



FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS

Trabajo de fin de Carrera titulado:

**“Diseño en concepto de buzón electroneumático automatizado,
para la mediana minería ecuatoriana”**

Realizado por:

BRYAN WLADIMIR ALMEIDA CRUZ

Director del proyecto:

Mg.DIANA PERALTA

Como requisito para la obtención del título de:

INGENIERO EN MECÁNICA.

QUITO, Marzo del 2025

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, Bryan Wladimir Almeida Cruz, ecuatoriano, con Cédula de ciudadanía N° 1725803728, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional, y se basa en las referencias bibliográficas descritas en este documento.

A través de esta declaración, cedo los derechos de propiedad intelectual a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, reglamento y normativa institucional vigente.



Bryan Wladimir Almeida Cruz

C.I.: 1725803728

DECLARACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS

Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.

Diana Peralta Zurita

Master

LOS PROFESORES INFORMANTES:

Jaime Molina Osejos

María Gabriela Mancheno Falconí

Después de revisar el trabajo presentado lo han calificado como apto para su defensa oral ante el tribunal examinador.

Ing. Jaime Molina

Ing. María Mancheno

Quito, marzo de 2025

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.



Bryan Wladimir Almeida Cruz

C.I.: 1725803728

RESUMEN

Este estudio propone el diseño de un buzón electroneumático automatizado para abordar los desafíos en la mediana minería subterránea en Ecuador. Se realiza un diagnóstico de la situación actual y se consideran normativas internacionales de seguridad y calidad. El diseño preliminar busca mejorar la productividad y reducir los riesgos operativos hasta en un 30%. Se destaca que esta solución tiene el potencial de generar mejoras significativas en la productividad, costos operativos y seguridad laboral en la industria minera. Se recomienda la construcción de un prototipo a escala real para validar y optimizar el diseño propuesto. Con esto, se espera contribuir al avance y modernización de la mediana minería subterránea en el país.

Palabras clave: 1 mediana minería, 2 buzón electroneumático, 3 chute, 4 productividad, 5 seguridad.

ABSTRACT

This study proposes the design of an automated electropneumatic mailbox to address the challenges in medium underground mining in Ecuador. A diagnosis of the current situation is made and international safety and quality regulations are considered. The preliminary design seeks to improve productivity and reduce operational risks by up to 30%. It is highlighted that this solution has the potential to generate significant improvements in productivity, operating costs and occupational safety in the mining industry. The construction of a full-scale prototype is recommended to validate and optimize the proposed design. With this, it is expected to contribute to the advancement and modernization of medium-sized underground mining in the country.

Keywords: 1 medium mining, 2 electro-pneumatic mailbox, 3 chute, 4 productivity, 5 safety.

TABLA DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN JURAMENTADA	i
DECLARACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS	ii
LOS PROFESORES INFORMANTES:	iii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE TABLAS	xii
LISTA DE FIGURAS	xiii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN E INFORMACIÓN GENERAL	1
1.1. 15	
1.2. 17	
1.3. 18	
1.4. 19	
1.5. 21	
1.6. 23	
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	11
2.1. Minería del Ecuador	11
2.2. Los buzones	13
2.2. Normativas internacionales pertinentes	15
2.2.1. ANSI/AWS D1.1 (2016).	15
2.2.2. Norma EN 1991-4:2006 (CEN, 2006)	16

	8
2.2.3. Norma ISO 13950	17
2.2.4. Norma ASME B20.1-2018	17
2.2.5. Norma MSHA	
Part 56.14107	18
2.2.6. Norma OSHA 1910.146	19
2.2.7. Norma ANSI Z535.1	19
2.3. Sobre costos	21
2.4. Sobre el diseño del buzón	21
2.5. Sobre los softwares a usar	24
2.5.1. Sobre Inventor	24
2.5.2. Sobre SimSolid	25
2.5.2. Sobre Fluidsim	26
2.5.3. Sobre modelismo scrtach	27
2.5.4. Sobre la eficiencia en la operación	28
CAPÍTULO 3. MÉTODOS	29
3.1. Metodología	29
3.1.1. Consideraciones en el diseño	30
3.1.2. Cálculo del área de flujo de la tolva (ton/h):	33
3.1.3. Cálculo del área de flujo (m2):	33
3.1.4. Selección de materiales:	35
3.1.5. Cálculo fuerza de impacto:	37
3.1.6. Esfuerzos:	38
3.1.7. Ecuación 7: Presión hidrostática	39

3.1.8. Dimensionamiento de espesor de lámina:	9
3.2. Diseño virtual	40
3.3. Simulación de esfuerzos	41
3.3.1. Información de la simulación	46
3.3.2. Tipo de simulación: Estructural lineal	47
3.3.3. 61	48
3.3.4. 62	
3.3.5. 65	
3.3.6. 67	
3.3.7. 73	
CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	64
4.1. Resultados	64
4.1.1. Presentación de resultados:	64
4.1.2. Resultado esfuerzos que soporta el diseño de un buzón	65
4.1.3. Resultados del proceso de cálculo de espesor de lámina	67
4.1.4. Resultados diseño Mecanismo	68
4.1.5. Resultados del proceso de Diseño	68
4.1.6. Resultados del proceso de Diseño	70
4.2. Resultados del proceso de diseño circuito electroneumático	73
4.2.1. El diagrama esquemático del circuito electroneumático:	78
4.2.1.1. Lista de materiales:	78
4.2.1.2. Lista partes eléctricas	79
4.2.1.3. Lista piezas neumáticas:	81

	10
4.3. Simulación circuito FluidSim	83
4.3.1. Botón de parada	83
4.4. Maqueta del buzón	85
4.5. Normativas cumplidas	87
4.6. Discusión de Resultados	92
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	97
5.1. Conclusiones	97
5.1.1. Conclusiones técnicas	97
5.2. Recomendaciones	98
5.2.1. Recomendaciones técnicas:	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXOS	108

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 <i>Cálculo de presión Hidrostática en diferente altura.</i>	40
Tabla 2 <i>Lista de procesos técnicos.</i>	57
Tabla 3 <i>Resultados obtenidos en la presente investigación.</i>	64
Tabla 4 <i>Presiones hidrostáticas.</i>	67
Tabla 5 <i>Lista piezas.</i>	73
Tabla 6 <i>Resultados simulacion SimSolid.</i>	74
Tabla 7 <i>Resultado simulación esfuerzos hidrodinámicos.</i>	76
Tabla 8 Estados de entradas y salidas	86
Tabla 9 Estados de entradas y salidas	88
Tabla 10 Estados de entradas y salidas	90
Tabla 11 Normativas cumplidas	99
Tabla 12 Cláusulas cumplidas	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 <i>Buzón artesanal de la mina Murciélago en Portovelo.</i>	11
Figura 2 <i>Buzones artesanales de tolva de la mina Paraíso en Portovelo.</i>	11
Figura 3 <i>Accidente Buzón N° 300, Nv 14, Zona Oroya.</i>	12
Figura 4 <i>Esquema de pique de traspaso con tolva o buzón de carguío.</i>	13
Figura 5 <i>Etapas para la construcción de un SdT.</i>	14
Figura 6 <i>Colores de seguridad ANSI Z535.1-2017.</i>	19
Figura 7 <i>Flujograma procesos.</i>	30
Figura 8 <i>Diagrama altura del ducto de salida.</i>	31
Figura 9 <i>Área de flujo.</i>	32
Figura 10 <i>Persona versus área de tolva.</i>	34
Figura 11 <i>Etapa1: mecanismo en reposo.</i>	42
Figura 12 <i>Etapa2: mecanismo en avance.</i>	42
Figura 13 <i>Etapa3: posición de apertura.</i>	42
Figura 14 <i>Boceto etapa 1: dimensionamiento.</i>	43
Figura 15 <i>Etapa 2 altura y ancho máximos.</i>	44
Figura 16 <i>Etapa 3 altura y ancho máximo.</i>	44
Figura 17 <i>Prototipo virtual 1.</i>	45
Figura 18 <i>Ensamble inicial.</i>	45
Figura 19 <i>Prototipo 2.</i>	46
Figura 20 <i>Esquema de la metodología del proceso SimSolid.</i>	47
Figura 21 <i>Restricciones tipo pivote.</i>	48
Figura 22 <i>Carga distribuida.</i>	48

	13
Figura 23 <i>Factor de seguridad.</i>	49
Figura 24 <i>Selección de restricciones y selección cara donde se asienta carga.</i>	50
Figura 25 <i>Factor de seguridad prototipo 3.</i>	50
Figura 26 <i>Propiedades de materiales AISI 1340 (Izquierda) y AISI 1020 (Derecha).</i>	51
Figura 27 <i>Selección de carga distribuida.</i>	52
Figura 28 <i>Selección de restricciones, fijas(arriba) y deslizantes (abajo).</i>	52
Figura 29 <i>Configuración de las condiciones de carga hidrostática.</i>	54
Figura 30 <i>Proceso de operación.</i>	59
Figura 31 <i>Piston doble efecto ISO 15552 con bisagra hembra.</i>	61
Figura 32 <i>Clave de los códigos ISO 15552.</i>	62
Figura 33 <i>Etapas del movimiento.</i>	69
Figura 34 <i>Modelo 3D: arriba despiece de compuerta buzón, abajo ensamble compuerta buzón.</i>	70
Figura 35 <i>Modelo 3D: arriba despiece de tolva buzón, abajo ensamble tolva de buzón.</i>	71
Figura 36 <i>Modelo 3D: arriba despiece del mecanismo buzón, abajo ensamble del mecanismo de buzón.</i>	72
Figura 37 <i>Despiece buzón.</i>	72
Figura 38 <i>Esfuerzo máximo de Von Mises.</i>	75
Figura 39 <i>Esfuerzo máximo de Von Mises presión hidrostática.</i>	77
Figura 40 <i>Relación densidad, factor de seguridad y deformación máxima (mm).</i>	78
Figura 41 <i>Circuito electroneumático.</i>	79
Figura 42 <i>válvula 5/2 con solenoide.</i>	81
Figura 43 <i>Valvula 3/2.</i>	82

	14
Figura 44 <i>Regulador de caudal.</i>	83
Figura 45 <i>Estado de reposo</i>	84
Figura 46 <i>Botón de encendido.</i>	84
Figura 47 <i>Botón de accionamiento.</i>	85
Figura 48 <i>Secuencia de parada de emergencia</i>	88
Figura 49 <i>Secuencia de parada de emergencia</i>	90
Figura 50 <i>Maqueta del buzón.</i>	92
Figura 51 <i>Nivel superior de la maqueta</i>	93
Figura 52 <i>Nivel inferior de la maqueta</i>	94
Figura 53 <i>Maqueta encendida.</i>	95
Figura 54 <i>Maqueta del buzón cargada.</i>	96
Figura 55 <i>Maqueta del buzón “Luz de mantenimiento”.</i>	97
Figura 56 <i>Maqueta del buzón “sensor activo”.</i>	98
Figura 57 <i>Maqueta encendida. “proceso de carga”.</i>	99

INTRODUCCIÓN E INFORMACIÓN GENERAL

1.1. Introducción

La presente investigación se enfoca en el diseño de un buzón electroneumático automatizado para la descarga de chimeneas en la mediana minería subterránea de concentrado de mineral. El objetivo principal de este estudio es desarrollar un sistema innovador y eficiente que permita una descarga óptima y segura del mineral, cumpliendo con los estándares internacionales, para , de esta manera, aplicar fórmulas para identificar las limitaciones del diseño, diseñar virtualmente el mecanismo en Inventor, simular esfuerzos mecánicos en SimSolid, diseñar virtualmente el circuito electroneumático en FluidSim, programar el código ladder para el control, simular virtualmente el circuito en FluidSim, y construir un prototipo a escala para la identificación de riesgos operativos, se desarrollará un buzón electroneumático adaptado a las particularidades de la mediana minería subterránea de Ecuador.

Herrera-Herbert (2020) menciona que la minería subterránea es una actividad económica que presenta riesgos para los trabajadores y los equipos utilizados en ella, por lo que se requiere de tecnologías adecuadas y seguras para minimizar los riesgos y mejorar la productividad. La descarga de mineral es una de las actividades más críticas en la minería subterránea, y la utilización de sistemas obsoletos o inadecuados puede generar problemas como el bloqueo de las chimeneas, lo que a su vez puede generar tiempos de inactividad y disminución en la producción.

En la realidad ecuatoriana un buzón automatizado se presenta como una alternativa para la descarga de concentrado de mineral. Donde este sistema consiste en un mecanismo que utiliza aire comprimido y electricidad para accionar el buzón y permitir la descarga del mineral a la burra, a través de gravedad. El uso de este sistema puede mejorar la eficiencia y la seguridad en la descarga de mineral, reducir los tiempos de inactividad y aumentar la productividad.

