnologías

El *shotcrete* (concreto proyectado) es una mezcla de cemento, arena y agregados que se aplica a alta velocidad mediante aire comprimido sobre las paredes de túneles y galerías. En minería subterránea se utiliza principalmente como sostenimiento primario o secundario del macizo rocoso: se rocía sobre el contorno excavado para controlar las deformaciones iniciales y estabilizar la excavación antes de instalar un revestimiento definitivo. Su aplicación es muy eficiente en espacios confinados, ya que permite cubrir rápidamente superficies irregulares y distribuir refuerzos (como fibras de acero o sintéticas) en la mezcla. El shotcrete se considera un método de sostenimiento temporal en la minería, dado que las condiciones de la mina cambian dinámicamente, por lo que suele complementarse con anclajes y otros sistemas constructivos (Beltrán, 2021).

- **Métodos de aplicación:** Existen dos procesos básicos de proyección del shotcrete: *vía seca* y *vía húmeda*. En la vía seca el cemento y agregados se bombean en seco hacia la boquilla, donde se añade el agua necesaria; en la vía húmeda la mezcla de hormigón se prepara con agua en la planta dosificadora antes de la proyección. Cada método tiene ventajas

específicas (por ejemplo, la vía húmeda suele producir un material más uniforme y con menos polvo), y la elección depende de las exigencias del proyecto y la experiencia del personal. En Perú tradicionalmente ha prevalecido el método por vía seca, aunque la adopción de la vía húmeda ha venido en aumento.

- **Tecnologías y aditivos modernos:** Los avances recientes han mejorado notablemente el desempeño del shotcrete. Se han incorporado acelerantes libres de álcalis que reducen el tiempo de fraguado y permiten alcanzar resistencia temprana rápidamente, así como fibras metálicas o sintéticas de alto desempeño que refuerzan el material y pueden sustituir (total o parcialmente) las mallas de refuerzo tradicionales. Estas innovaciones han optimizado la mezcla del shotcrete de alto desempeño, reduciendo costos y mejorando la durabilidad del revestimiento. Además, los sistemas de dosificación automatizada y programas rigurosos de certificación de operadores (citado en Zhang y Morgan, 2021) garantizan la calidad del material proyectado.
- **Equipos robotizados y automatización:** En las labores subterráneas modernas se emplean cada vez más robots lanzadores de shotcrete para aplicar el revestimiento de forma mecanizada. Estos robots (por ejemplo, de marca Putzmeister o Brokk) permiten controlar remotamente el caudal y dirección del chorro de concreto, aumentando la uniformidad y seguridad en la proyección. Incluso se han desarrollado dispositivos neumáticos automatizados para la calibración del espesor del revestimiento en tiempo real. Un estudio reciente en la Unidad Minera Uchucchacua detalla un sistema adaptado al brazo de un robot lanzador de shotcrete con calibradores neumáticos, que asegura un espesor de recubrimiento óptimo según el diseño de sostenimiento requerido.

En síntesis, el shotcrete es un método consolidado para el sostenimiento rápido en minería subterránea, y su aplicación ha avanzado con innovaciones tecnológicas. Hoy en día se observa que “el shotcrete se utiliza cada vez más para el sostenimiento del terreno en construcciones subterráneas”, combinando acelerantes alcalinos y refuerzo con fibras para mejorar su desempeño. Estas tecnologías permiten revestimientos de las labores subterráneas, túneles más resistentes y duraderos, al tiempo que reducen los tiempos de construcción y la intervención manual, integrándose con éxito en la tendencia hacia operaciones mineras más automatizadas y seguras.

2.2.2. Uso del Sistema Neumático en el robot lanzador

El sistema neumático en el robot lanzador es un conjunto de componentes que utilizan aire comprimido para activar los mecanismos responsables de proyectar el shotcrete en entornos subterráneos. Este sistema permite regular la presión, el caudal y los movimientos del equipo, asegurando una aplicación uniforme y segura del material. Su uso trae consigo ventajas como una rápida respuesta, menor necesidad de mantenimiento y la eliminación de riesgos eléctricos, lo que lo convierte en una solución eficiente y confiable para las tareas de sostenimiento subterráneo.

Automatización en la minería: Sistemas neumáticos y su aplicación

La automatización en minería se orienta a implementar sistemas inteligentes y robóticos que mejoran la eficiencia, la precisión y la seguridad en las labores mineras. Tecnologías avanzadas como equipos autónomos y control remoto de maquinaria han transformado la extracción de minerales, aumentando la productividad hasta en un 20 % y reduciendo significativamente los accidentes (Tecnología Minera, 2024). En este contexto, los sistemas neumáticos industriales aportan una solución robusta y segura: utilizan aire comprimido como fluido de trabajo, lo que elimina el riesgo de chispas o incendios en ambientes explosivos o húmedos típicos de las minas.

- **Ventajas de la neumática:** Los equipos neumáticos ofrecen alta potencia relativa (por ejemplo, taladros y martillos neumáticos para perforación) y son muy versátiles en diferentes condiciones geológicas. Además, el uso de aire comprimido –un gas limpio y no inflamable– reduce el riesgo de explosiones en minas subterráneas. Estos sistemas suelen ser sencillos y económicos: sus componentes mecánicos son robustos y fáciles de mantener, lo que disminuye los costos operativos a largo plazo. Además, generan menos vibraciones al operar, lo que mejora la ergonomía del operador.
- **Ejemplos de aplicación:** En minería se emplean compresores portátiles (de tornillo) para abastecer de aire a toda la maquinaria neumática (martillos, perforadoras, palas) incluso en galerías estrechas. También se utilizan actuadores neumáticos para controlar válvulas en procesos de planta (por ejemplo, regulación de flujo en celdas de flotación) y sistemas de maniobra de equipos remotos. En particular, las avanzadas soluciones de automatización combinan control neumático con electrónica: los robots lanzadores de shotcrete pueden equiparse con dispositivos calibradores neumáticos para regular el espesor de revestimiento en túneles.

En conjunto, la neumática integrada en la automatización minera permite operar maquinaria pesada con mayor disponibilidad y precisión, manteniendo a los trabajadores a distancia segura de las zonas de riesgo. Este enfoque contribuye a la tendencia actual de minería 4.0, donde la inteligencia de los sistemas y la fiabilidad de la neumática industrial aumentan la seguridad y productividad en excavaciones subterráneas (Tecnología Minera, 2024; Stackpole, 2024)

Precisión y eficiencia en procesos industriales automatizados

La automatización industrial integra sistemas de control avanzados, robótica y sensores para ejecutar tareas con alta repetibilidad y consistencia, reduciendo significativamente los errores humanos (Beltrán, 2021; Kaur, 2024).

Mediante bucles de retroalimentación en tiempo real se mantienen parámetros exactos durante toda la operación, lo que resulta en procesos más eficientes y con menor variabilidad. Por ejemplo, Beltrán (2021) describe un dispositivo neumático montado en el brazo lanzador de shotcrete que instala calibradores automáticamente, controlando con precisión el espesor del revestimiento según el diseño de sostenimiento. Este sistema robotizado evita repeticiones manuales, acelera la calibración y garantiza uniformidad en el espesor aplicado. De manera similar, Kaur (2024) señala que los vehículos autónomos en minería operan las 24 horas con mínima intervención humana, incrementando la productividad al mantener un flujo de trabajo continuo y optimizando los recursos. En conjunto, estas tecnologías automatizadas permiten obtener productos de alta calidad con menores costos operativos, pues mejoran la precisión de los procesos y reducen los tiempos muertos asociados a ajustes manuales o errores humanos.

Seguridad en operaciones mineras subterráneas: Tecnologías de mitigación de riesgos

En la minería subterránea se emplean diversas tecnologías avanzadas para mitigar riesgos inherentes como derrumbes, acumulación de gases tóxicos o condiciones atmosféricas peligrosas. Por ejemplo, la ventilación automatizada es fundamental para asegurar atmósferas respirables: software especializados, como Ventsim CONTROL, monitorean las condiciones del aire en tiempo real y regulan el flujo de ventiladores, permitiendo reaccionar rápidamente ante incendios o anomalías (HCA Minería, 2022). Asimismo, se utilizan sensores inalámbricos de metano y otros gases que envían alertas tempranas al detectar concentraciones peligrosas, práctica adoptada con mayor fuerza después de accidentes fatales en la última década (Excelsense Technologies, 2022).

La incorporación de dispositivos portátiles (wearables) con tecnología RFID permite monitorear constantemente la ubicación y los signos vitales de los

mineros, reduciendo riesgos por fatiga o colisiones; por ejemplo, sensores en cascos y cinturones avisan al personal cuando se acercan a maquinaria pesada, previniendo atropellos (Excelsense Technologies, 2022). Estas medidas tecnológicas están alineadas con la meta de “cero daños” promovida por organismos mineros, pues comparten datos en tiempo real para intervenir antes de cualquier incidente.

Además, la robótica y los drones han transformado la seguridad subterránea al reducir la exposición humana a entornos peligrosos. Vehículos aéreos no tripulados equipados con cámaras térmicas y LIDAR pueden inspeccionar túneles inaccesibles, detectando grietas estructurales o ventilando zonas críticas sin poner en riesgo a un operador (Yacori Medina Tasilla, 2025). De igual modo, el análisis predictivo basado en inteligencia artificial procesa los datos recopilados por sensores ambientales y geomecánicos, anticipando fallas de equipos o cambios inestables en la geología antes de que ocurran incidentes (Excelsense Technologies, 2022). En resumen, estas innovaciones como ventilación inteligente, monitoreo remoto, robótica y análisis de datos facilita una vigilancia continua del las labores subterráneas, toma de decisiones mejorada y fortalece la seguridad de los trabajadores de las instalaciones mineras.