El diseño de un buzón electroneumático automatizado para la descarga de chimeneas en la mediana minería subterránea es un tema que toma relevancia en la actualidad, ya que la tecnología actual no se ha aplicado en el ámbito minero y no cumple con los estándares internacionales. Por ello, esta investigación busca desarrollar un sistema que se pueda adaptar a las condiciones de la mediana minería ecuatoriana, cumpliendo con la estandarización internacional.

Sobre la estandarización internacional, existen diversas normas y estándares que regulan diseños y la correcta operación de equipos, maquinarias y sistemas en la minería subterránea. Por ejemplo, según la ISO 19296, "los equipos móviles deben estar diseñados para minimizar los riesgos para los operadores y el personal de mantenimiento" (ISO 19296:2018, sección 4.1). Asimismo, la Administración de Seguridad y Salud en Minas (MSHA) establece que "todas las minas subterráneas deben contar con un sistema de ventilación adecuado que proporcione aire fresco y elimine contaminantes" (MSHA, 30 CFR § 57.8520). Estas regulaciones son fundamentales para proteger a los trabajadores y asegurar que las operaciones se realicen de manera segura y eficiente.

La estandarización del diseño de un buzón electroneumático automatizado para la descarga de chimeneas en la mediana minería subterránea de concentrado de mineral es una solución para la industria minera y la seguridad de los operarios, pues este diseño mejora la eficiencia, seguridad y rentabilidad de las operaciones mineras. La estandarización internacional de este diseño también asegura que se cumplan los estándares de calidad y seguridad en el Ecuador.

1.2. Antecedentes

Los antecedentes de esta investigación buscan enfocarse en las problemáticas que enfrenta la mediana minería subterránea en lo que respecta a la operación de descarga de concentrado de mineral. La descarga del material de la chimenea a la superficie es una de las operaciones más críticas y riesgosas, la cual necesita de un sistema eficiente y seguro para garantizar la calidad del concentrado y la seguridad de los trabajadores.

En la actualidad, existen diferentes tipos de sistemas de descarga de chimeneas, como los sistemas de gravedad, de tolva simples, de cajas y de buzón. Y cada uno tiene sus limitaciones en términos de eficiencia, capacidad, costo, seguridad y adaptabilidad al ritmo de explotación.

Existen varios estudios e investigaciones relacionados con la aplicación de tecnologías para la automatización en la minería subterránea. Un ejemplo de Ayers (2020) donde analiza los sistemas de transporte de mineral utilizados en la minería subterránea, identificando las limitaciones de los sistemas convencionales y proponiendo alternativas como el uso de sistemas automatizados. Asimismo, una investigación de Corbett (2021) destaca la importancia de la innovación en la minería subterránea, proponiendo la utilización de tecnologías como la automatización y la inteligencia artificial para mejorar la productividad y la seguridad.

En este contexto, el buzón electroneumático automatizado se ha posicionado como una alternativa atractiva para la descarga de chimeneas en la minería subterránea, debido a sus ventajas en términos de eficiencia, capacidad, seguridad y flexibilidad. Este sistema utiliza aire comprimido para transportar el material desde la chimenea hasta la superficie, evitando el uso de bandas transportadoras o grúas, lo que reduce los costos y los riesgos de accidentes.

En la literatura técnica se han reportado varios estudios y experiencias sobre el uso del buzón electroneumático automatizado en la minería subterránea, como el estudio de

Otro estudio relevante (Ruiz del Solar, 2020), quién evaluaron el impacto del nivel de automatización de sus operaciones en orden de incrementar su productividad, puede mejorar la calidad del concentrado, reducir los costos de operación y disminuir el grado de exposición de sus trabajadores a condiciones de riesgo.

En la revista de (Tecnología Minera, 2024), explica que los sistemas automatizados garantizan una mayor consistencia en las operaciones. La implementación de tecnologías avanzadas permite que las tareas se realicen con precisión, reduciendo el tiempo perdido por errores humanos y asegurando una descarga uniforme del mineral haciendo que la operación sea más eficiente y sostenible.

1.3. Planteamiento del Problema

El Ministerio de Trabajo reconoce que uno de los principales desafíos en seguridad minera es la falta de reporte de accidentes por parte de pequeñas operaciones mineras, lo que impide dimensionar la situación real (Ministerio de Trabajo, 2017).

La falta de estandarización en el diseño del buzón electroneumático automatizado y la necesidad de adaptarlo a las necesidades de la mediana minería subterránea, constituyen el problema central de esta investigación. Por tanto, la presente tesis se enfocará en el diseño de un buzón electroneumático automatizado estandarizado, que permita la descarga eficiente de concentrado de mineral en la mediana minería subterránea, considerando los criterios y estándares internacionales y las necesidades específicas de la industria minera.

Como señalan (Flores, 2022) y (Fierro, 2014), la ausencia de un diseño de buzón electroneumático estandarizado, oh diseños estandarizados para maquinaria de carga, ha llevado a la adopción de diseños improvisados y poco seguros que pueden poner en riesgo la integridad física de los trabajadores. Por otro lado, la variabilidad de los sistemas de descarga existentes en la industria minera dificulta la estandarización de los procesos y la implementación de prácticas seguras y sostenibles, como señalan (López, 2023).

En este sentido, el diseño del buzón electroneumático automatizado ha surgido como una alternativa innovadora para mejorar la eficiencia en la descarga de mineral en la minería subterránea.

El buzón electroneumático automatizado consiste en un sistema que combina la generación de aire comprimido y electricidad para producir un flujo de aire que facilita el transporte de concentrado de mineral desde la chimenea hasta la superficie. Este sistema ha demostrado ser efectivo en la reducción de la obstrucción de los chutes, aumentando la capacidad y eficiencia en la descarga de concentrado de mineral en la minería subterránea.

A pesar de los beneficios que ofrece el buzón electroneumático, aún existen desafíos en su implementación en la industria minera. Donde los principales problemas es la falta de estandarización internacional en el diseño del buzón electroneumático, lo que genera dificultades en la selección y adquisición de equipos, la compatibilidad entre equipos de diferentes proveedores, y la falta de criterios claros para evaluar la calidad y eficiencia de los sistemas.

1.4. Justificación

En el trabajo de Elizalde Ruiz y Peña Estrella (2021), mencionan que al usarse tolvas automatizadas se mejora la eficiencia de la producción, así también contribuye a la seguridad

laboral. La automatización de estas permite un control más preciso del proceso de descarga y almacenamiento, reduciendo el riesgo de accidentes laborales al reducir la intervención humana en operaciones potencialmente peligrosas. Además, en su diseño se incluyó características que facilitan la inspección y el mantenimiento, lo que a su vez promueve un entorno de trabajo más seguro y eficiente.

La aplicación de sistemas automatizados en tolvas es un factor clave para el incremento en la productividad en diversas industrias. Según investigaciones como la de (Martins, 2021), la automatización puede aumentar la producción en un 31%, reducir los tiempos de proceso en un 67% y mejorar la utilización del sistema en un 21%. Además, Martins (2021) señala que: "la automatización no solo optimiza el rendimiento operativo, sino que también asegura una gestión más eficiente de los recursos disponibles".

La tecnología de buzones automatizados se utiliza en el transporte de materiales sólidos al granel y líquidos en distintas industrias, incluyendo la minería. Sin embargo, la estandarización internacional en este tipo de tecnología es limitada en el Ecuador, lo que resulta en incidentes que ponen en riesgo la salud de los operarios.

El reglamento de seguridad y salud en el trabajo del ámbito minero (Renovables, 2020) establece que los titulares de derechos mineros deben implementar medidas adecuadas para el uso seguro de equipos y maquinarias mineras, lo que incluye su diseño, mantenimiento y operación. Esto implica asegurar que los buzones estén contruidos con materiales adecuados y que sean capaces de soportar cargas previstas.

.Los principales factores que contribuyeron a eventos catastróficos son el mal diseño, la falta de mantenimiento, la operación inadecuada y la ausencia de medidas de seguridad

Para llevar a cabo este proyecto, primero debemos identificar los desafíos más importantes al implementarlo comúnmente asociados con su uso en entornos similares. Estudiar a empresas anteriores exitosas ayudará a descubrir cualquier limitante existente, tales como normativas legales, recursos financieros enfrentados por otros proyectos similares, además de investigaciones sobre el impacto en la eficiencia del proceso de las operaciones

Finalmente, se busca que la relevancia de esta tesis radique en la importancia económica y social de la minería en el país, así como en la necesidad de mejorar la seguridad y eficiencia en la descarga de chimeneas. como también que puede tener una aplicación más amplia en otros sectores productivos, lo que aumentaría su impacto positivo en la economía nacional.

Buscaremos información relevante relacionada con materias y equipos eléctricos aplicables al proyecto, para tener una base de conocimiento completa antes de la instalación de buzones electrónicos con diseño específico adaptable a la minería mediana ecuatoriana. Al realizar estudios previos sobre el tema de buzones electrónicos, será positivo, reducción de costos y tiempos de transporte.

1.5. Objetivos

En la industria minera, la minería subterránea juega un papel vital en la extracción de minerales de la tierra. Sin embargo, existen ciertas preocupaciones ambientales y de seguridad asociadas con la minería subterránea.

El objetivo general del presente trabajo de investigación es diseñar un buzón electroneumático automatizado con estandarización internacional para la descarga de chimeneas en la mediana minería subterránea de concentrado de mineral, con el propósito de mejorar la eficiencia, seguridad y cumplimiento de normas en la mediana minería.

Para lograr este objetivo general, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Aplicar fórmulas planteadas para la identificación de las limitaciones de diseño, como la capacidad, la velocidad, la presión y la potencia del sistema.
- Diseñar virtualmente el mecanismo del buzón electroneumático, mediante el uso del software Inventor, para la visualización la geometría del buzón, la capacidad de almacenamiento, la disposición del mecanismo, adaptado a las particularidades de la mediana minería subterránea de Ecuador.
- Simular los esfuerzos mecánicos en el software SimSolid, para la visualización de los puntos de esfuerzos y posibles fallas, como también la validación de los resultados obtenidos en el modelo matemático.
- Diseñar virtualmente el circuito electroneumático, mediante el software FluidSim. Para la visualización de los elementos necesarios para el accionamiento del buzón.
- Programar el código ladder para la implementación de la lógica de control del circuito electroneumático, asegurando que el sistema funcione y cumpla con los requisitos operativos establecidos.
- Simular virtualmente el circuito electroneumático, mediante el software FluidSim. Para la visualización de los aspectos como la simplicidad, la robustez y la fiabilidad.
- Construir un prototipo a escala en base al diseño virtual más adecuado para la identificación de posibles riesgos durante la operación y visualización de la operación del prototipo.

1.6. Hipótesis

La hipótesis de este proyecto es: El diseño de un buzón electroneumático automatizado con estandarización internacional para la descarga de chimeneas es una solución efectiva y eficiente para mejorar los procesos de descarga de material en la mediana minería ecuatoriana, reduciendo los tiempos de espera y aumentando la seguridad y productividad en las operaciones mineras.

Esta hipótesis se basa en la necesidad de mejorar los procesos de descarga de material en la mediana minería ecuatoriana, ya que actualmente existen limitaciones en cuanto a la eficiencia y seguridad en estos procesos. La utilización de un buzón electroneumático automatizado con estandarización internacional puede ser una alternativa para resolver estos problemas, ya que permite una descarga más rápida y segura de material a través de una mayor precisión y control en el proceso de descarga.

Se espera que la implementación de esta solución contribuya a mejorar la eficiencia y productividad en las operaciones mineras, lo que a su vez puede generar beneficios económicos para las empresas mineras y para el país en general. Asimismo, se espera que la reducción de tiempos de espera y la mejora en la seguridad en los procesos de descarga de material tengan un impacto positivo en la salud y bienestar de los trabajadores mineros.

ESTADO DEL ARTE

2.1. Minería del Ecuador

Rojas-Villacís y Zúñiga-Arrobo (2022) mencionan que la mediana minería del Ecuador no existe normativa alguna sobre la construcción y diseño de buzones, lo que da paso a que su construcción sea de forma artesanal y se la realiza en los propios talleres de las mineras, en las figuras 1 y 2.

Figura 1

Buzón artesanal de la mina Murciélagos en Portovelo.