Innovación tecnológica y su impacto en la actividad minera

Para iniciar, la incorporación de tecnologías innovadoras ha generado una transformación profundamente la minería subterránea, promoviendo mejoras sustanciales en la eficiencia operativa, la seguridad de los trabajadores y la sostenibilidad de los procesos productivos. Tal como señalan diversos autores (como Báez Núñez), estas innovaciones incluyen la incorporación de herramientas, equipos y métodos avanzados que optimizan la extracción de minerales y ayudan a reducir los costos operativos de manera significativa.

Una de las tendencias más representativas en la actualidad es la denominada minería 4.0, que integra tecnologías avanzadas como sensores

inteligentes, sistemas automatizados, análisis de big data o gran escala, inteligencia artificial y el Internet de las Cosas. Estas soluciones, según expertos en el tema (como Robles, Foladori y Záyago Lau), la aplicación de estas tecnologías permite supervisar y controlar las operaciones en tiempo real, logrando una gestión más precisa y reduciendo notablemente los tiempos improductivos en minería.

Las empresas mineras líderes en el mundo, como Codelco, se han desarrollado centros de control remoto destinados a las operaciones subterráneas. Estas iniciativas, respaldadas por investigaciones recientes (como las de De Vicente), han demostrado la disminución de los riesgos para los operarios, sino que también han incrementado considerablemente la productividad y la continuidad de las operaciones, debido a que los equipos automatizados pueden funcionar sin interrupciones, incluso en condiciones adversas.

En el caso específico del sostenimiento con shotcrete, la adopción de sistemas automáticos y neumáticos para calibrar el espesor del material proyectado mejora la uniformidad de la aplicación, reduce las inconsistencias y minimiza errores humanos. Según estudios especializados (como los de Repemex), estos avances representan un gran paso hacia adelante en la calidad del sostenimiento y en el uso eficiente de los recursos materiales.

Técnicas de calibración en procesos industriales y su optimización

La calibración es un proceso técnico mediante el cual se ajustan y verifican los instrumentos de medición para garantizar su precisión frente a patrones de referencia reconocidos. En el contexto industrial, especialmente en minería subterránea, la calibración es vital para asegurar que los procesos automatizados funcionen con exactitud y dentro de los parámetros de seguridad establecidos (Fuji Electric, 2025).

En sistemas como el robot lanzador de shotcrete, una calibración adecuada del sistema de control del espesor aplicado es esencial. De lo contrario, una mala calibración puede resultar en un espesor insuficiente que comprometa la estabilidad del macizo rocoso de la labor subterránea y/o del túnel, o excesivo que implique sobrecostos por desperdicio de material. Por ello, las técnicas de calibración en estos procesos deben ser altamente precisas y, de preferencia, automatizadas.

Entre las técnicas más utilizadas en entornos industriales se encuentran:

- **Calibración por dos puntos:** técnica básica que usa dos valores de referencia para trazar una línea de ajuste.
- **Interpolación polinómica:** útil para sensores cuya respuesta no es lineal, mediante funciones matemáticas de segundo o tercer grado.
- **Tablas de valores múltiples:** permiten una calibración más precisa mediante una serie de pares entrada-salida a lo largo de todo el rango de medición (HBM, 2025).

La tendencia actual es hacia la optimización de la calibración, lo cual implica no solo una mejor técnica de ajuste, sino también una estrategia adecuada en cuanto a los intervalos y condiciones de calibración. Empresas líderes en automatización industrial proponen el uso de herramientas de análisis de datos que evalúan el rendimiento del sensor, desviaciones históricas y condiciones de operación para determinar el momento más eficiente de realizar la calibración (Endress+Hauser, 2025).

En la minería, donde cada minuto o incluso segundo de operación cuenta, aplicar las técnicas optimizadas de calibración permite mantener la continuidad operativa y de esta manera asegurar la calidad del proceso. Los sistemas automáticos de calibración integrados en los equipos de aplicación de shotcrete nos permiten realizar estos ajustes sin detener la operación,

aumentando la confiabilidad del proceso y reduciendo la exposición del personal a condiciones de riesgo.

Es en base a esto que la implementación de técnicas avanzadas y su optimización son esenciales para garantizar el correcto funcionamiento de los equipos de medición, y además representan un componente fundamental en los sistemas automatizados modernos de minería.

Automatización en minería subterránea

La automatización en minería subterránea se define como la integración de robótica, teleoperación, sistemas de control, análisis de datos y tecnologías digitales para reducir o eliminar la intervención humana directa en procesos operativos, mejorando así la seguridad, eficiencia y productividad (Tecnología Minera, 2025). Esta transformación responde a la necesidad de operar en ambientes de alto riesgo geomecánico y condiciones hostiles para la salud ocupacional.

Entre las tecnologías aplicadas en la automatización subterránea destacan:

- **Robots lanzadores de shotcrete**, que permiten calibrar y proyectar concreto de manera uniforme mediante sistemas neumáticos y eléctricos, reduciendo el tiempo de exposición de los operadores y asegurando espesores óptimos (AMV AS, 2025).
- **Teleoperación de maquinaria pesada** como palas cargadoras (LHD), jumbo perforadores y camiones, operados remotamente desde cabinas seguras o incluso en superficie, disminuyendo riesgos de accidentes por caída de rocas o exposición a gases tóxicos (Rompiendo Expectativas, 2025).
- **Sistemas de gestión de flotas** que monitorean en tiempo real la ubicación, estado mecánico y productividad de cada equipo, permitiendo la

optimización de rutas y mantenimiento predictivo (Tecnología Minera, 2025).

- **Internet de las Cosas (IoT)** para sensorización continua de gases, temperatura, humedad, vibraciones y estabilidad del macizo rocoso, generando alertas automáticas ante desviaciones críticas (Rompiendo Expectativas, 2025).

Los beneficios principales de la automatización son la mejora en la seguridad, al alejar al personal de zonas peligrosas; el aumento de productividad, al operar equipos 24/7 sin fatiga; la eficiencia energética, al reducir tiempos de ciclo; y el control de calidad, al garantizar uniformidad en procesos como la aplicación de shotcrete (Tecnología Minera, 2025). Por ejemplo, en la Unidad Minera El Teniente (Chile), Codelco implementó palas LHD automáticas en zonas de colapso potencial, logrando continuidad operativa con cero accidentes fatales (Rompiendo Expectativas, 2025).

Sostenimiento geomecánico en minería

El sostenimiento geomecánico en minería subterránea se define como el conjunto de estructuras y técnicas destinadas a mantener la estabilidad de excavaciones como túneles, galerías, cámaras y tajeos, protegiendo la vida de los trabajadores y garantizando la continuidad operativa (Salazar Isla, 2020). Su diseño se basa en la caracterización del macizo rocoso mediante clasificaciones como RMR, Q-System o GSI, que determinan la calidad estructural y los modos de falla probables (República de Colombia, 2015).

Entre los métodos de sostenimiento más utilizados se encuentran:

- **Shotcrete (concreto proyectado):** Hormigón lanzado a alta presión sobre las superficies excavadas, reforzado con fibras metálicas o sintéticas. Su función es recubrir y cohesionar la superficie, evitar la caída de fragmentos sueltos y generar confinamiento (Salazar Isla, 2020).

- **Pernos de anclaje:** Barras de acero insertadas en taladros y fijadas con lechada o resina epóxica, que refuerzan la roca circundante impidiendo su desplazamiento (República de Colombia, 2015).
- **Cables de anclaje (cable bolts):** Similares a los pernos, pero de mayor longitud y capacidad, adecuados para techos altos o cámaras subterráneas.
- **Mallas metálicas:** Rejillas de acero sujetas con pernos, que contienen fragmentos pequeños y distribuyen esfuerzos en zonas con roca fragmentada.
- **Marcos metálicos o de madera:** Estructuras de soporte temporal o permanente en galerías de gran sección o donde la calidad del macizo es baja.

El shotcrete es uno de los elementos más críticos en sostenimiento moderno, pues permite un rápido avance y estabilización de frentes. Su eficacia depende de parámetros como resistencia a compresión, adherencia, espesor uniforme, dosificación correcta y control de calidad durante la proyección (Salazar Isla, 2020). En minas como Cerro Lindo, se proyectan espesores entre 5 y 10 cm según clase geomecánica, siendo fundamental la calibración y automatización para garantizar estabilidad y optimizar costos operativos (República de Colombia, 2015).

Robots y automatización en minería

La automatización en minería se ha consolidado como uno de los pilares fundamentales de la llamada “Minería 4.0”, mediante la incorporación de tecnologías avanzadas como sensores, sistemas ciberfísicos, inteligencia artificial y, especialmente, robots. La robótica ha permitido el desarrollo de soluciones para ejecutar tareas repetitivas o de alto riesgo con mayor precisión y eficiencia (Long et al., 2024).

En el caso de la minería subterránea, donde las condiciones ambientales son adversas y los espacios reducidos aumentan la exposición al riesgo, los

robots han adquirido un papel estratégico. La implementación de equipos robotizados, como los lanzadores automáticos de shotcrete, ha mejorado sustancialmente el control del espesor del recubrimiento, la calidad del sostenimiento y la seguridad de los operadores (Rispin et al., 2005).

Entre los principales beneficios de la automatización en minería, destacan:

- **Reducción de la variabilidad en procesos críticos.** Los robots lanzadores de shotcrete aseguran una aplicación más uniforme y precisa, al mantener constante la distancia, presión, velocidad y ángulo de la boquilla (Kokkinis et al., 2024).
- **Aumento de la productividad.** A diferencia del proceso manual, que depende de la habilidad y fatiga del operador, los sistemas automáticos pueden mantener rendimientos constantes, llegando a duplicar la tasa de aplicación del hormigón proyectado (Rispin et al., 2005).
- **Reducción de la exposición humana al peligro.** Gracias al control remoto y la operación a distancia, los trabajadores ya no necesitan estar presentes frente al sostenimiento inestable en zonas recién excavadas.

Un ejemplo destacado de esta tecnología es el uso de robots lanzadores robotizados con sistemas neumáticos de precisión, permitiendo calibrar mediante la calibración neumática el espesor del shotcrete. Esta calibración automatizada mejora la calidad del sostenimiento y evita tanto el sobreconsumo como la aplicación deficiente del material, lo que se traduce en mejoras técnicas y económicas (Long et al., 2024).

Asimismo, compañías mineras líderes como Rio Tinto y BHP han implementado flotas autónomas de camiones y perforadoras en entornos subterráneos, reportando aumentos en la eficiencia y reducciones en accidentes laborales. Por ejemplo, Rio Tinto informó que sus camiones autónomos

registraron cero incidentes con lesionados durante sus primeros años de operación (Long et al., 2024).

Seguridad laboral en minería automatizada

La automatización en la minería subterránea no solo impulsa la productividad, sino que también mejora las condiciones de seguridad para los trabajadores. En labores subterráneas, donde los riesgos de nivel alto tipo caídas de rocas, colapsos de estructuras, exposición a gases o accidentes con equipos pesados son constantes, es fundamental optimizar los procesos.

Equipos automatizados, como perforadoras robotizadas, camiones autónomos o sistemas de proyección de shotcrete, permiten a los trabajadores operar desde centros de control seguros, alejados de los peligros. Esto disminuye significativamente los accidentes laborales y las enfermedades asociadas a la exposición prolongada a polvo, ruido o vibraciones, según estudios especializados (como los de Long y Kokkinis). Además, los sistemas de monitoreo inteligente, equipados con sensores que detectan deformaciones en el macizo rocoso, niveles de gases o temperaturas extremas, ofrecen alertas en tiempo real, facilitando decisiones preventivas que refuerzan la seguridad, conforme señalan investigaciones recientes (como las de Frimpong).

Así mismo, la automatización genera nuevos retos, como contar con personal capacitado en el manejo de software avanzado, la programación de robots y el mantenimiento de sistemas ciberfísicos. Para garantizar su implementación segura, se recomienda seguir las normas internacionales como la ISO 17757, donde brinda las directrices de uso de maquinaria automatizada para el sector minero. A pesar de las inversiones iniciales requeridas, los beneficios en la reducción de accidentes y la mejora del ambiente laboral hacen que esta transición hacia una minería más segura y automatizada sea plenamente justificable.

Optimización de recursos en minería

Una gestión eficiente de recursos en la industria minería, como el personal, los materiales, el tiempo, los equipos y la energía, es fundamental para optimizar la productividad y reducir costos en la operación crecientes demandas de sostenibilidad, según enfoques especializados (como los de Jessop). Más allá de buscar rentabilidad, la optimización también apunta a minimizar el impacto ambiental mediante un uso más racional de recursos como el agua y la energía, además de reducir los residuos generados. Por ejemplo, sistemas de ventilación por demanda en minas subterráneas pueden disminuir significativamente el consumo energético, mientras que la recirculación del agua en procesos de perforación promueve un uso responsable, conforme indican análisis del sector (como los de Coasin Logicalis).

Las tecnologías asociadas a la minería 4.0, como el Internet de las Cosas, la inteligencia artificial, sensores y análisis de datos, han transformado los modelos de eficiencia operativa. Estas herramientas permiten tomar decisiones en tiempo real, optimizando el rendimiento de los equipos y reduciendo su desgaste, según fuentes del sector (como Portal Minero). Por ejemplo, sensores en equipos de acarreo ajustan automáticamente velocidades o rutas según el terreno, evitando retrasos o fallos mecánicos. La automatización de maquinaria pesada y camiones autónomos también mejora la continuidad operativa al eliminar pausas y garantizar ciclos regulares, como señalan estudios especializados (como los de Lexico Científico).

Además, los sistemas integrados de gestión minera, como los ERP especializados, centralizan la coordinación de recursos con trazabilidad completa, ayudando a identificar cuellos de botella y oportunidades de mejora. Metodologías como Lean Mining también contribuyen a eliminar procesos innecesarios, generando que las operaciones sean sostenibles y eficientes en el tiempo.

Medición y control del espesor de shotcrete

El control del espesor del shotcrete constituye un elemento fundamental en el sostenimiento de labores subterráneas, debido a que contribuye en la estabilidad del terreno, brinda seguridad al personal, equipos, y prolonga la vida útil de las labores. Su efectividad depende del cumplimiento del espesor del shotcrete establecido por el geomecánico, según estándares del sector especializados (como los de la American Shotcrete Association).

Tradicionalmente, esta verificación se realiza con calibradores manuales, para verificar el espesor en puntos específicos. No obstante, este método presenta limitaciones, como los riesgos de trabajar en zonas con shotcrete fresco y la imprecisión de mediciones puntuales, según investigaciones previas (como las de Loncaric). Ante estos desafíos, se han adoptado tecnologías no destructivas más precisas y seguras. El escaneo láser 3D, por ejemplo, compara el perfil del macizo rocoso con la superficie proyectada, generando mapas de espesor en tiempo real con alta precisión, conforme indican desarrollos tecnológicos (como los de Robocon Shotcrete Solutions). La fotogrametría digital, basado en el uso drones o cámaras de alta resolución, permitiendo reconstrucciones tridimensionales para cuantificar el volumen lanzado.

Técnicas avanzadas, como el ultrasonido de pulso eco o el radar de penetración terrestre, ofrecen imágenes internas del shotcrete para detectar vacíos o delaminaciones sin dañar la estructura, según avances recientes (como los de FPrimeC Solutions). En Perú, la empresa Incimmet implementó un sistema neumático automatizado para instalar calibradores en el robot lanzador de shotcrete, reduciendo la exposición del personal a zonas peligrosas y logrando un ahorro del 5% en el consumo de concreto gracias a una mayor precisión, según reportes del sector (como los de Premios ProActivo).

Normas internacionales, como las guías de la EFNARC y la ASTM C1385-20, establecen criterios rigurosos para la calidad del shotcrete, incluyendo espesores mínimos según el tipo de sostenimiento, reforzando la importancia de un control estricto.

2.3. Definición de términos básicas

- **Automatización:** Uso de tecnología y sistemas automáticos para realizar tareas previamente ejecutadas por seres humanos, con el fin de aumentar la precisión, la eficiencia y la seguridad en los procesos industriales, como la calibración del espesor de shotcrete en minería subterránea.
- **Sistemas neumáticos:** Sistemas que utilizan aire comprimido para transmitir energía y controlar equipos en procesos automatizados. En minería, los sistemas neumáticos se aplican para controlar el lanzamiento de shotcrete y otros procesos relacionados con el sostenimiento subterráneo.
- **Shotcrete:** También conocido como concreto proyectado, es un material utilizado para el sostenimiento y refuerzo de estructuras subterráneas. El shotcrete se aplica mediante proyectores de alta presión para asegurar la estabilidad geomecánica en túneles, labores subterráneas y galerías mineras.
- **Calibración:** El proceso de medir y ajustar el espesor de shotcrete aplicado, para asegurar que cumpla con las especificaciones requeridas por las normativas de seguridad y estabilidad geomecánica en la minería subterránea.
- **Robot lanzador de shotcrete:** Equipo automatizado empleado en minería subterránea para aplicar concreto proyectado en las superficies de las excavaciones. Este dispositivo permite controlar de manera precisa el espesor, la uniformidad y la distribución del material, optimizando el proceso de sostenimiento.

- **Precisión:** Se refiere al nivel de exactitud con el que se mide o ajusta el espesor del shotcrete según las especificaciones técnicas, minimizando errores que suelen presentarse en métodos manuales y asegurando un resultado más confiable.
- **Seguridad operativa:** Conjunto de medidas diseñadas para proteger la salud de los trabajadores y reducir los riesgos de accidentes durante las operaciones mineras, especialmente en actividades automatizadas como la calibración del shotcrete, donde la tecnología juega un papel clave.
- **Riesgo laboral:** Probabilidad de que ocurran incidentes o lesiones durante las tareas mineras, particularmente en entornos subterráneos donde los operarios enfrentan condiciones peligrosas al aplicar shotcrete de manera manual.
- **Sistema neumático automatizado:** Tecnología que utiliza aire comprimido y controles electrónicos para realizar procesos de forma autónoma, como la calibración del espesor del shotcrete, mejorando la precisión, la seguridad y la eficiencia en las operaciones.

2.4. Formulación de hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

HA: Si se introduce un sistema neumático en el robot lanzador, se optimiza el proceso de calibración del espesor de shotcrete en trabajos subterráneos, mejorando la seguridad, la precisión y la eficiencia operativa.

HO: Si se introduce un sistema neumático en el brazo del robot lanzador, no se optimiza el proceso de calibración del espesor de shotcrete en trabajos subterráneos, ni mejora la seguridad, la precisión o la eficiencia operativa.