Figura 2

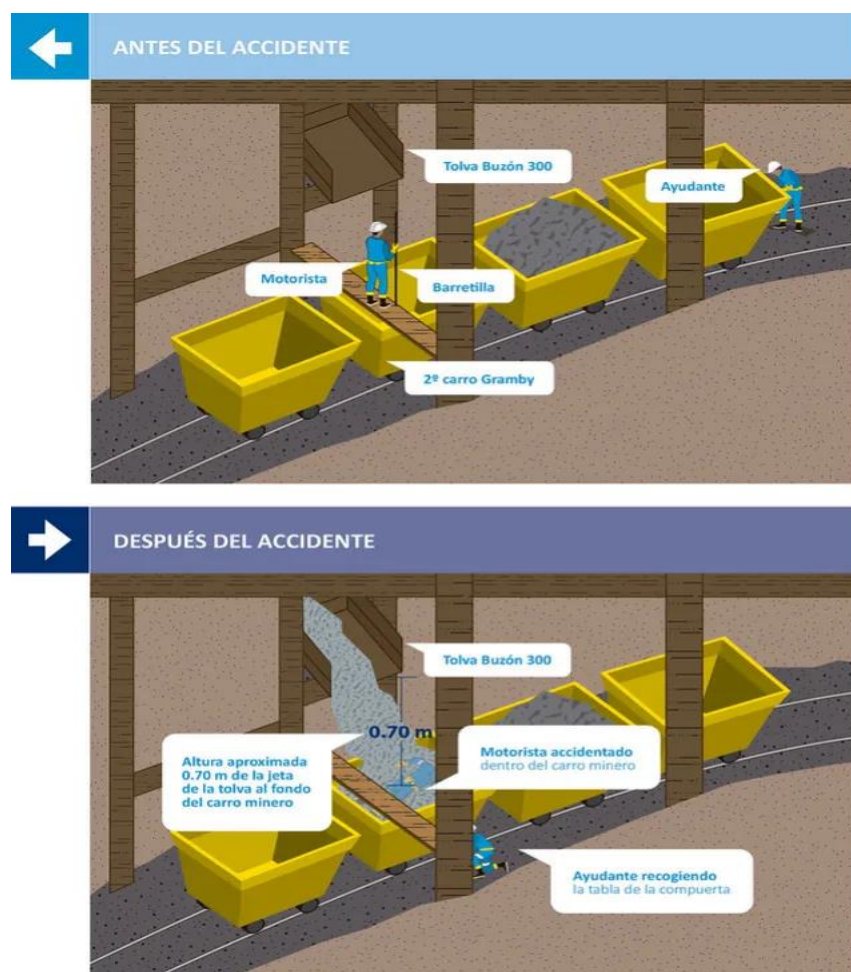
Buzones artesanales de tolva de la mina Paraíso en Portovelo.



Al ser construcciones artesanales estas son propensas a atascos, uso incorrecto y fallas estructurales catastróficas lo que se traduce un alto número de incidentes durante esta operación, en la figura 3 se muestra un caso de accidente durante la operación de cargado.

Figura 3

Accidente Buzón N° 300, Nv 14, Zona Oroya.



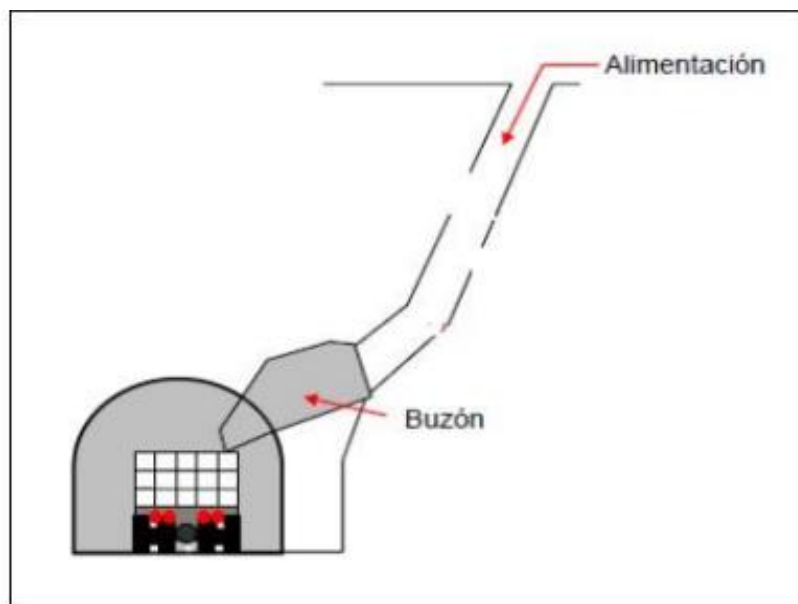
2.2. Los buzones

Según Gallardo (2022) “Los buzones corresponden a sistemas de carguío estacionarios que se ubican en el extremo inferior de las chimeneas” lo que nos da paso a definir a un buzón como un mecanismo que permite recibir y controlar la descarga del material, en la figura 4 se

visualiza el esquema seguido de traspaso de material. Para garantizar un óptimo rendimiento y una mayor eficiencia en el proceso de descarga

Figura 4

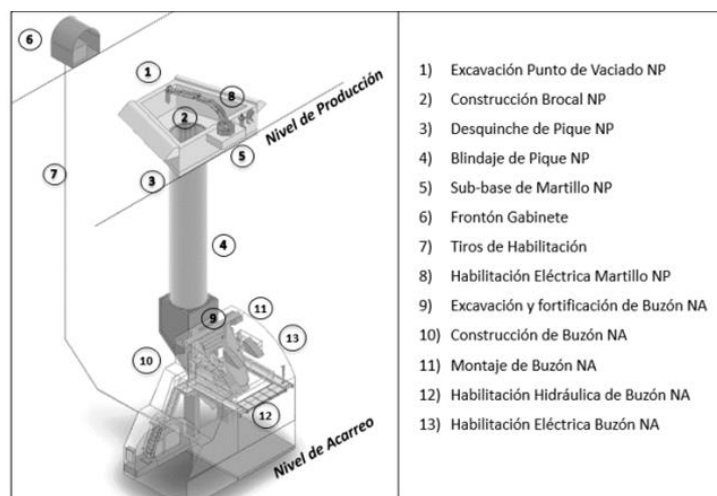
Esquema de pique de traspaso con tolva o buzón de carguío.



Mina (2018) nos indica que la construcción de un buzón consta de varias etapas que se dividen en la excavación, fortificación de la caverna, construcción de buzón y el montaje de las estructuras de acero, en la ilustración 5 se ve un gráfico de las etapas. donde nos centraremos en las dos últimas etapas.

Figura 5

Etapas para la construcción de un SdT.



Las limitaciones físicas de los buzones: son su capacidad máxima de almacenamiento y peso, su ubicación en el lugar de trabajo y la accesibilidad para su limpieza y mantenimiento.

Como lo mencionan (Flores J. E., 2017) la velocidad máxima de transporte:

- Materiales densos (minerales, metales): 35-40 m/s
- Materiales ligeros (plásticos): 70-80 m/s
- Polvos: 15-25 m/s (depende de densidad aparente)

Estudio de la norma técnico legal en seguridad minera y las oportunidades de mejora en la legislación ecuatoriana menciona que la seguridad minera es un aspecto crucial en la industria minera. El acuerdo MERNNR-MERNNR-2020-0029-AM del Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables de Ecuador establece regulaciones para el transporte, almacenamiento y comercialización de minerales en el país. Según lo establecido en el acuerdo, es necesario contar con planes de manejo ambiental y planes de contingencia para la prevención de riesgos laborales en la industria minera. Mientras que Morillo (2019) realizó un estudio de la norma técnico legal en seguridad minera en Ecuador y el estudio sugiere la necesidad de una mayor supervisión y fiscalización en la implementación de medidas de seguridad en la industria minera.

2.2. Normativas internacionales pertinentes

2.2.1. ANSI/AWS D1.1 (2016).

Establece que el criterio principal de soldadura siempre es lograr una resistencia mínima del 100% de la del material base.

- Siempre se debe realizar pruebas destructivas para verificar la calidad de las soldaduras que soportarán cargas mecánicas o estarán sometidas a condiciones severas. Esta es la única forma confiable de garantizar resistencia y estanqueidad a largo plazo.
- Se deben desarrollar procedimientos de soldadura específicos para cada aplicación, considerando materiales, espesores, posiciones, pastas y electrodos a utilizar. Estos procedimientos deben ser calificados y verificados a través de pruebas.
- Los soldadores deben ser calificados y certificados en los procedimientos específicos que utilizarán. Solo personal adecuadamente capacitado debe llevar a cabo soldaduras estructurales.
- Se deben tener en cuenta las condiciones severas de una mina al momento de diseñar las uniones soldadas, incluyendo altas temperaturas, humedades, golpes, corrosión, esfuerzos mecánicos y vibraciones. Esto implica ángulos de bisel adecuados, tamaños de empalme óptimos, superposiciones y coberturas laterales suficientes.
- Se debe implementar un programa de inspección y mantenimiento soldado riguroso, que incluya monitoreo de equipos, capacitación continua, actualización de

procedimientos, reparaciones autorizadas y documentación de cada soldadura. Esto para asegurar la confiabilidad de las uniones durante toda su vida útil. 45o

2.2.2. Norma EN 1991-4:2006 (CEN, 2006)

Establece estándares para el diseño de tolvas de carga y descarga que son seguras y eficientes. Debe considerarse para el diseño de un buzón electroneumático, los estándares son los siguientes:

- Ángulo de descarga (α). El ángulo de la superficie de descarga de la tolva con la horizontal debe estar entre 60° y 70° para asegurar un flujo continuo por gravedad. Valores menores de 45° pueden obstaculizar la descarga.
- Relación de aspecto (h/d). Esta relación entre la altura (h) y diámetro (d) de la sección de descarga debe oscilar entre 0,5 y 2,0. Valores muy bajos o altos obstaculizan el flujo.
- Sección transversal. La forma de la sección transversal de la tolva debe ser simétrica (cuadrada, rectangular, circular) e inscribir un círculo de diámetro mayor o igual a 2 veces el tamaño máximo de las partículas. Esto evita el encallamiento de partículas grandes.
- Resistencia estructural. La tolva debe ser capaz de soportar el peso total del material de llenado, más las fuerzas resultantes de impactos y fricciones interparticulares. Se debe considerar un factor de seguridad ≥ 2 .

2.2.3. Norma ISO 13950

Proporciona los requisitos de seguridad para el transporte a presión y movimiento mecánico de bulk materials. Es relevante para el diseño de sistemas neumáticos de transporte y descarga como un buzón electroneumático.

Algunos puntos relevantes que sí menciona la ISO 13950 sobre tolvas:

- Se deben seguir prácticas estandarizadas para uniones soldadas.
- Se debe realizar un análisis estructural para determinar espesores de pared, refuerzos y rigidizadores necesarios.
- Los componentes de descarga deben ser diseñados para evitar obstrucciones y controlar el flujo.

2.2.4. Norma ASME B20.1-2018

Contiene parámetros de diseño para la seguridad de conductores y las transferencias entre equipos continuos. Resulta aplicable al diseño de un buzón electroneumático como sistema de transferencia, por ejemplo:

- Equipo eléctrico certificado. Todo equipo eléctrico (sensores, motores, paneles de control, etc.) debe ser apto para áreas clasificadas como peligrosas por riesgo de explosión. Certificación tipo Clase I Div 1 o similar.
- Sistemas de parada de emergencia. Especifica sistemas manuales de parada de emergencia tipo seta o botón en varios puntos del buzón, que interrumpa completamente la operación al ser accionados.
- Señalización. Requiere señalización clara y ubicua para identificar riesgos y advertir sobre procedimientos/equipos de seguridad. Por ej. riesgo de explosión, uso de protección respiratoria, salidas de emergencia, etc.

2.2.5. Norma MSHA Part 56.14107

Regula los requisitos mínimos de seguridad para tolvas, alimentadores de correa, y sistemas de transporte continuo en minería, de utilidad para el diseño de un buzón electroneumático seguro:

- Las compuertas de descarga, válvulas, y controles de los transportadores serán instalados de tal manera que se minimice la posibilidad de que las personas entren en contacto con las partes móviles
- Las obstrucciones deben ser removidas cuando el equipo se encuentra detenido y bloqueado, conforme a procedimientos seguros para restablecer la operación.
- Se deben identificar puntos críticos o áreas propensas a obstrucción para enfocar medidas de detección, prevención y liberación.

2.2.6. Norma OSHA 1910.146

Establece normas para trabajar en espacios confinados. Resulta aplicable al diseño de un buzón electroneumático, considerando los riesgos de manipulación de material y trabajos en chimeneas:

- Equipos certificados: Todo equipo eléctrico o con fuente de ignición que se introduce en el espacio confinado debe estar certificado como apto para áreas peligrosas (Clase I Div 1).

2.2.7. Norma ANSI Z535.1

Proporciona el sistema de colores de seguridad (Figura 6) que debe aplicarse a la señalización. Es útil para definir la señalización de seguridad de un buzón electroneumático.

Figura 6

Colores de seguridad ANSI Z535.1-2017.