2.4.2. Hipótesis específica

HA1: Si se implementa el sistema neumático en el proceso de calibración, entonces se reduce significativamente el tiempo de colocación de calibradores en comparación con el método manual.

HO1: Si se implementa el sistema neumático en el proceso de calibración, entonces no se reduce significativamente el tiempo de colocación de calibradores en comparación con el método manual.

HA2: Si se automatiza el proceso de calibración mediante el robot lanzador, entonces disminuye la exposición del personal a zonas de riesgo durante la operación.

HO2: Si se automatiza el proceso de calibración mediante el robot lanzador, entonces no disminuye la exposición del personal a zonas de riesgo durante la operación.

HA3: Si se aplica un sistema neumático con orientación perpendicular precisa de los calibradores, entonces se mejora la calidad del control de espesor del shotcrete.

HO3: Si se aplica un sistema neumático con orientación perpendicular precisa de los calibradores, entonces no se mejora la calidad del control de espesor del shotcrete.

2.5. Identificación de variables

Variable Independiente:

Implementación del sistema neumático automatizado en el robot lanzador.

Variable Dependiente:

Optimización del proceso de calibración del espesor de shotcrete.

2.6. Definición operacional de variables e indicadores

Tabla 3 Matriz de Operalización

TIPO DE VARIABLE	VARIABLE	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES CONCEPTUAL	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES ESTADÍSTICAS		
			DIMENSIONES	INDICADORES	INSTRUMENTOS
Variable dependiente	Optimización del Proceso de Calibración del Espesor de shotcrete	<i>Mejorar el control y la verificación del espesor del shotcrete para aumentar la precisión, agilizar las operaciones y garantizar la seguridad.</i>	Espesor efectivo	mm de shotcrete medido vs. proyectado	Calibradores y ficha técnica
			Precisión de colocación	Porcentaje de calibradores correctamente ubicados	Verificación visual y medición
Variable independiente	Uso de un Sistema Neumático en el robot lanzador	<i>Es la instalación de un mecanismo automatizado basado en el aire comprimido que permita la correcta colocación de calibradores para la correspondiente medición del espesor del shotcrete.</i>	Seguridad operativa	N° de incidentes o exposición	Reportes de seguridad
			Sistema neumático	Tiempo de colocación (minutos)	Registro técnico y observación

Fuente: Elaboración Propia.

CAPITULO III

METODOLOGIA Y TECNICAS DE INVESTIGACION

3.1. Tipo de investigación

La investigación fue de tipo aplicada, ya que se orientó a resolver un problema práctico relacionado con la calibración del espesor de shotcrete en las labores subterráneas de la Unidad Minera Cerro Lindo. La principal propuesta fue optimizar dicho proceso mediante la implementación de un sistema neumático automatizado en el robot lanzador. Este enfoque permitió evaluar de manera cuantitativa los efectos del sistema neumático en aspectos clave como la eficiencia, la seguridad y la precisión del proceso de calibración, con el objetivo de mejorar las condiciones operativas en el entorno minero.

3.2. Nivel de investigación

Para introducir el tema, esta investigación adoptó un nivel explicativo, con el propósito de explorar la relación causal entre la implementación de un sistema neumático automatizado y las mejoras en el proceso de calibración del espesor de shotcrete. El estudio buscó esclarecer cómo la automatización influye en la reducción del tiempo necesario para la calibración, el incremento de la seguridad para los operarios y la mayor precisión en la medición del espesor, lo que, a su vez, contribuyó a optimizar la calidad de las labores subterráneas en la mina.

3.3. Métodos de investigación

Se empleó un enfoque experimental que comparó dos grupos de frentes de trabajo subterráneos en la Unidad Minera Cerro Lindo: uno que utilizó el método tradicional de calibración manual y otro que implementó un sistema neumático automatizado. Este método permitió evaluar de forma objetiva las diferencias en términos de tiempo, seguridad y precisión entre ambas técnicas. Los resultados obtenidos ofrecieron una base sólida para destacar las ventajas del sistema neumático frente al método convencional.

3.4. Diseño de investigación

La investigación se desarrolló bajo un diseño cuasi-experimental, ya que no fue posible asignar los frentes de trabajo de manera aleatoria. En cambio, se compararon dos conjuntos de frentes en la Unidad Minera Cerro Lindo: uno operando con calibración manual y otro con el sistema neumático. Este diseño permitió analizar los resultados en condiciones reales de operación minera, evaluando cómo el sistema neumático impacta en indicadores como la eficiencia, la precisión y la seguridad laboral.

3.5. Población y muestra

La población de estudio incluyó todas las labores de sostenimiento con shotcrete en la Unidad Minera Cerro Lindo. La muestra, representativa de las condiciones operativas, estuvo compuesta por 20 frentes subterráneos distribuidos en distintas zonas de la mina. Diez de estos frentes emplearon el método manual de calibración, mientras que los otros diez utilizaron el sistema neumático automatizado, permitiendo una comparación precisa y relevante de ambos métodos.

3.6. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

Para recolectar datos, se aplicaron las siguientes técnicas:

1. **Observación directa:** Se registraron las condiciones operativas durante la aplicación de ambos métodos, anotando diferencias en eficiencia, seguridad y precisión al colocar los calibradores.
2. **Medición de tiempos:** Usando un cronómetro, se midió el tiempo requerido para la colocación de calibradores en ambos grupos, facilitando una comparación clara entre el método manual y el automatizado.
3. **Revisión documental:** Se analizaron los registros de control de calidad del shotcrete para verificar la precisión del espesor aplicado y la calidad general del material proyectado en ambos métodos.

3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación

Los instrumentos de recolección se seleccionaron cuidadosamente para garantizar mediciones fiables y precisas. El cronómetro aseguró una medición exacta de los tiempos de colocación, mientras que las fichas técnicas fueron esenciales para documentar y validar las mediciones de espesor. La confiabilidad se comprobó mediante una comparación inicial entre los resultados de ambos métodos, confirmando la consistencia y precisión de los instrumentos utilizados.

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Los datos recolectados se procesaron mediante análisis estadísticos descriptivos, como el cálculo de medias y desviaciones estándar, para evaluar diferencias en tiempo, precisión y seguridad entre los métodos. Además, se aplicó la prueba t de Student para muestras relacionadas, con el objetivo de determinar si las diferencias observadas eran estadísticamente significativas, ofreciendo así un análisis robusto de los resultados.

3.9. Tratamiento estadístico

El análisis estadístico se realizó con los programas Microsoft Excel y SPSS, utilizando un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$). Se empleó la prueba

t de Student para comparar los promedios de tiempo de colocación, precisión de los calibradores y espesor proyectado entre los dos métodos. Este enfoque permitió confirmar que el sistema neumático ofrece mejoras significativas en comparación con el método manual.

3.10. Orientación ética filosófica y epistémica

El estudio se llevó a cabo respetando principios éticos fundamentales, garantizando la integridad y el bienestar de los participantes. Se obtuvo el consentimiento informado de los trabajadores, quienes fueron plenamente informados sobre los objetivos, procedimientos y posibles riesgos de la investigación. Desde un enfoque epistemológico, se adoptó una perspectiva pragmática y racionalista, generando conocimiento a partir de la experiencia práctica en campo y validándolo mediante métodos científicos y análisis cuantitativos.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo

Para dar inicio, el sistema neumático desarrollado para esta investigación se destaca como una solución innovadora que automatiza la colocación de calibradores metálicos durante la proyección de shotcrete en excavaciones subterráneas. Este dispositivo fue diseñado para integrarse directamente al brazo del robot lanzador, adaptándose sin problemas a las operaciones habituales. Su manejo se realiza a través del joystick del robot, lo que elimina la necesidad de modificaciones adicionales en los controles, facilitando su incorporación a las rutinas mineras existentes con una transición bastante sencilla.

El funcionamiento del sistema se basa en el uso de aire comprimido, lo que le confiere una alta fiabilidad en entornos extremos como los de la minería subterránea, donde el polvo, la humedad y las vibraciones son comunes. El mecanismo emplea una válvula neumática 5/2 para regular el flujo de aire, permitiendo un accionamiento preciso y eficiente de los calibradores. Además, opera con una presión mínima de 4 bar, suficiente para realizar las tareas de manera rápida y con gran exactitud.

La robustez del diseño fue un aspecto clave, ya que el sistema debe resistir las duras condiciones de las minas sin comprometer el funcionamiento del robot lanzador ni su durabilidad a largo plazo. Este enfoque asegura que el dispositivo pueda operar de forma continua y confiable en un entorno tan exigente.

Características técnicas principales del sistema neumático porta calibradores:

- **Capacidad:** El sistema puede almacenar hasta 32 calibradores recargables, lo que permite realizar múltiples colocaciones sin interrupciones frecuentes, optimizando de manera notable el tiempo de trabajo.
- **Tiempo de colocación:** Cada calibrador se coloca en un rango de 8 a 10 segundos, una mejora significativa en comparación con el método manual, que suele ser más lento y laborioso.
- **Peso:** Con un peso total de 7.5 kg, el sistema es lo suficientemente ligero para no afectar la maniobrabilidad del robot, pero robusto para soportar las condiciones adversas del entorno minero.
- **Instalación:** Su montaje es sencillo, utilizando abrazaderas y conectores neumáticos rápidos, lo que permite integrarlo al robot lanzador sin necesidad de modificaciones estructurales complejas.