ANSI Safety Red PMS 186C Munsell 7.5R 4/14	#bd2024
ANSI Safety Orange PMS 151C Munsell 5YR 6/15	#ff7900
ANSI Safety Yellow PMS 109C Munsell 5Y 8/12	#ffe100
ANSI Safety Blue PMS 285C Munsell 2.5PB 3.5/10	#004488
<i>ANSI Z535.1-2017: Safety Colors. RGB within Allowable Tolerance.</i>	

La selección de componentes neumáticos para un sistema suele basarse en normas y estándares internacionales que especifican requisitos de diseño, materiales, dimensiones, desempeño y seguridad a cumplir. Una de las normativas más utilizadas es ISO (International Organization for Standardization), que incluye la norma ISO 3320 (2012) "Neumáticos industriales - Conexiones con rosca para tuberías flexibles".

Según ISO 3320, los elementos neumáticos como válvulas, conectores, acoples y tuberías deben cumplir con especificaciones dimensionales estándar para ser intercambiables. Por ejemplo, esta norma define diámetros nominales, espesores de pared, resistencias mínimas de

materiales y pares de apriete recomendados para roscas cónicas sellante en componentes de un sistema neumático.

Dado a que la ISO 3320 está ampliamente adoptada, los fabricantes diseñan y producen componentes neumáticos compatibles que pueden ensamblarse y funcionar conjuntamente, facilitando reparación y mantenimiento. Los usuarios pueden seleccionar entre una amplia gama de opciones disponibles, garantizando interoperabilidad en base a las especificaciones de la norma.

Al seleccionar elementos neumáticos siguiendo ISO 3320, se obtiene mayor flexibilidad para integrar en un mismo sistema componentes de diferentes marcas, y la posibilidad de reemplazarlos sin necesidad de modificar el diseño original mientras se mantengan las especificaciones funcionales. Además, el cumplimiento de la norma asegura niveles adecuados de seguridad y calidad, minimizando fallas y riesgos operacionales.

2.3. Sobre costos

Los buzones de transporte por gravedad, también conocidos como canales, utilizan la fuerza de la gravedad para movilizar material a granel entre dos puntos. Al no requerir motorización, los costos de construcción de un buzón de gravedad artesanal son generalmente menores que uno neumático,

Un buzón de gravedad artesanal básico de 10 m de largo y material de acero podría costar alrededor de \$1000 a \$1500 dólares. Mientras que la instalación y obras civiles como canalizaciones, fosos de descarga y estructuras de soporte pueden costar \$500 dólares o más dependiendo de la envergadura.

Hay que tener en consideración que distancias mayores, diámetros superiores o materiales de construcción más robustos podrían elevar el costo dependiendo de los requerimientos de capacidad y vida útil.

2.4. Sobre el diseño del buzón

Al diseñar buzones es esencial tener en cuenta las limitaciones físicas de su funcionamiento. Para ello, es necesario realizar cálculos matemáticos utilizando las fórmulas diseñadas específicamente para este propósito.

Las ecuaciones 1, 2, 3, 4, 5 de (Vera Villacís, 2020), permiten calcular la capacidad máxima de almacenamiento y peso del buzón, así como la altura y posición necesarias para su ubicación en el lugar de trabajo:

1. Cálculo de la velocidad de descarga (m/s):

$$V = \sqrt{(2gh)}$$

Ecuación 1: velocidad de descarga

Donde:

g = aceleración de gravedad (9.81 m/s²)

h = altura de caída (m)

2. Cálculo del caudal másico (ton/s):

$$Q = \rho * V * A * 0.8$$

Ecuación 2: caudal másico

Donde:

ρ = densidad del mineral (ton/m³)

V = velocidad de descarga (m/s)

A = área de flujo de la tolva (m^2)

0.8 = Factor de llenado: Material de densidad media, moderadamente húmedo, con mezcla de diferentes tamaños de partículas. Pueden alcanzar un buen grado de llenado del buzón especialmente a bajas velocidades.

3. Cálculo del área de flujo (m^2):

$A = a * b$ para tolvas rectangulares

Ecuación 3: área de flujo

Donde:

D = diámetro de la tolva (m)

a, b = dimensiones de los lados de la tolva recta (m)

4. Cálculo de la fuerza de impacto (N):

$F = m * g * h / d$

Ecuación 4: fuerza de impacto

Donde:

m = masa de mineral en descarga (kg)

g = gravedad (m/s^2)

h = altura

d = distancia de impacto (m)

5. Dimensionamiento de espesor de lámina:

$$\sigma = ((M * FS) * c) / (t^2 * b)$$

Ecuación 5: espesor de lámina

Donde:

σ = resistencia a la tensión de la lámina (N/m² o Pa)

t = espesor de lámina (m) tener en cuenta la Norma ISO 13950

M = Momento flector (Nm)

c = Distancia desde centro de gravedad a fibra más alejada (m)

b = Ancho de sección transversal (m)

FS= factor de seguridad

(la fórmula explicada puede aplicarse como una primera aproximación al dimensionamiento del espesor de una tolva).

Las fórmulas 6,7,8 de la sección 7.4 de la norma EN 1991-4:2006 cubre el cálculo de esfuerzos en las paredes de silos y tanques debido a la presión del material almacenado.

6. Esfuerzo vertical en la pared σ_v

$$\sigma_v = \gamma_b \cdot h$$

Ecuación 6: Esfuerzo vertical en la pared

Donde:

γ_b = densidad aparente del material

h = altura del material

7. Esfuerzo horizontal en la pared σ_h :

$$\sigma_h = K_a \cdot \sigma_v$$

K_a = coeficiente de presión lateral

2.5. Sobre los softwares a usar

2.5.1. Sobre Inventor

Inventor ofrece herramientas de modelado 3D, simulación y análisis de elementos finitos aplicables al diseño de chutes para el manejo de materiales a granel. Permite modelar la geometría, mallar, aplicar propiedades de materiales y simular el flujo del producto para optimizar el diseño como se puede evidenciar en el video tutorial de (CAD, 2021).

De acuerdo con (Yu, 2023), Inventor fue utilizado para diseñar un chute ajustable para descarga de varios tamaños de tambores de transporte de carbón. El modelado paramétrico de Inventor facilitó modificar fácilmente las dimensiones del diseño para ajustarse a los diferentes tamaños de tambores.

Según (Ju, 2021), Inventor es útil para diseñar equipos de manejo de materiales como feeders, conveyors y chutes. Su interfaz intuitiva facilita modelar formas complejas, automatizar diseños y crear planos de ingeniería de construcción, reduciendo errores y ahorrando tiempo.

Finalmente (George, 2023) emplearon Inventor en el rediseño de un chute de descarga de mineral de hierro. Mediante modelado paramétrico, simulación dinámica y pudieron verificar y optimizar el diseño antes de implementar cambios en planta.

2.5.2. Sobre SimSolid

Según Turner (2019), SimSolid es un software que permite modelar y analizar el comportamiento de geometrías complejas sometidas a cargas, mediante el análisis de elementos finitos acoplado con simulación dinámica multibody. Si se compara con métodos tradicionales, SimSolid reduce los tiempos de modelado y procesamiento.

(Li, 2023) empleó SimSolid para analizar una tolva en forma de S utilizada para descender carbón en una lámina transportadora. Donde se modeló la geometría, se aplicaron las propiedades de materiales y se simuló los esfuerzos de la caída del carbón a través del chute, evaluando esfuerzos y zonas críticas. El análisis permitió modificar el diseño para mejorar su funcionalidad y extender su vida útil.

De acuerdo con (Chepelenkova, 2024), SimSolid es una herramienta valiosa de análisis de fuerzas dinámicas en equipos mecánicos que soportan altos esfuerzos, como tolvas, palas, etc. En comparación con otras opciones como Adams o RecurDyn, SimSolid está mejor adaptado al análisis integrado de sólidos 3D, fluidos, interacción fluido-estructura y contactos complejos entre materiales granulares.

Zhang (2021) analizó el flujo de mineral dentro de un chute de transferencia usando SimSolid. Mediante simulación dinámica multibody del sistema chute-mineral, pudieron evaluar la trayectoria de caída, velocidades de impacto y esfuerzos resultantes, optimizando el radio y ángulo de curvatura del chute para mejorar el flujo y minimizar derrames.

Finalmente, Geng (2022) estudió el flujo de carbón en un sistema chute-bunker empleando SimSolid. Se modelaron las propiedades tribológicas del carbón para simular de forma precisa su comportamiento granular. El análisis dinámico permitió optimizar la forma y rugosidad del chute para controlar la velocidad de caída y minimizar atascos, mejorando la eficiencia del sistema.

2.5.2. Sobre Fluidsim

Granda (2023) Describe el uso de Fluidsim para modelar y simular sistemas hidráulicos en la industria minera, como buzones de descarga y manipulación de material. Analiza

componentes neumáticos e hidráulicos disponibles en Fluidsim aplicables a estos sistemas.

Referencia útil sobre capacidades del software para buzones mineros.

Nogales-Mieles (2020) describe el uso de Fluidsim para simular el sistema hidráulico de una pala cargadora en minería (incluye buzón de descarga). Analiza variables de velocidad, fuerza y potencia. Presenta optimizaciones de la trayectoria de descarga y distribución de carga utilizando Fluidsim. Referencia relevante sobre optimización de diseños de buzones mineros con Fluidsim.

2.5.3. Sobre programación Ladder

(Lestari, 2023) Menciona que por medio del uso de FluidSIM se puede programar lenguaje ladder y a su vez visualizar su interacción con diferente elementos electrónicos o neumáticos facilitando la visualización de la automatización y el control industrial, siendo una potente herramienta de aprendizaje. A través de tutoriales, aplicaciones prácticas y documentación académica, los usuarios pueden adquirir valiosas habilidades para el diseño y simulación de sistemas automatizados.

La automatización mediante PLCs optimiza los procesos mineros, reduciendo errores humanos y mejorando la precisión operativa. Esto es crucial en un entorno donde los errores pueden tener consecuencias significativas como en el ámbito minero, no advierte (Pinto-Molina, 2023),

(Abad, 2023) implementaron un PLC que garantizó un mayor control y agilidad en el llenado de tolvas bajo distintas condiciones de operación, lo que disminuyó las pérdidas y aumento la vida útil de maquinaria previniendo fallas graves y eliminando la necesidad de doblar turnos para realizar el llenado de estas.

(Maesschalck, 2024) nos informa que los sensores ultrasónicos controlados por PLCs detectan una gran variedad de materiales, sin verse afectados por superficies no homogéneas y presentan una gran resistencia a las influencias medioambientales. Esto los convierte en una solución ideal para el control de niveles en silos, ya que pueden manejar materiales de diferentes tamaños y características sin comprometer la precisión de la medición

2.5.3. Sobre modelismo

El modelismo a escala permite construir prototipos físicos a partir de diseños 3D virtuales. Se usa para validar digitalmente conceptos de diseño y detectar riesgos de operación antes de fabricar a escala real (Yuan, 2021). Estudios construyeron prototipos a escala de tolvas, traspasadores y apiladores para comprobar digitalmente rendimiento, identificar modos de falla e incorporar mejoras al diseño como lo mencionan (Blanco, 2023)

(Blanco, 2023), diseñó virtualmente y construyeron físicamente a escala un apilador de rocas. Simularon caída libre de rocas para estudiar interacción, identificar zonas de alto impacto e incorporar modificaciones que mejorarán operación y seguridad del diseño final.

(Yuan, 2021) crearon digitalmente y construyeron prototipos a escala de traspasadores de roca. Simularon y visualizaron comportamientos del flujo de partículas no considerados en el modelo virtual. Detectaron áreas problemáticas y modificaron diseños para asegurar transporte suave de material antes de implementarlo a escala industrial.

(Costa, 2022) desarrollaron un modelo 3D de tolvas de mineral y su prototipo escala 1:10 por modelismo scratch. Simularon flujo de partículas y comprobaron rendimiento del diseño,

evaluando cumplimiento de especificaciones como velocidad, ángulo de descarga y obstrucción antes de fabricación final.

2.5.4. Sobre la eficiencia en la operación

En el estudio realizado por Awuah-Offei (2007), el autor desarrolló un modelo de simulación discreta para analizar el impacto de la eficiencia del tiempo de carga de camiones sobre la productividad global de la mina.

El modelo fue aplicado a una mina de mineral de hierro hipotética con una flota de 5 palas y 15 camiones de 240 toneladas.

Luego de validar el modelo, realizaron experimentos incrementando de la eficiencia del tiempo de carga de camiones en 10%, 20% y 30% respecto al caso base.

Los resultados mostraron que aumentar la eficiencia del tiempo de carga de camiones en 10% produjo un incremento del 6.5% en la productividad total del sistema minero. Asimismo, al incrementar la eficiencia del tiempo de carga de camiones en 20% y 30%, la productividad aumentó 13.7% y 21.6%, respectivamente.

Esto demuestra, según los autores, que mejoras relativamente pequeñas en la eficiencia del tiempo de carga pueden tener un efecto significativo en el rendimiento global de la operación minera, dado el rol crítico que juega el carguío de camiones en el proceso.