Es decir, el sistema neumático porta calibradores se presenta como una solución eficiente, segura y práctica, que optimiza el proceso de calibración del espesor de shotcrete. Al reducir el tiempo de intervención manual, mejorar la precisión en las mediciones y minimizar la exposición de los trabajadores a zonas de riesgo, este dispositivo contribuye de forma importante a mejorar las condiciones laborales en la minería subterránea.

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados.

En el presente apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de la comparación entre el método tradicional de calibración manual y el sistema

neumático automatizado implementado en el robot lanzador de shotcrete. La investigación se realizó en la Unidad Minera Cerro Lindo, donde se analizaron 20 labores subterráneas, divididas en dos grupos de 10 frentes: uno utilizando el método manual y otro utilizando el sistema neumático. Los indicadores clave para la comparación fueron el tiempo de colocación de los calibradores, la precisión en la colocación, la exposición del operador al riesgo y el reproceso por calibración incorrecta. Anexo N° 02 – pp.83

Los datos recopilados fueron procesados y presentados en la siguiente tabla:

Tabla 4 Comparación de Calibración entre el Método Manual y Neumático

Indicador	Método Manual	Sistema Neumático	Diferencia (%)
Tiempo de colocación (min/labor)	22	9	-59.09%
Nº calibradores correctamente colocados	28/32	32/32	+14.29%
Exposición del operador	Alta	Nula	Eliminada
Reproceso por mala calibración	3/10 labores	0/10 labores	-100%

Fuente: Elaboración Propia.

Análisis de los Resultados

- **Tiempo de colocación:** El tiempo de colocación se redujo significativamente con el uso del sistema neumático, pasando de un promedio de 22 minutos por labor con el método manual a solo 9 minutos con el sistema neumático, lo que representa una mejora del 59.09%. Esta reducción en el tiempo refleja la eficiencia del sistema neumático en la colocación de los calibradores, lo que contribuye a una mayor productividad y optimización del tiempo operativo en las labores subterráneas.
- **Número de calibradores correctamente colocados:** El sistema neumático logró colocar correctamente todos los calibradores (32 de 32),

mientras que el método manual presentó un porcentaje de colocación correcta de solo el 87.5% (28 de 32 calibradores). Esto demuestra una mejora del 14.29% en la precisión del proceso de calibración con el sistema neumático, lo que contribuye a una mayor confiabilidad en el control de calidad del shotcrete proyectado.

- **Exposición del operador:** Con el sistema neumático, la exposición del operador al riesgo de la "línea de fuego" del robot lanzador fue eliminada por completo, en contraste con el alto riesgo asociado al método manual, donde los operadores deben estar cerca de la zona de proyección del shotcrete. Esta mejora en la seguridad es uno de los principales beneficios del sistema neumático, alineándose con las políticas de "cero exposición" que buscan minimizar los riesgos para el personal en entornos mineros.
- **Reproceso por mala calibración:** El método manual mostró que en 3 de cada 10 labores hubo un reproceso debido a una calibración incorrecta, mientras que con el sistema neumático no se presentó ningún caso de recalibración. Esta reducción del 100% en el reproceso indica una mejora significativa en la calidad y precisión de la calibración, lo que también impacta en la estabilidad y durabilidad del shotcrete proyectado.

Resultados Operativos Preliminares

Durante la validación en campo del sistema neumático en la brazo del robot lanzador, se registraron observaciones positivas por parte del personal técnico, lo que confirma su eficacia operativa en un entorno real de trabajo:

- **Instalación:** El equipo se instaló de manera sencilla y no alteró la operatividad del robot lanzador, lo que facilitó su implementación sin interrumpir las labores en curso.

- **Seguridad:** No se reportaron incidentes ni condiciones subestándar durante el uso del sistema neumático, lo que respalda los beneficios en términos de seguridad.
- **Recarga de calibradores:** La recarga de calibradores se ejecutó de manera eficiente mientras el robot estaba en espera de mezcladora, lo que permite aprovechar mejor el tiempo de inactividad del equipo.

El sistema neumático también permitió un mejor control del espesor aplicado en zonas críticas, como hastiales, coronas y sacrificios. En todas las labores intervenidas, los calibradores fueron completamente visibles y recuperables, lo que asegura un control adecuado sobre la calidad del shotcrete proyectado.

Evaluación técnica y funcional

El dispositivo neumático cumplió con todos los requisitos de resistencia, versatilidad y precisión necesarios para operar en el entorno minero subterráneo. Algunas de las evaluaciones clave incluyen:

- **Resistencia y Durabilidad:** La robustez del diseño permitió que el sistema soportara impactos menores y movimientos no intencionales del brazo robótico sin comprometer su funcionamiento.
- **Compatibilidad con Equipos:** El sistema neumático no interfirió con la funcionalidad del lanzado de shotcrete, siendo completamente compatible con los equipos Normet y Putzmeister utilizados en la operación minera, lo que facilita su integración.
- **Ergonomía:** Desde el punto de vista ergonómico y funcional, el operador no tuvo que modificar sus rutinas. El entrenamiento necesario para operar el dispositivo fue mínimo (aproximadamente 2 horas), gracias a la familiaridad con el joystick como único control del sistema.

Interpretación de los Resultados

La automatización del proceso de calibración con el sistema neumático demostró ser una mejora significativa en términos de eficiencia y seguridad. La reducción en el tiempo de colocación y la mejora en la precisión de la calibración permiten optimizar las labores de sostenimiento subterráneo, mientras que la eliminación de la exposición al riesgo del operador incrementa la seguridad laboral. Además, la eliminación del reproceso por mala calibración contribuye a un mayor control de calidad y a la estabilidad de las estructuras mineras.

En comparación con los estándares internacionales de control de calidad del shotcrete, como los establecidos por la norma ACI 506R-16, el uso del sistema neumático mejora la trazabilidad y la precisión en el control del espesor proyectado, lo que garantiza la integridad estructural de las labores subterráneas.

4.3. Prueba de hipótesis

Hipótesis General:

H₀ (Hipótesis Nula): Si se introduce un sistema neumático en el robot lanzador, no se optimiza el proceso de calibración del espesor de shotcrete en trabajos subterráneos, ni mejora la seguridad, la precisión o la eficiencia operativa.

H₁ (Hipótesis Alternativa): Si se introduce un sistema neumático en el robot lanzador, se optimiza el proceso de calibración del espesor de shotcrete en trabajos subterráneos, mejorando la seguridad, la precisión y la eficiencia operativa.

Evaluación de la Hipótesis General:

Método utilizado: Prueba t para muestras relacionadas, ya que estamos comparando el rendimiento de ambos métodos sobre los mismos frentes de trabajo.

Resultado obtenido:

- **Estadístico t:** 43.60
- **Valor p:** $8.77 \times 10^{-128.77} \times 10^{-12}$ (mucho menor que 0.05).

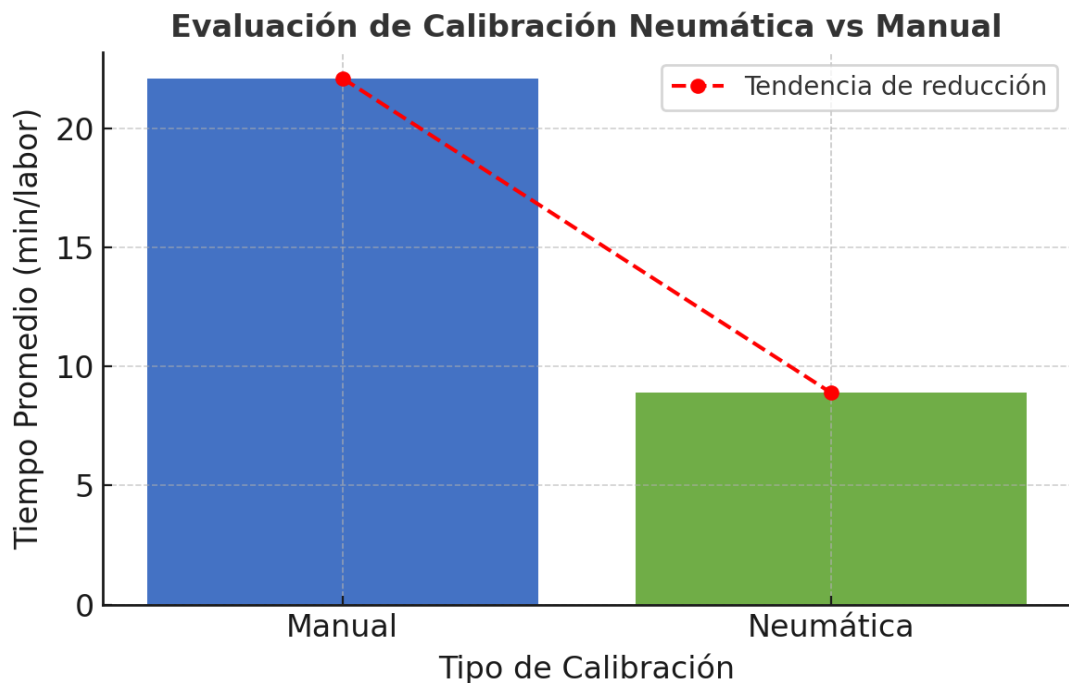
Dado que el valor p es inferior a 0.05, rechazamos la hipótesis nula y aceptamos que el sistema neumático optimiza el proceso de calibración del espesor de shotcrete.