MÉTODOS

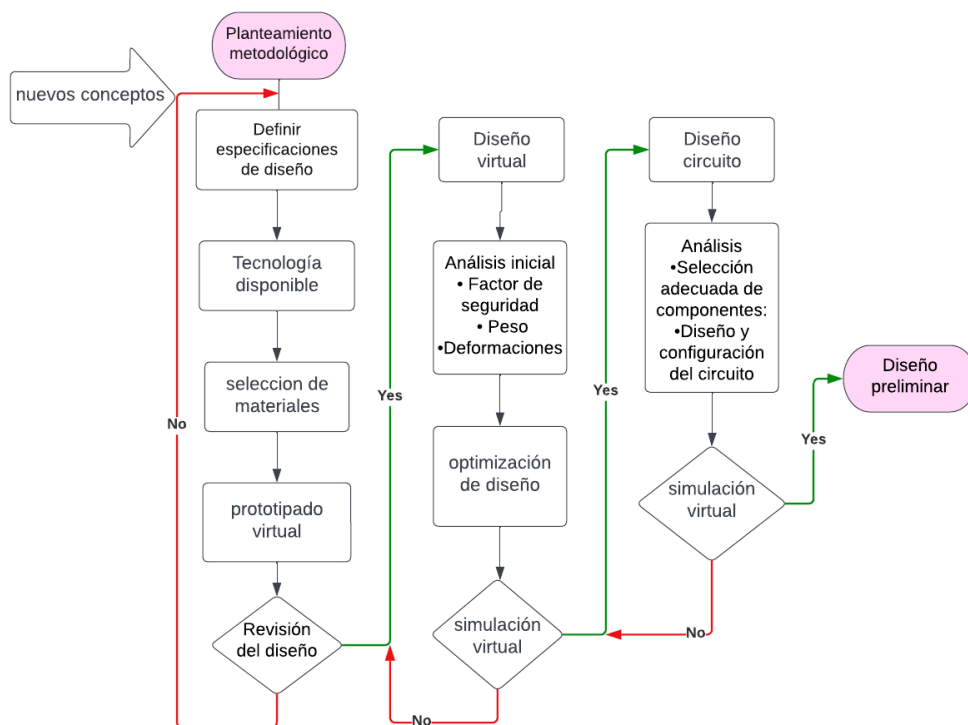
3.1. Metodología

El transporte y clasificación de materiales a granel es un proceso fundamental en la minería. Requiere de equipos resistentes y confiables para el manejo eficiente de mineral, roca y agregados desde su extracción hasta el procesamiento. Los buzones son componentes clave en el traspaso de materiales, cumpliendo con las siguientes funciones: recibir material, almacenar y dosificar la descarga a las etapas siguientes.

Para el diseño de un buzón electroneumático, se plantea una metodología que integra herramientas de ingeniería asistida por computadora para la generación de un diseño que cumpla con las especificaciones buscadas. Se contemplan las siguientes etapas (Figura 7):

Figura 7

Flujograma procesos.



3.1.1. Consideraciones en el diseño

En esta sección se abordarán las consideraciones importantes en el diseño del buzón, centradas en las limitaciones físicas y los datos numéricos claves relacionados con las capacidades del transporte a través de buzónes.

Uno de los valores fundamentales a tener en cuenta es la velocidad de descarga, dado a que nos proporciona información sobre el ángulo máximo de reposo del material.

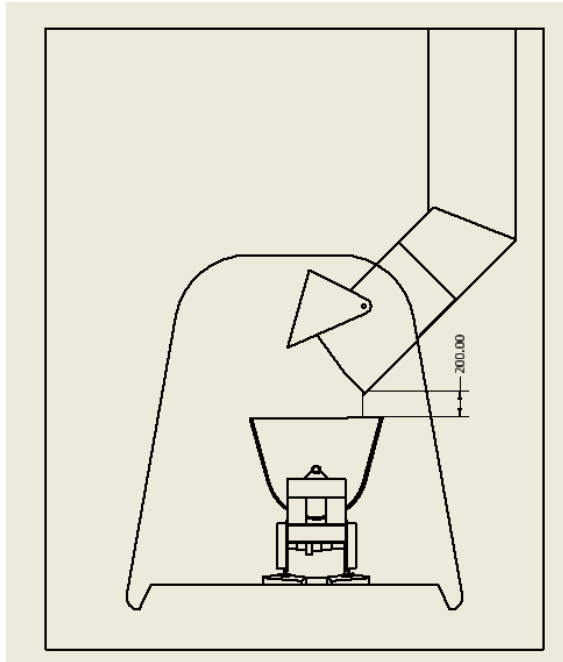
Es importante destacar que a medida que aumenta la velocidad de descarga, disminuye el ángulo de reposo resultante y, por lo tanto, aumenta la capacidad de vaciado del chute. Esto, a su vez, permite el manejo de materiales más finos con un ángulo de reposo natural más pequeño.

La velocidad de descarga optima de acuerdo con Xu et al. (2022), se encuentra entre 0.5 a 2 m/s (100 a 400 ft/min), teniendo en cuenta este dato se lo usa para despejar la altura del ducto

de salida del buzón con relación al vagón que se va a cargar, en la figura 8 altura pertenece a “200 mm”.

Figura 8

Diagrama altura del ducto de salida.



$$V = \sqrt{(2gh)}$$

Donde:

g = aceleración de gravedad (9.81 m/s^2)

h = altura de caída, ($X \text{ m}$)

V = Velocidad de descarga. (2 m/s).

$$2 \text{ m/s} = \sqrt{(2(9.81 \text{ m/s}^2) * X)}$$

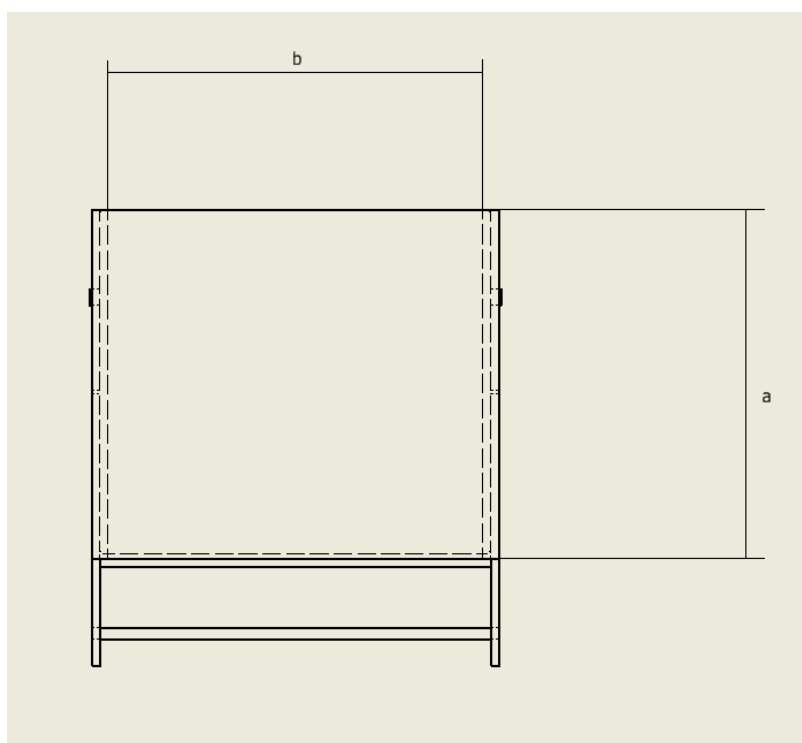
$$X = 0.2 \text{ m}$$

Con el cálculo de la velocidad de descarga se procede a calcular el área de flujo figura 8 o sección transversal en un buzón, lo que hace referencia al área disponible para el paso del material a lo largo de su eje principal.

Este dato impacta directamente en la capacidad de transporte. Una mayor área de flujo permite el paso de un mayor volumen de material por unidad de tiempo, aumentando la capacidad de descarga del chute. Esto aumenta la productividad del proceso al cual sirve el equipo.

Figura 9

Área de flujo.



3.1.2. Cálculo del área de flujo de la tolva (ton/h):

$$Q = \rho * V * A * 0.8$$

Donde:

ρ = Un estudio en minas de Sudáfrica Carter, J., (2019), reportó densidades de 2 a 4 g/cm³ para concentrados de oro. indicando alto contenido de minerales densos. (4 ton/m³)

V = velocidad de descarga (2 m/s)

Q = caudal másico (ton/h): Buzón pequeño (6-12 pulg de diámetro): 0.5 - 3 t/s

A = área de flujo de la tolva (X m²)

$$3 \text{ ton/s} = 4 \text{ ton/m}^3 * 2 \text{ m/s} * A * 0.8$$

$$A = 0.46 \text{ m}^2$$

Con el área de flujo de la tolva ya despejado se abordará el proceso ordenado para definir las medidas de base y altura de la tolva, teniendo en cuenta la relación de aspecto establecida por la norma EN 1991-4:2006. Además, se considerará la necesidad de permitir el acceso de un trabajador al conducto para realizar tareas de mantenimiento.

Estas dimensiones deben cumplir con las especificaciones establecidas en la norma EN 1991-4:2006, la cual dicta las relaciones de aspecto adecuadas para las tolvas. La relación de aspecto se refiere a la proporción entre la base y la altura de la tolva, y debe cumplir con los criterios establecidos en la norma.

3.1.3. Cálculo del área de flujo (m²):

$A = (\pi D^2) / 4$ para tolvas circulares

$A = a * b$ para tolvas rectangulares

Donde:

D = diámetro de la tolva (m)

a, b = dimensiones de los lados de la tolva recta (m)

La dimensión de la base de la tolva, b , debe cumplir con las normativas de seguridad que establecen la distancia entre hombros de una persona promedio. Según la norma ISO 21542:2011, se recomienda un ancho mínimo de paso de 700 mm para permitir el paso a gatas de una persona en una posición segura y cómoda, aunque esta holgura puede variar según el contexto y las especificaciones particulares del proyecto. Considerando el espesor del material.

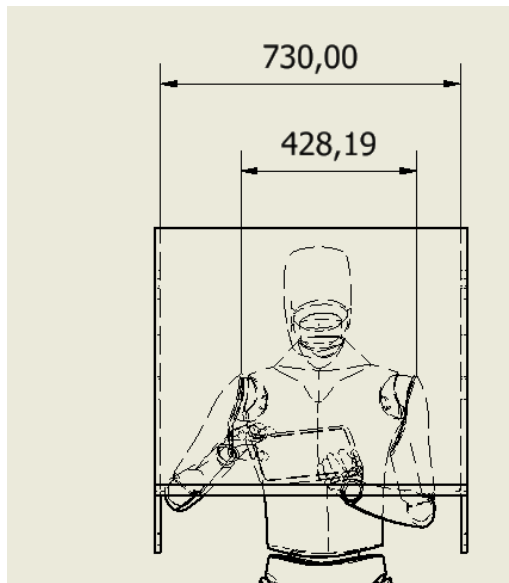
Es importante proporcionar un margen adicional para permitir cierta holgura y facilitar el acceso seguro del trabajador.

$$0.46 \text{ m}^2 = a * 0.7 \text{ m}$$

$$a = 0.65 \text{ m}$$

Figura 10

Persona versus área de tolva.



3.1.4. Selección de materiales:

Necesidades: alta soldabilidad, que pueda soportar las altas presiones, resistencia a la corrosión y bajo costo.

De acuerdo con el Ing. Edgar Almeida (2023) el material más usado para la construcción de buzones es el acero ASTM A645 grado B, mientras que para estructuras de soporte se usa el ASTM A36.

El acero ASTM A645 grado B es un acero de aleación de níquel especialmente tratado con calor que tiene una alta resistencia a la tracción y al límite elástico, así como una buena tenacidad a bajas temperaturas:

- Límite elástico mínimo: 590 MPa
- Resistencia a la tracción: entre 690 y 830 MPa
- Alargamiento mínimo en 50 mm: 20%
- Composición química: C (máx. 0,13%), Mn (0,90-1,50%), P (máx. 0,020%), S (máx. 0,010%), Si (0,15-0,30%), Ni (5,0-6,0%), Cr (0,10-1,00%), Mo (0,10-0,30%), Al (0,02-0,05%) y N (máx. 0,010%).

El acero A36 es un acero al carbono estructural, sin alear:

- Límite elástico mínimo: 250 MPa
- Resistencia a la tracción: entre 400 y 550 MPa
- Alargamiento mínimo en 50 mm: 20%
- Composición química:
 - Carbono (C): 0,25% máximo
 - Manganeso (Mn): 0,80-1,20%
 - Azufre (S): 0,05% máximo
 - Fósforo (P): 0,04% máximo
 - Silicio (Si): 0,40% máximo

La selección del acero estructural ASTM A645 grado B para la fabricación de chutes de mediana minería subterránea suele fundamentarse en normas técnicas que establecen requisitos de resistencia, durabilidad y seguridad para este tipo de aplicaciones.