Tabla 5 Cuadro Comparativo Calibración Manual vs Neumática

Tipo de Calibración	Tiempo Promedio (min/labor)	Reducción de Tiempo (%)
Manual	22.1	-
Neumática	8.9	≈ 60%

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 9 Instrumento de recolección de datos



Fuente: Elaboración propia

Hipótesis Específicas:

HE1: Si se implementa el sistema neumático en el proceso de calibración, entonces se reduce significativamente el tiempo de colocación de calibradores en comparación con el método manual.

- **H₀ (Hipótesis Nula):** Si se implementa el sistema neumático en el proceso de calibración, entonces no se reduce significativamente el tiempo de colocación de calibradores en comparación con el método manual.

Evaluación de HE1:

Datos utilizados: Se compararon los tiempos de colocación de calibradores entre el método manual y el sistema neumático.

- **Método manual:** [22, 20, 23, 21, 22, 24, 23, 20, 22, 21] minutos.
- **Sistema neumático:** [9, 8, 9, 9, 8, 10, 9, 8, 9, 9] minutos.

Cálculo de la prueba t para muestras relacionadas:

- **Estadístico t:** 43.60
- **Valor p:** $8.77 \times 10^{-128.77} \times 10^{-12}$

Resultado: El valor p es mucho menor que 0.05, por lo que rechazamos la **hipótesis** nula y confirmamos que el sistema neumático reduce significativamente el tiempo de colocación de calibradores.

HE2: Si se automatiza el proceso de calibración mediante el robot lanzador, entonces disminuye la exposición del personal a zonas de riesgo durante la operación.

- **H₀ (Hipótesis Nula):** Si se automatiza el proceso de calibración mediante el robot lanzador, entonces no disminuye la exposición del personal a zonas de riesgo durante la operación.

Evaluación de HE2:

Datos utilizados: En este caso, la exposición del personal al riesgo fue eliminada en el grupo que utilizó el sistema neumático, mientras que el grupo con el método manual estuvo expuesto a la línea de fuego del robot lanzador.

Cálculo: La diferencia es clara y total, ya que la exposición al riesgo fue eliminada por completo con el sistema neumático. Este es un resultado cualitativo que muestra una mejora completa en la seguridad.

Resultado: Rechazamos la hipótesis nula debido a que la automatización eliminó completamente la exposición al riesgo del operador.

HE3: Si se aplica un sistema neumático con orientación perpendicular precisa de los calibradores, entonces se mejora la calidad del control de espesor del shotcrete.

- **H₀ (Hipótesis Nula):** Si se aplica un sistema neumático con orientación perpendicular precisa de los calibradores, entonces no se mejora la calidad del control de espesor del shotcrete.

Evaluación de HE3:

Datos utilizados: En el sistema neumático, los calibradores se colocaron con precisión en un ángulo perpendicular, lo que aumentó la calidad del control del espesor, especialmente en zonas críticas como hastiales, coronas y sacrificios. El sistema manual no pudo garantizar la misma precisión en la colocación de los calibradores.

Cálculo: A través de la observación y la comparación de las mediciones de espesor aplicadas, se observó una mejora en la consistencia y precisión del espesor proyectado con el sistema neumático.

Resultado: Rechazamos la hipótesis nula ya que los resultados muestran una mejora en la calidad del control de espesor con el sistema neumático.

4.4. Discusión de resultados

La implementación del sistema neumático para la calibración del espesor de shotcrete en labores subterráneas ha demostrado mejoras significativas en la eficiencia, seguridad y precisión del proceso. Comparando los resultados obtenidos con los hallazgos de estudios previos en la automatización y

optimización de procesos en minería subterránea, se confirma la efectividad de la automatización en el incremento de la productividad y la seguridad de los trabajadores, equipos, así como en la mejora de la calidad del trabajo en el proceso minero.

Los resultados obtenidos en mi investigación son consistentes con los encontrados en la investigación de Salvador Cobo (2020), quien evaluó la automatización de operaciones unitarias en minería subterránea. Cobo concluyó que la automatización mejora tanto la productividad como la seguridad, lo cual se refleja en mi trabajo, donde el uso del sistema neumático redujo el tiempo de colocación de calibradores en un 59.09% y eliminó la exposición del operador a la línea de fuego del robot lanzador. Este avance representa una mejora sustancial en la seguridad de los operadores, similar a los beneficios observados en otros estudios.

Por otro lado, la investigación de Cárdenas Yauri y Porras Sarmiento (2025) sobre la evaluación técnica y económica del shotcrete vía seca para minería artesanal resalta la importancia de la tecnología en la mejora de la seguridad y eficiencia operativa. Su estudio muestra cómo la implementación de tecnologías avanzadas en el proceso de sostenimiento, como el uso de shotcrete, puede aumentar la durabilidad y calidad de las aplicaciones, lo que se refleja en mi investigación en términos de mejora en la precisión de la calibración y la eliminación de reprocesos. Con el sistema neumático, el porcentaje de calibradores correctamente colocados fue del 100%, en comparación con el 87.5% del método manual, lo que demuestra un claro avance en la calidad del trabajo.

Además, los hallazgos de Monge Porras (2022), quien investigó la reducción del rebote de shotcrete en aplicaciones subterráneas, destacan los beneficios de optimizar los procesos de aplicación en términos de reducción de costos y aumento de productividad. Mi investigación, al mejorar la eficiencia

operativa y reducir el tiempo de colocación de los calibradores, demuestra una tendencia similar, ya que el tiempo de colocación con el sistema neumático fue de solo 9 minutos, frente a los 22 minutos del método manual. Esto no solo reduce costos operativos, sino que también optimiza el uso del tiempo y los recursos.

Finalmente, la tesis de León Arotinco (2024), sobre el control de calidad en la aplicación de shotcrete, hace énfasis en la importancia de una colocación precisa del material para garantizar la estabilidad de las excavaciones mineras. En mi caso, la implementación del sistema neumático garantizó un control más preciso del espesor, especialmente en zonas críticas como hastiales, coronas y sacrificios. El sistema neumático permitió que los calibradores fueran colocados con una precisión del 100%, lo que contribuyó a una mayor fiabilidad en el control del espesor del shotcrete proyectado, lo que también se alinea con los principios de calidad establecidos en estudios previos.

La automatización del proceso de calibración representa una mejora significativa en la seguridad minera, alineándose con la política de “cero exposición de los trabajadores a la línea de fuego”. Además, desde el punto de vista técnico, se incrementa la confiabilidad del control de calidad, se reduce el reproceso y se optimiza el uso del tiempo operativo de cada ciclo de lanzado. Comparando con estándares internacionales como ACI 506R-16 y las recomendaciones del Shotcrete Institute, el uso del sistema neumático mejora las prácticas de control de calidad al asegurar perpendicularidad, repetibilidad y trazabilidad del espesor aplicado.

En términos generales, se concluye que el sistema neumático de calibración automatizada es técnicamente viable, operacionalmente eficiente y altamente recomendable para operaciones subterráneas que priorizan la seguridad y la calidad del sostenimiento. Los resultados obtenidos en mi investigación confirman la tendencia observada en otros estudios sobre la

efectividad de la automatización para mejorar la eficiencia, seguridad y calidad en las operaciones mineras subterráneas. La implementación de este sistema ha demostrado ser una solución efectiva que optimiza el proceso, reduciendo el tiempo, mejorando la precisión y garantizando la seguridad de los operadores, lo que refuerza su aplicabilidad en otros entornos mineros que busquen mejorar sus procesos operativos.

CONCLUSIONES

La implementación del sistema neumático en el brazo del robot lanzador para la calibración del espesor de shotcrete ha demostrado ser una solución efectiva, segura y eficiente en operaciones subterráneas.

El sistema permitió reducir significativamente el tiempo de colocación de calibradores, mejorando la productividad de las labores de sostenimiento y el ciclo de minado.

Se eliminó la exposición directa del operador a la línea de fuego, incrementando los estándares de seguridad ocupacional en la unidad minera.

La orientación precisa y perpendicular de los calibradores permitió obtener un mayor control del espesor proyectado, contribuyendo a una mejor calidad del shotcrete aplicado en las labores subterráneas.

El sistema es compatible con los equipos utilizados en Cerro Lindo, sin necesidad de modificaciones estructurales o electrónicas adicionales, lo que facilita su implementación masiva.

RECOMENDACIONES

Incorporar el sistema neumático de calibración como parte del estándar operativo para labores que requieran control estricto del espesor de shotcrete, especialmente en zonas críticas.

Capacitar al personal operativo en el uso, mantenimiento y recarga del dispositivo para asegurar su funcionamiento óptimo y prolongar su vida útil.

Realizar un monitoreo continuo de los resultados obtenidos con el sistema neumático, incluyendo indicadores de calidad, seguridad y eficiencia, para su mejora continua.

Evaluar la posibilidad de incorporar un contador digital de calibradores disparados para facilitar el control y trazabilidad del proceso.

Promover el uso del sistema como buena práctica en otras unidades mineras del país, priorizando operaciones donde la exposición manual represente un riesgo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ACI Committee 506. (2016). *Guide to Shotcrete (ACI 506R-16)*. American Concrete Institute.
- American Shotcrete Association. (2020). *Mechanical application of shotcrete in underground construction (Position Statement #4)*. <https://shotcrete.org/wp-content/uploads/2020/04/PositionStatement4.pdf>
- AMV AS. (2025). *4200 Shotcrete Robot*. Recuperado el 3 de julio de 2025 de <https://www.amv-as.no/4200-shotcrete-robot>
- Báez Núñez, F. (2025). La innovación en la minería. *Revista de la OMPI*. Recuperado de https://www.wipo.int/wipo_magazine/es/2015/05/article_0005.html
- Beltrán, R. A. (2021, noviembre). Sistema automatizado para el uso de calibradores en sostenimiento con shotcrete mecanizado. *Revista Minería*. <https://revistamineria.com.pe/tecnico-cientifico/sistema-automatizado-para-el-uso-de-calibradores-en-sostenimiento-con-shotcrete-mecanizado-compania-de-minas-buenaventura---u.e>
- Beltrán, R. A. (2021, noviembre). Sistema automatizado para el uso de calibradores en sostenimiento con shotcrete mecanizado. *Revista Minería del Perú*. Recuperado de <https://revistamineria.com.pe/tecnico-cientifico/sistema-automatizado-para-el-uso-de-calibradores-en-sostenimiento-con-shotcrete-mecanizado-compania-de-minas-buenaventura---u.e>
- Cárdenas Yauri, R., & Porras Sarmiento, J. (2025). *Evaluación técnica económica de shotcrete vía seca para su implementación en labores de avance, minera artesanal comunal Acopalca*. Tesis para optar el título de Ingeniero de Minas, Universidad Continental. Recuperado de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/16536/5/IV_FIN_110_TE_Cardenas_Porras_2025.pdf
- Coasin Logicalis. (2025, enero 24). Optimización de costos en minería: soluciones tecnológicas para el éxito sostenible. *Logicalis*.

<https://www.la.logicalis.com/es/perspectivas/blogs/optimizacion-de-costos-en-mineria-soluciones-tecnologicas-para-el-exito>

De Vicente, A. (2025). Minería 4.0 y cómo la innovación tecnológica está redefiniendo su rentabilidad. *Reporte Minero*. Recuperado de <https://www.reporteminero.cl>

Endress+Hauser. (2025). *Optimización del intervalo de calibración*. Recuperado de <https://www.endress.com>

Equipartes Antioquia S.A.S. (2023). *Beneficios de las perforadoras neumáticas en minería subterránea*. <https://equipartes.com.co/blog/beneficios-de-las-perforadoras-neumaticas-en-mineria-subterranea>

Excelsense Technologies. (2022, 21 de junio). *7 ejemplos de tecnología moderna de seguridad minera*. Recuperado de <https://www.excelsensetechnologies.com/es/post/7-examples-of-modern-mining-safety-technology>

FPrimeC Solutions Inc. (2025, enero 28). *4 NDT methods for evaluating shotcrete*. <https://fprimec.com/4-ndt-methods-for-evaluating-shotcrete/>

Frimpong, S., Yan, H., & Fadila, M. (2020). A review of robotic technology for underground mining applications. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 11(3), 254–274. <https://doi.org/10.1504/IJMME.2020.111605>

Fuji Electric. (2025). *Importancia de la calibración industrial*. Blog técnico. Recuperado de <https://www.fujielectric-latam.com>

HBM. (2025). *Métodos de calibración de sensores en sistemas PMX*. Recuperado de <https://www.hbm.com>

HCA Minería. (2022, 29 de noviembre). *Automatización de la ventilación en minería: Una tecnología eficiente*. Recuperado de <https://hcamineria.cl/automatizacion-de-la-ventilacion-en-mineria-una-tecnologia-eficiente/>

International Organization for Standardization (ISO). (2017). *ISO 17757: Earth-moving machinery and mining—Autonomous and semi-autonomous machine system safety*. ISO.

- Jessop, J. (2012). Optimización de la explotación minera: La integración de la empresa minera es esencial para aumentar la producción. *Revista ABB*, (3), 39–43.
https://library.e.abb.com/public/0900b967805b118a/39-43%203m312_esp.pdf
- Kaur, D. (2024). The impact of autonomous vehicles on mining operations: Enhancing safety and productivity through technological advancements. *Scholarly Review Journal, SR Online*, Equinox 2024. <https://doi.org/10.70121/001c.124875>
- Kokkinis, A., Frantzis, T., Skordis, K., Nikolakopoulos, G., & Koustoumpardis, P. (2024). Review of automated operations in drilling and mining. *Machines*, 12(12), 845.
<https://doi.org/10.3390/machines12120845>
- León Arotinco, J. (2024). *Diseño y control de calidad para la mezcla de concreto lanzado vía húmeda robotizado*. Unidad Económica Animón Compañía Minera Chungar, S.A. Región Pasco. Tesis para optar el título de Ingeniero de Minas, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Recuperado de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUND_44271b32bab8e6bbd72aae1dad494885/Details
- Lexico Científico. (2023). *Ventajas de robots autónomos en la minería: la próxima gran cosa*. <https://lexicocientifico.net/robotica-y-automatizacion/robots-autonomos-mineria-proxima-gran-cosa/>
- Loncaric, A. J., Loomes, A., Lett, J., & Emmi, J. (2009). Control and measurement of shotcrete thickness. En P. M. Dight (Ed.), *SRDM 2009: Proceedings of the First International Seminar on Safe and Rapid Development Mining* (pp. 101–110). Australian Centre for Geomechanics.
https://doi.org/10.36487/ACG_repo/902_09
- Long, M., Schafrik, S., Kolapo, P., Agioutantis, Z., & Sottile, J. (2024). Equipment and operations automation in mining: A review. *Machines*, 12(10), 713.
<https://doi.org/10.3390/machines12100713>
- Monge Porras, K. A. (2022). *Reducción de rebote de shotcrete vía seca mediante la optimización del sostenimiento en la Zona Cuerpos de la Unidad Americana*

- Alpayana S.A. – 2022. Tesis para optar el título de Ingeniero de Minas, Universidad Nacional del Centro del Perú. Recuperado de https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/9088/T010_46722576_T%20%20%20MONGE%20PORRAS.pdf?sequence=1&isAllowed=y*
- Portal Minero. (2024, septiembre 25). *La Minería 4.0: revolución tecnológica y sostenibilidad en la industria*. <https://www.portalminero.com/wp/la-mineria-4-0-revolucion-tecnologica-y-sostenibilidad-en-la-industria/>
- Premios ProActivo. (2022, octubre 5). *Instalación automatizada de calibradores en el sostenimiento con concreto lanzado para eliminar exposición de los colaboradores y optimizar el consumo de recursos*. <https://premiosproactivo.org/instalacion-automatizada-de-calibradores-en-el-sostenimiento-con-concreto-lanzado-para-eliminar-exposicion-de-los-colaboradores-y-optimizar-el-consumo-de-recursos/>
- Repemex. (2025). *Tecnologías avanzadas en la minería subterránea*. Recuperado de <https://repemex.com/blog>
- República de Colombia, Ministerio de Minas y Energía. (2015). *Decreto 1886 de 2015. Por el cual se dictan disposiciones para la seguridad en labores mineras subterráneas*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=65325>
- Revista Seguridad Minera. (2012, 3 de noviembre). Shotcrete: ¿método por vía seca o vía húmeda? <https://revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/metodo-por-via-seca-o-via-humeda/>
- Robles, R., Foladori, G., & Záyago Lau, E. (2020). Industria 4.0 en la minería mexicana. *Revista de El Colegio de San Luis*, 10(21), 83–109. <https://doi.org/10.21696/rcsl102020837>
- Robocon Shotcrete Solutions. (2022, noviembre 10). *Robocon a la vanguardia de la tecnología aplicada al shotcrete*. <https://robocon.pe/tecnologia-aplicada-al-shotcrete/>

Rompiendo Expectativas. (2025, 26 de junio). *Tecnologías avanzadas en la minería subterránea*. REPEmex. <https://www.repemex.com.mx/tecnologias-avanzadas-en-la-mineria-subterranea/>

Salazar Isla, E. S. (2020). *Evaluación geomecánica para determinar el tipo de sostenimiento en tajeos de explotación por el método de corte y relleno ascendente en la Unidad Minera Cerro de Pasco* (Tesis de licenciatura, Universidad Continental). <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/9282>

Salvador Cobo, C. F. (2020). *Evaluación de automatización de operaciones unitarias en minería subterránea*. Memoria para optar el título de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile. Recuperado de https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/174493/cf-salvador_cc.pdf

Shotcrete Institute. (2015). *Shotcrete for Underground Support*.

Stackpole, B. (2024, julio 4). Why pneumatics remain an automation mainstay. *Automation World*. <https://www.automationworld.com/factory/motion/article/55091870/why-pneumatics-remain-an-automation-mainstay>

Tecnología Minera. (2024). Desafíos de la automatización en la explotación minera. *Revista Tecnología Minera*. <https://tecnologiaminera.com/noticia/desafios-de-la-automatizacion-en-la-explotacion-minera-1697550238>

Tecnología Minera. (2025). Conoce los avances en la automatización que transforman la minería subterránea. <https://tecnologiaminera.com/noticia/conoce-los-avances-en-la-automatizacion-que-transforman-la-mineria-subterranea-1741297515>

Yacori Medina Tasilla, D. (2025). *Transformando la minería subterránea con el uso de drones: Navegación autónoma y aplicaciones innovadoras*. CODEA UNI. Recuperado de <https://www.codeauni.com/comunidad/blog/192>

ANEXOS

ANEXO 1: INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.