En el caso de minería subterránea, la Norma INEN 1338 (Ecuador) adopta especificaciones de seguridad de minas subterráneas desarrolladas por el Instituto de Seguridad Minera de Canadá (Best Practice Guidelines - BPG) considerando las difíciles condiciones ambientales y operacionales. Estas guías recomiendan el uso de aceros al carbón soldables como

el ASTM A36 o similares para equipos e instalaciones mineras, por su alta resistencia, buena soldabilidad y bajo costo.

Dado que la norma INEN 2338 rige obras civiles en la industria minera ecuatoriana, la selección de aceros como el ASTM A645 grado B para aplicaciones como chutes de transporte se fundamenta en cumplir sus especificaciones técnicas y de seguridad. ASTM A645 grado B tiene, propiedades mecánicas coherentes con las recomendadas en las BPG para equipos mineros.

Por otro lado, la norma ASTM A6 especifica los límites químicos y de resistencia relacionados con la soldabilidad de los aceros al carbón, necesaria en muchas aplicaciones mineras donde se requiere unir secciones de gran tamaño. El ASTM A645 grado B cumple las especificaciones ASTM A6, siendo soldable y económico, idóneo para construir equipos como chutes. Su uso bajo parámetros normativos garantiza niveles adecuados de seguridad y servicio.

3.1.5. Cálculo fuerza de impacto:

La fuerza de impacto es un aspecto crucial para considerar en el diseño de un buzón de minería, ya que está relacionada con la seguridad de los trabajadores y la prevención de accidentes. Para evaluar la fuerza de impacto, es necesario tener en cuenta diversos factores, como el tipo de material transportado, la altura de descarga y la velocidad de flujo.

$$F = m * g * h / d$$

Donde:

m = masa de mineral en descarga (180kg)

g = gravedad (9.81m/s²)

h= altura (1.23m) desde la caja de quiebre a la boca del buzón

h_2 = altura sin caja de quiebre (30 m) En caso de una falla en el sistema de transporte o de una acumulación excesiva de material, el buzón debe estar diseñado para manejar el impacto inicial sin el uso de una caja de quiebre.

d = distancia de impacto (0.5m)

$$1. F = (180 \text{ kg} * (9.81 \text{ m/s}^2) * 1.23\text{m}) / 0.5 \text{ m}$$

$$F = 43434,86 \text{ N}$$

$$2. F = (180 \text{ kg} * (9.81 \text{ m/s}^2) * 30\text{m}) / 0.5 \text{ m}$$

$$F = 105840 \text{ N}$$

3.1.6. Esfuerzos:

La norma ASCE 7-16 establece procedimientos para calcular las cargas que actúan sobre una estructura, incluyendo:

- Carga muerta (peso propio): Peso de todos los elementos estructurales y arquitectónicos permanentes.
- Carga viva (de uso): Fuerzas transitorias producidas por el uso y ocupación de la estructura.
- Otras cargas: Sísmica, nieve, viento, otra.

Para un buzón de transporte vertical en minería, las cargas a considerar según ASCE 7-16 serían:

- Carga muerta:
 - Peso de láminas de acero, rigidización (costillas) y otros elementos
 - Peso de mecanismos de operación si los hubiera (compuertas, cargador)

- Carga viva:
 - Capacidad de almacenamiento = 3,2 toneladas, teniendo en cuenta un volumen de 0.8 m³ de capacidad de almacenamiento de buzón con densidad de los minerales auríferos, como la pirita aurífera (pirita con oro), la densidad puede oscilar entre 4 g/cm³ debido a la combinación de la densidad del oro y la pirita.
 - Volumen útil = Volumen geométrico “0,8 m²” por porcentaje de llenado (70-80% del diámetro)
- Otras cargas:
 - Presión por empuje de sólidos: Depende del tipo de sólido y ángulo de reposo.
 - Densidad aparente del material Das (2016) menciona que se debe estimar 1,2-1,6 t/m³ para minerales, Arena gruesa con grava, minerales ligeros, seco: 1.4 - 1.8 t/m³, Arena limosa con limo, minerales)
 - Ecuación 1: Fórmula general para calcular presión máxima generada en una chimenea de almacenamiento de 30 m:

$$P = p * g * h$$

3.1.7. Ecuación 7: Presión hidrostática

P = la presión ejercida en un punto (Pa)

p = es la densidad del fluido (1200 a 1800 kg/m³)

g = es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

h = es la profundidad a la cual se quiere calcular la presión hidrostática (30m) como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1

Cálculo de presión Hidrostática en diferente altura.

Presión Hidrostática				
Material	Altura (m)	Gravedad kg/m ³	Densidad kg/m ³	presión (Pa)
Minerales ligeros	30	9.81	1200	353160
Minerales ligeros	30	9.81	1400	412020
Arena gruesa con grava	30	9.81	1600	470880
Arena gruesa con grava	30	9.81	1800	529740

3.1.8. Dimensionamiento de espesor de lámina:

La Norma ISO 13950 establece requisitos de seguridad para el diseño de tolvas y sistemas de almacenamiento a granel. Define que el espesor mínimo de la placa de una tolva depende de su diámetro (D) y capacidad máxima de llenado. Por ejemplo, para un $D \leq 3$ m, especifica un espesor mínimo de 6 mm.

Sin embargo, el espesor mínimo es sólo un requisito de seguridad, y en la práctica el espesor real seleccionado suele ser mayor para proveer un factor de seguridad (FS) adicional. El FS permite que el componente soporte cargas mayores a las de diseño sin fallar. Un FS entre 2 y 4 es común en componentes estructurales.

Si se considera una tolva de 3 m o menos de diámetro y un factor de seguridad de 2,5 para un acero A36 respecto al mínimo de 6 mm - ISO 13950, resultaría un espesor recomendado de 15 mm (6 mm x 2,5). Este espesor provee capacidad de sobrecarga útil y una vida más prolongada. Además, una mayor masa de lámina mejora la capacidad de amortiguamiento de la estructura, atenuando vibraciones inducidas durante operación.

Por otro lado, el espesor de lámina también depende del material utilizado y sus propiedades mecánicas. Un acero dúctil de alta resistencia, como el ASTM A645, permitiría un espesor menor que uno más económico, pero para un factor de seguridad para minería se requiere un mayor factor de seguridad por lo que calcula el espesor de lámina para el acero ASTM A645.

La fórmula general para calcular espesor en una lámina es:

$$\sigma = ((M * FS) * c) / (t^2 * b)$$

$$\sigma = \text{Resistencia a la flexión ASTM A645 (590000000 N/m}^2 \text{ o Pa)}$$

$$M = \text{Momento flector para 3200 kg} = (44845.71 \text{ Nm})$$

$$c = \text{Distancia desde centro de gravedad a fibra más alejada (0.47762 m)}$$

$$t = \text{Espesor de lámina} = ? \text{ (m)}$$

$$b = \text{Ancho de sección transversal (0.650 m)}$$

FS= factor de seguridad (4) “Cabe indicar que, para tolvas de mineral, usualmente se aplican factores de 3 a 5, de acuerdo con Sharma (2022):

$$590000000 \text{ Mpa} = \frac{(44845.71 \text{ Nm} * 4) * 0.47762 \text{ m}}{t^2 * 0.650 \text{ m}}$$

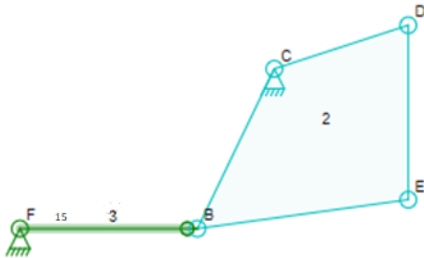
$$X = 0.01494 \text{ m}$$

3.2. Diseño virtual

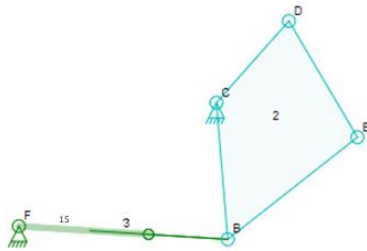
Ya con las definiciones de las dimensiones y características del buzón se precede a definir el funcionamiento del mecanismo para este paso se realiza un boceto del mecanismo con las medidas dadas en el software Linkage, donde se pueden observar las etapas del desplazamiento, como se muestra en las figuras 11, 12, y 13.

Figura 11

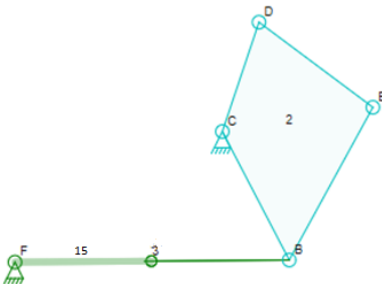
Etapa1: mecanismo en reposo.

**Figura 12**

Etapa2: mecanismo en avance.

**Figura 13**

Etapa3: posición de apertura.



Cabe destacar que se ha colocado el pistón neumático en la parte inferior del mecanismo para protegerlo de posibles caídas de material o impactos causados por la actividad. Además, la

compuerta se abre desde la parte superior para facilitar el corte del flujo y evitar que se forme una rampa al cerrar el buzón, de esta manera se previenen accidentes durante la operación.

Con la visualización del mecanismo se procede a definir sus limitaciones y medidas en AutoCAD (Figuras 14, 15, y 16) donde se define la carrera del pistón neumático.

Figura 14

Boceto etapa 1: dimensionamiento.

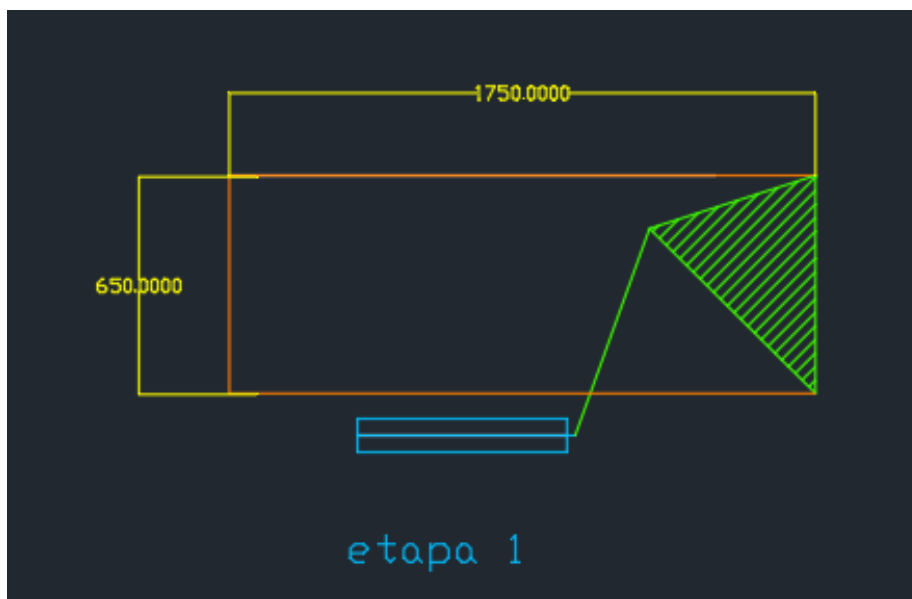
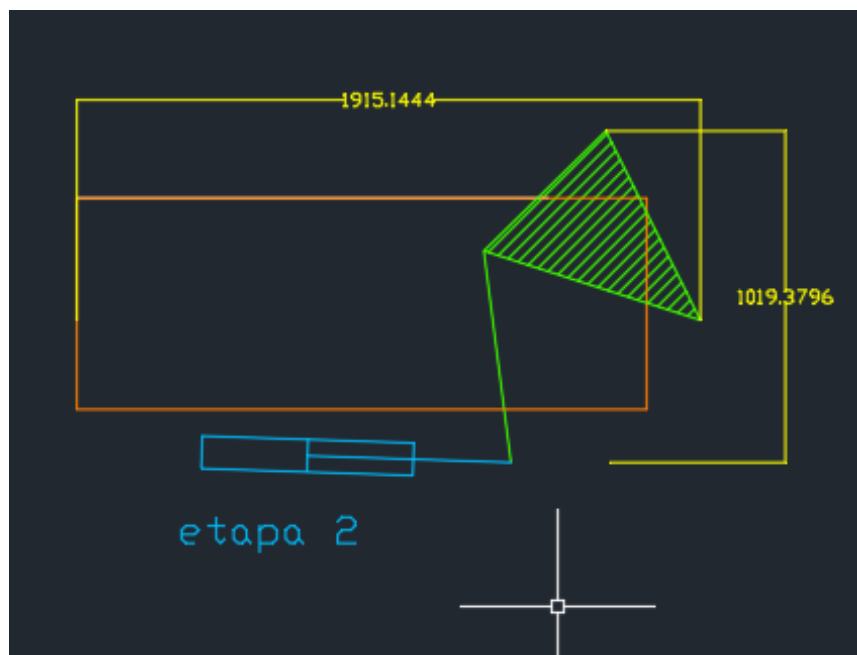
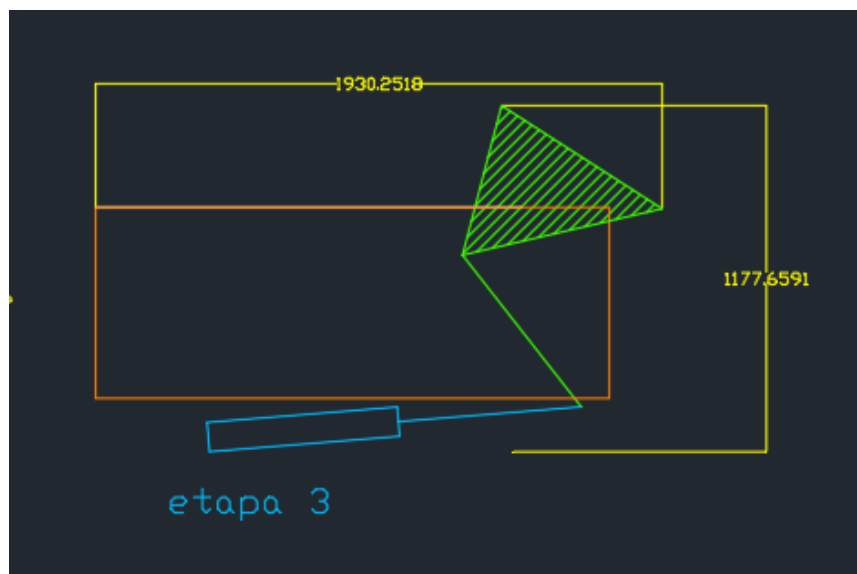


Figura 15

Etapa 2 altura y ancho máximos.