Comparativo de Labores entre Calibración Manual y Calibración Neumática				
Unidad Minera	Labor	Tipo de Calibración	Tiempo por Calibrado (min/labor)	Observación
Cerro Lindo	Nv. 1640 Cx640	Manual	23	Mayor exposición del operador
Cerro Lindo	Nv. 1640 Cx026	Manual	21	Requiere apoyo de dos personas
Cerro Lindo	Nv. 1640 Cx750	Manual	22	Demora por ajuste manual de calibrador
Cerro Lindo	Nv. 1600 Ga500	Manual	24	Condiciones de humedad afectaron precisión
Cerro Lindo	Nv. 1600 Cx 080	Manual	20	Variabilidad en medición
Cerro Lindo	Nv. 1580 Ga940	Manual	23	Operador expuesto al frente durante medición
Cerro Lindo	Nv. 1600 Cx006	Manual	22	Riesgo ergonómico por manipulación repetitiva
Cerro Lindo	Nv. 1820 Cx 770	Manual	21	Reproceso en 1 de 10 calibradores
Cerro Lindo	Nv. 1850 Cx 105	Manual	23	Requiere reinicio por error de posición
Cerro Lindo	Nv. 1850 Bp 105 A	Manual	22	Desviación de ± 1.5 cm en espesor promedio
Cerro Lindo	Nv. 1820 Ga 070	Neumática	9	Operación automática sin exposición directa
Cerro Lindo	Nv. 1800 Cx 005	Neumática	8	Precisión constante y menor tiempo
Cerro Lindo	Nv. 1880 Cx 370	Neumática	10	Sin necesidad de ingreso al frente
Cerro Lindo	Nv. 1940 Cx 1013	Neumática	9	Eliminación de error humano
Cerro Lindo	Nv. 1940 Bp 593	Neumática	8	Estabilidad en la presión del sistema
Cerro Lindo	Nv. 1940 Cx 480	Neumática	9	Mejora en ritmo operativo
Cerro Lindo	Nv. 1650 Cx 440	Neumática	10	Ahorro de tiempo del 55–60%
Cerro Lindo	Nv. 1910 Bp 593	Neumática	9	Mejora en uniformidad del espesor
Cerro Lindo	Nv. 1820 Ga 070	Neumática	8	Sin reproceso posterior
Cerro Lindo	Nv. 1580 Ga940	Neumática	9	Cero exposición al riesgo eléctrico o mecánico

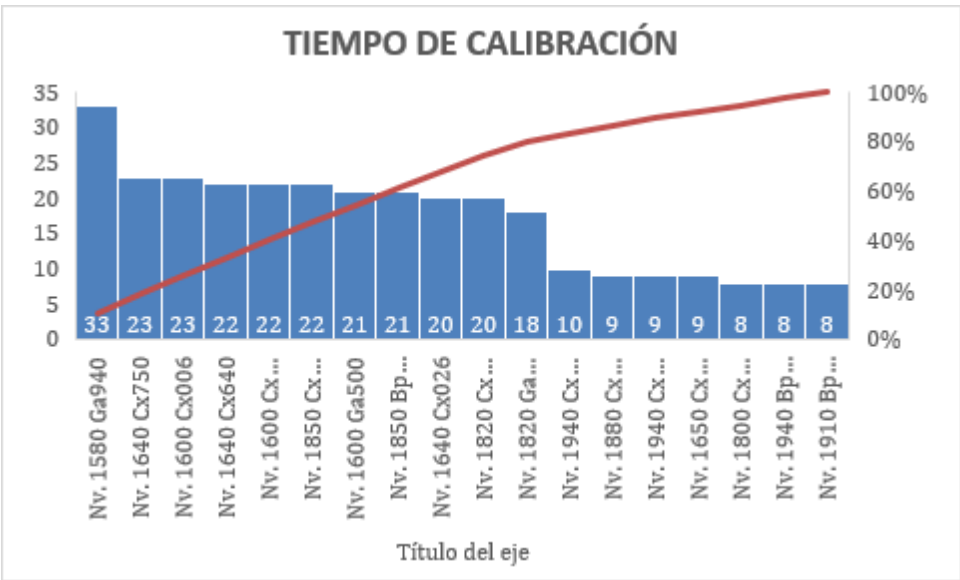
Fuente: Elaboración Propia

ANEXO 2: INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.

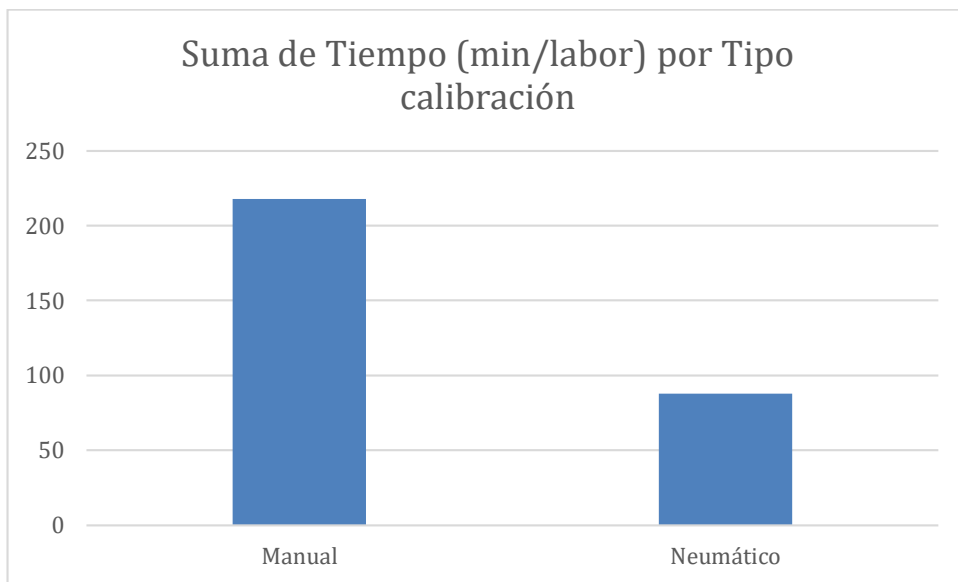
CUADRO DE HIPOTESIS Y DECISIONES

Hipótesis	H0	H1	Método de prueba	Estadístico	p-valor	Decisión
Hipótesis general	H0: No optimiza proceso ni mejora seguridad / precisión / eficiencia	H1: Optimiza proceso y mejora seguridad / precisión / eficiencia	Prueba t pareada	43.603	8.77e-12	Rechazar H0 (p < 0.05)
HE1 (tiempo de colocación)	H0: No hay reducción significativa en tiempo	H1: Reducción significativa en tiempo	Prueba t pareada (datos de tiempo)	43.603	8.77e-12	Rechazar H0 (p < 0.05)
HE2 (exposición al riesgo)	H0: La automatización no disminuye exposición	H1: La automatización disminuye exposición	Comparación cualitativa (eliminación total de exposición)			Rechazar H0 (evidencia cualitativa)
HE3 (calidad del control de espesor)	H0: No mejora la calidad del control de espesor	H1: Mejora la calidad del control de espesor	Comparación de consistencia y precisión (observacional)			Rechazar H0 (evidencia observacional cuantitativa)

Fuente: Elaboración Propia



Fuente: Elaboración Propia



Fuente: Elaboración Propia

ANEXO 3 MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	METODOLOGIA
GENERAL ¿Cómo optimizar la calibración del espesor del shotcrete minimizando el riesgo operativo en la Unidad Minera Cerro Lindo?	GENERAL Evaluar la efectividad del sistema neumático en la calibración del espesor de shotcrete mediante el robot lanzador en interior mina.	Hipótesis general (Hi): La implementación de un sistema neumático automatizado en robot lanzador optimiza la calibración del espesor de shotcrete, reduciendo el riesgo operativo en la Unidad Minera Cerro Lindo.	Variable independiente: Sistema neumático automatizado en robot lanzador Variable dependiente: Efectividad del proceso de calibración del espesor de shotcrete	- Tiempo de calibración - Precisión del espesor - Nivel de exposición al riesgo - Adaptabilidad del sistema de calibración neumática.	DISEÑO: Aplicada, cuantitativa, comparativa POBLACIÓN Y MUESTRA: Población: Labores subterráneas donde se aplica shotcrete en la UM Cerro Lindo Muestra: Frentes seleccionados con y sin implementación del sistema neumático TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS: Observación estructurada, análisis documental, cronometraje y entrevistas técnicas ANÁLISIS DE DATOS: Estadístico descriptivo y comparativo con prueba t para muestras relacionadas (significancia del 5%)
ESPECÍFICOS • ¿Cuál es el tiempo y riesgo involucrado en el método tradicional manual? • ¿Qué mejoras de seguridad ofrece el sistema neumático? • ¿Cuál es la eficacia de colocación con el equipo neumático?	ESPECÍFICOS • Comparar el tiempo de ejecución entre el método tradicional y el sistema neumático • Identificar los riesgos eliminados o reducidos con el sistema neumático • Determinar la adaptabilidad y eficiencia del porta calibrador neumático	Hipótesis específicas: • El sistema neumático reduce el tiempo de ejecución frente al método tradicional. • El sistema neumático disminuye la exposición al riesgo en zonas críticas. • El porta calibrador neumático muestra mayor eficiencia y adaptabilidad en interior mina.	Iguales que en la hipótesis general	Iguales que en la hipótesis general	Iguales que en la hipótesis general

ANEXO 4: PROCEDIMIENTO DE VALIDACIÓN Y CONFIABILIDAD.

FOTOGRAFÍAS DEL EQUIPO Y PRUEBAS EN FRENTES DE TRABAJO



Fuente: Elaboración Propia – calibración manual



Fuente: Elaboración Propia – equipos para la calibración neumática



Fuente: Elaboración Propia – calibración neumática



Fuente: Elaboración propia - colocado de los calibradores con el equipo neumático