**Figura 16**

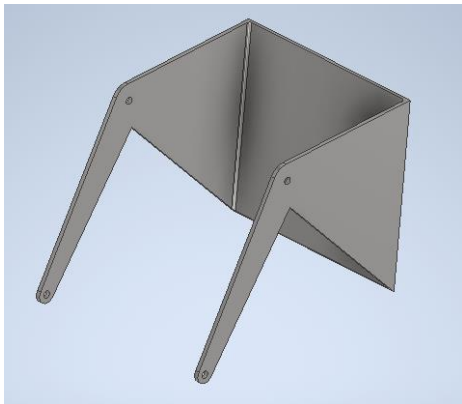
Etapa 3 altura y ancho máximo.



Con las dimensiones y geometría básica ya definidas se utiliza las herramientas de dibujo de Inventor para crear las formas básicas del buzón (figura 17), como las placas laterales, la compuerta y el brazo de levante.

Figura 17

Prototipo virtual 1.



Con el prototipo virtual terminado se procede a modelar un entorno junto con los elementos del mecanismo para la visualizar el funcionamiento del mecanismo como también la realizar una verificación de interferencias (Figura18).

Figura 18

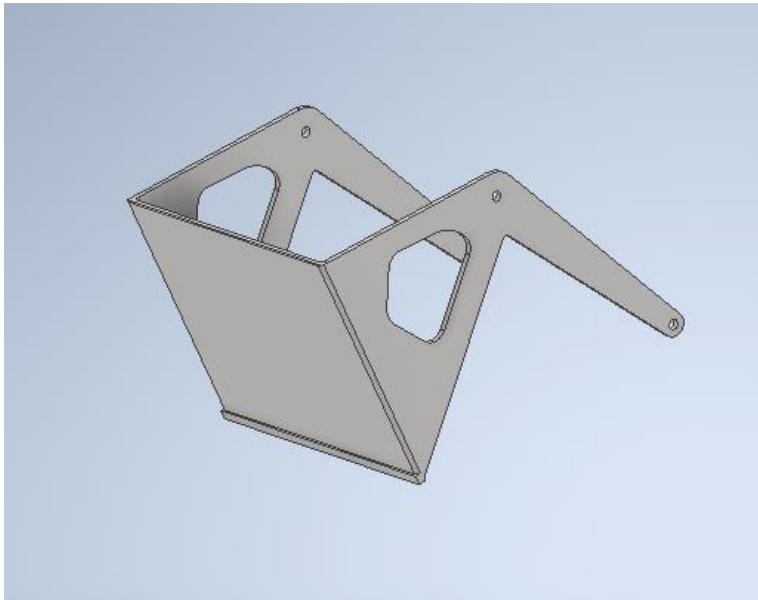
Ensamble inicial.



Después de verificar que no existe ninguna interferencia y de asegurar de que el pistón está en una posición segura y protegida, se optimiza el diseño debido a su alto peso, que superaba los 121 kg y a la fragilidad del brazo de empuje (Figura 19).

Figura 19

Prototipo 2.

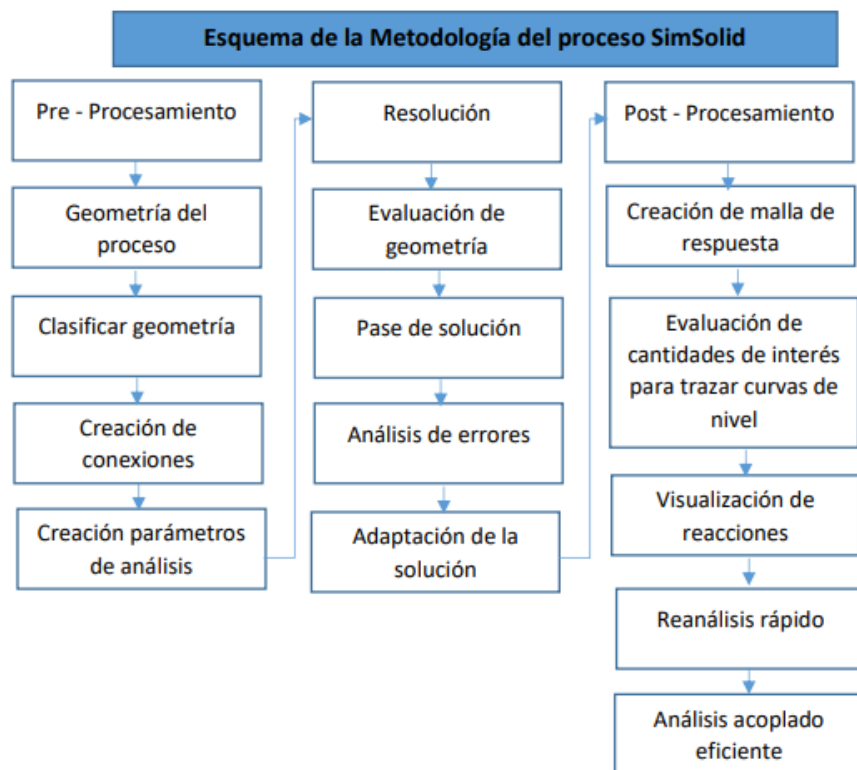


3.3. Simulación de esfuerzos

Popov (2018) nos indica que la metodología de SimSolid (Figura 20) se centra en la generación automática de una malla de borde directo y en el uso de técnicas avanzadas de elementos finitos para realizar análisis estructurales precisos y rápidos. Esto permite a los ingenieros evaluar la integridad estructural de sus diseños de manera eficiente y tomar decisiones informadas para mejorar la calidad y el rendimiento de los productos.

Figura 20

Esquema de la metodología del proceso SimSolid.



Fuente: Popov (2018).

Con el prototipo dos se reduce su peso a 105 kg, y se somete a una simulación de esfuerzo en el software SimSolid.

3.3.1. Información de la simulación

Nombre del proyecto: Simulación estructural de la compuerta del buzón

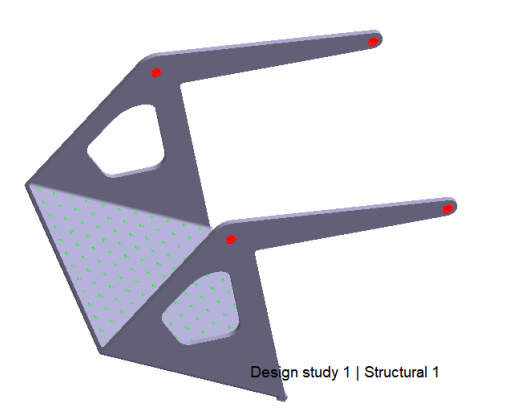
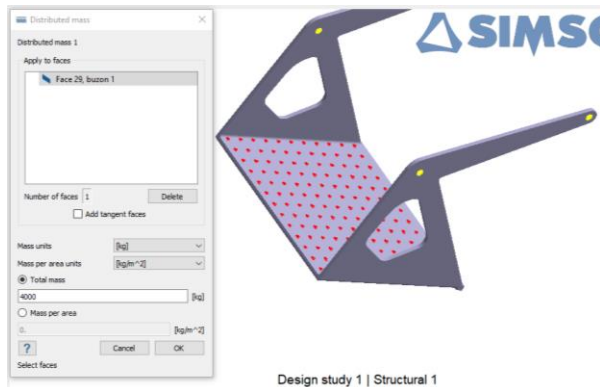
Software utilizado: SimSolid

Material seleccionado: Acero AISI 1340 normalizado

Carga aplicada: 3.2 toneladas en carga distribuida

Coordenadas gravedad: $x=1$, $y=-1$, $z=0$

Tipo de restricciones: 4 en pivote

Figura 21*Restricciones tipo pivote.***Figura 22***Carga distribuida.*

3.3.2. Tipo de simulación: Estructural lineal

Criterio de falla: Von Mises

Justificación del criterio de falla: El criterio de Von Mises se utiliza para evaluar la resistencia y la capacidad de carga de materiales dúctiles, como el acero.

Este criterio considera la combinación de esfuerzos principales y proporciona una medida del esfuerzo equivalente para determinar si el material se encuentra dentro de su rango elástico o si ha excedido su límite de plasticidad.

Figura 23

Factor de seguridad.

 Safety zones

Material	Failure criterion	Safety factor low	Safety factor high
AISI 1340 Steel - Normalized	Von Mises Stress ▼	3.2	6

Factor de seguridad: 3 (indicando que la estructura tiene una capacidad de carga tres veces mayor que la carga aplicada)

Puntos de alto esfuerzo: Durante la simulación, se observaron algunos puntos que mostraron valores de esfuerzo muy altos. Estos puntos pueden indicar zonas de concentración de esfuerzos y requerir una evaluación adicional para garantizar la integridad estructural y evitar el fallo.

Se decidió reforzar las zonas afectadas.

3.3.3. Simulación prototipo 3 compuerta buzón

Información del proyecto:

Nombre del proyecto: Simulación tolva consoportes

Software utilizado: SimSolid

Variables y parámetros: Describe las variables o parámetros que se tendrán en cuenta durante la simulación. Esto puede incluir condiciones ambientales, cargas aplicadas, velocidades, temperaturas, presiones u otros factores relevantes para el análisis de los modos de falla.

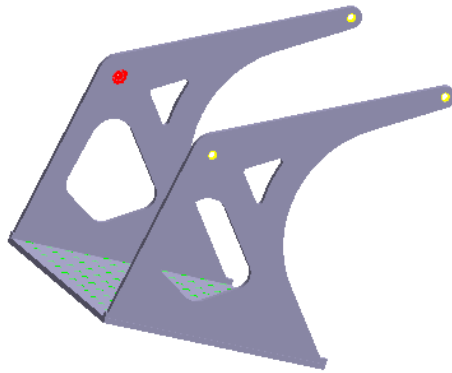
Material seleccionado: Acero AISI 1340 normalizado

Carga aplicada: 3.2 toneladas en carga distribuida

Tipo de fijaciones: 4 en pivote

Figura 24

Selección de restricciones y selección cara donde se asienta carga.



Descripción de la simulación:

Tipo de simulación: Estructural lineal

Criterio de falla: Von Mises

Figura 25

Factor de seguridad prototipo 3.

Material	Failure criterion	Safety factor low	Safety factor high
AISI 1340 Steel - Normalized	Von Mises Stress ▼	4	8

3.3.4. Simulación tolva

Información de la simulación:

Nombre del proyecto: Simulación estructural de la compuerta del buzón

Software utilizado: SimSolid

Material seleccionado: Acero AISI 1340 normalizado y AISI 1020 laminado en caliente
 “propiedades figura 26”.

Figura 26

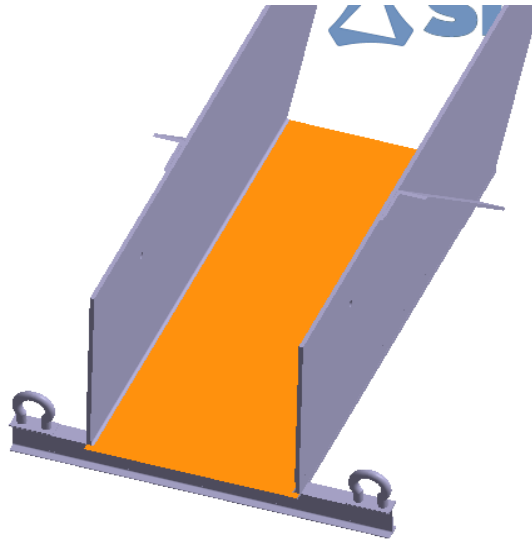
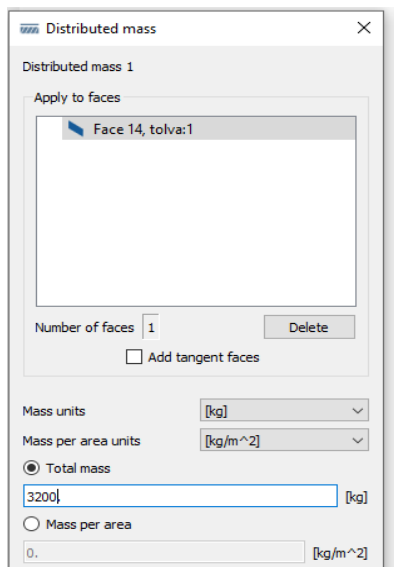
Propiedades de materiales AISI 1340 (Izquierda) y AISI 1020 (Derecha).

Material name			Material name		
AISI 1340 Steel - Normalized			AISI 1020 Steel - Hot Rolled		
System of units SI Material type isotropic			System of units SI Material type isotropic		
Property	Value	Units	Property	Value	Units
▼ Mechanical properties			▼ Mechanical properties		
Elasticity modulus	2.0000000000e+11	[pa]	Elasticity modulus	2.0000000000e+11	[pa]
Poisson's ratio	2.9000000000e-01	[dimensionless]	Poisson's ratio	2.9000000000e-01	[dimensionless]
Density	7.8700000000e+03	[kg/m^3]	Density	7.8700000000e+03	[kg/m^3]
Ultimate tensile stress	8.3400000000e+08	[pa]	Ultimate tensile stress	3.8000000000e+08	[pa]
Tensile yield stress	5.5800000000e+08	[pa]	Tensile yield stress	2.0500000000e+08	[pa]
Compressive yield stress	5.5800000000e+08	[pa]	Compressive yield stress	2.0500000000e+08	[pa]
Default failure criterion	Von Mises Stress		Default failure criterion	Von Mises Stress	
Thermal expansion coefficient	1.1500000000e-05	[1/(degree C)]	Thermal expansion coefficient	1.1700000000e-05	[1/(degree C)]
▼ Thermal properties			▼ Thermal properties		
Thermal conductivity	5.1900000000e+01	[W/(m*K)]	Thermal conductivity	5.1900000000e+01	[W/(m*K)]
Specific heat capacity	0.0000000000e+00	[J/(kg*K)]	Specific heat capacity	0.0000000000e+00	[J/(kg*K)]

Carga aplicada: 3.2 toneladas en carga distribuida en el piso de la tolva (Figura 27).

Figura 27

Selección de carga distribuida.

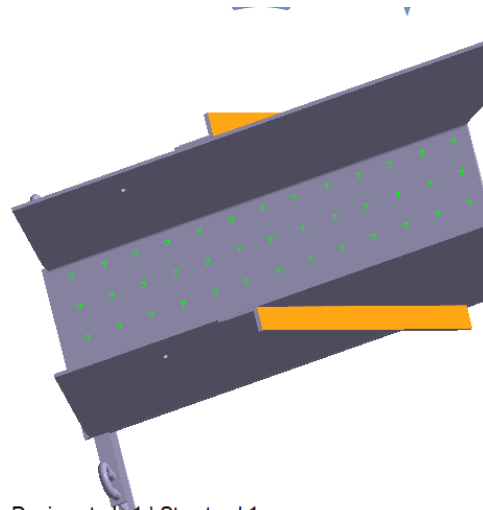
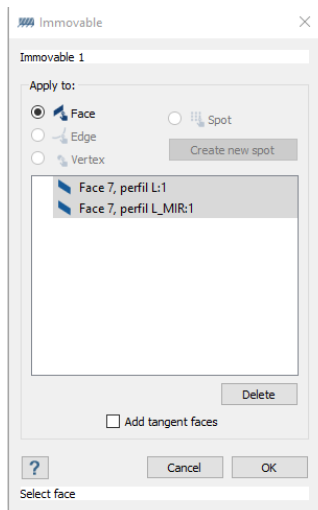


Coordenadas gravedad: $x=1$, $y=-1$, $z=0$.

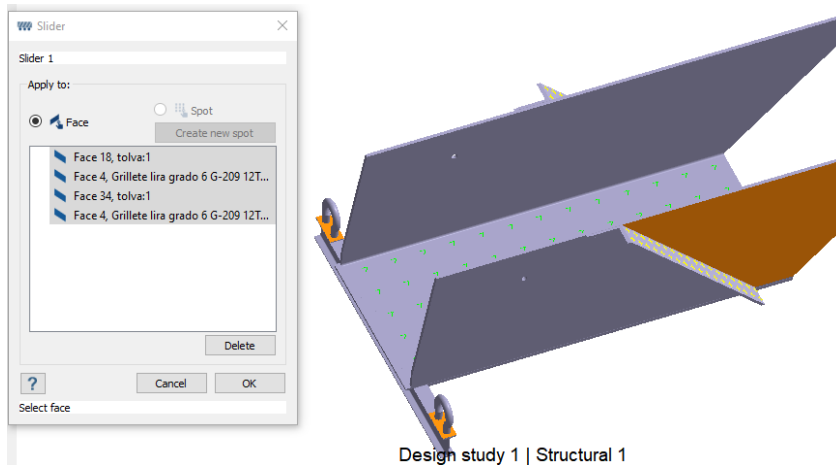
Tipo de restricciones: 2 fijaciones en fijas y 4 deslizantes (Figura 28).

Figura 28

Selección de restricciones, fijas(arriba) y deslizantes (abajo).



Design study 1 | Structural 1



Tras la finalización del prototipo, se obtuvo un resultado notable en términos de volumen y peso. El volumen del buzón se estimó en $14250908.715 \text{ mm}^3$, mientras que el peso total alcanzó los 111.870 kg. Estos valores son de gran relevancia ya que permiten evaluar la viabilidad y eficiencia del diseño, así como considerar posibles mejoras en términos de manejo y transporte del buzón.

3.3.5. Simulación estructural con presión hidrostática

Definición del problema: Presión por empuje de sólidos: Depende del tipo de sólido y ángulo de reposo.

Descripción del sistema: ensamble de buzón

Objetivos de la simulación hidrostática: Evaluar la resistencia estructural: La simulación permite analizar cómo diferentes densidades de material afectan la resistencia y estabilidad del chute de minería. Se pueden identificar las áreas de mayor tensión y evaluar la capacidad de la estructura para soportar las cargas hidrostáticas generadas por los materiales de diferentes densidades.

Preparación del modelo:

Software utilizado: SimSolid

Material seleccionado: Acero AISI 1340 normalizado y AISI 1020 laminado en caliente
“propiedades ilustracion 26”.

Carga aplicada: presiones hidrostáticas de 1200 a 1800 kg/m³ a 30 m

Tipo de fijaciones: 2 fijaciones en fijas y 4 deslisantes

Verificación de la calidad del mallado.

Asignación de las propiedades físicas y de contacto.

Configuración de la simulación hidrostática:

Figura 29

Configuración de las condiciones de carga hidrostática.

Depth direction

The Gravity Load vector set in this analysis is used here as the depth direction

X: 0

Y: -1

Z: 1

Liquid density

Units [kg/m³]

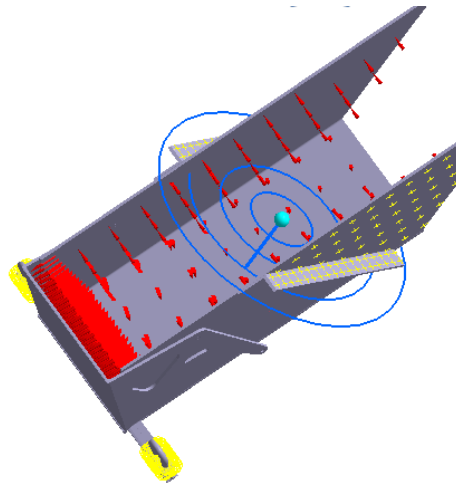
1200 [kg/m³]

Pressure at liquid surface

Units [MPa]

0.35 [MPa]

? Cancel OK



3.3.6. *Diseño circuito electroneumático*

Una vez completado el diseño del buzón y su simulación, se procedió a desarrollar un circuito electroneumático utilizando el software FluidSIM. El objetivo fue diseñar un circuito que permitiera un accionamiento adecuado del mecanismo del buzón, teniendo en cuenta aspectos clave como la robustez y la simplicidad.

Metodología de funcionamiento de Fluidsim es un software de simulación de circuitos neumáticos y electrohidráulicos desarrollado por Festo. Se basa en la metodología de modelado paramétrico y simulación en tiempo real para reproducir con precisión el comportamiento de sistemas de flujo de fluidos (Festo., 2021). Algunos aspectos clave de su funcionamiento son:

- Librería de componentes: Contiene modelos 3D parametrizados de cilindros, válvulas, tuberías, electroválvulas y más partes neumáticas y hidráulicas (Festo., 2021).
- Ensamblajes: Permite conectar los componentes para modelar sistemas complejos mediante diagramas de tuberías o en 3D (Festo., 2021).
- Simulación en tiempo real: Reproduce el comportamiento dinámico del circuito resolviendo la presión, caudal y posición en cada punto, en función del tiempo (Festo., 2021).
- Variables controlables: Presiones y caudales de entrada, tiempos de apertura de válvulas, señales eléctricas, etc. para ensayar diferentes escenarios (Festo., 2021).
- FluidSIM permite simular circuitos eléctricos y neumáticos utilizando el lenguaje Ladder, facilitando el aprendizaje y la visualización de conceptos fundamentales en la automatización. Los usuarios pueden diseñar circuitos y simular su funcionamiento en un entorno gráfico amigable (Festo., 2021).

- Análisis de prestaciones: Detecta posibles fallos, comprueba tiempos de ciclo, optimiza la secuencia de operación y más (Festo., 2021).
- Esta metodología, basada en simulaciones en tiempo real de circuitos neumáticos e hidráulicos, permite predecir el comportamiento real del sistema, detectar potenciales problemas y optimizar el diseño desde las primeras etapas (Festo., 2021).

En primer lugar, se analizaron las especificaciones del mecanismo y se identificaron las necesidades de control y activación del pistón neumático. Se consideraron factores como la presión de trabajo, la velocidad de operación y la fuerza a mover.

Se procede a elaborar la Tabla 2 lista de procesos técnicos, la cual se especifica para el diseño de un circuito electroneumático de accionamiento de un buzón en minería subterránea. En esta tabla, se asignará a cada proceso un número de función que será utilizado en los siguientes pasos de la metodología. Además, se relacionará cada proceso con un tipo de acción, que puede ser manual, automático o mecánico, dependiendo de qué aspectos del accionamiento se ven afectados por dicha función. A partir del tipo de acción se podrán determinar las posibles causas de las limitaciones presentadas en la tabla.

Tabla 2

Lista de procesos técnicos.

Sistemas técnicos y sus limitaciones			
Función	Descripción	Proceso	Limitación

Verificar que el estado de apagado de los		
1	circuitos neumáticos y eléctricos	Manual Falla Humana
2	Verificar que el buzón este vacío	Manual Falla Humana
		Falla del
3	Encender el sistema electroneumático	mecánico mecanismo
	Verificar que no haya personas cerca de la	
4	boca del buzón	Manual Falla Humana
	Verificar que el mecanismo se encuentre	
5	funcional "estado abierto y cerrado"	mecánico mecanismo
6	Cargar la chimenea	Manual Falla Humana
7	Verificar el correcto llenado del Chute	Manual Falla Humana
	Verificar la correcta posición de la burra a	
8	cargar	Manual Falla Humana
		Falla del
9	Accionar el mecanismo de apertura	mecánico mecanismo
10	Verificar el correcto flujo de material	Manual Falla Humana
11	Verificar el llenado de la burra	Manual Falla Humana
12	Cerrar el buzón	Manual Falla Humana

A continuación, se utilizó el software FluidSIM para diseñar el circuito electroneumático. Se seleccionaron los componentes adecuados, como válvulas, cilindros, y se los ubicó en el entorno virtual del software. Se establecieron las conexiones y se configuraron los parámetros correspondientes para lograr el funcionamiento deseado.

Se priorizó la simplicidad en el diseño del circuito, evitando complejidades innecesarias que pudieran dificultar la operación del sistema.

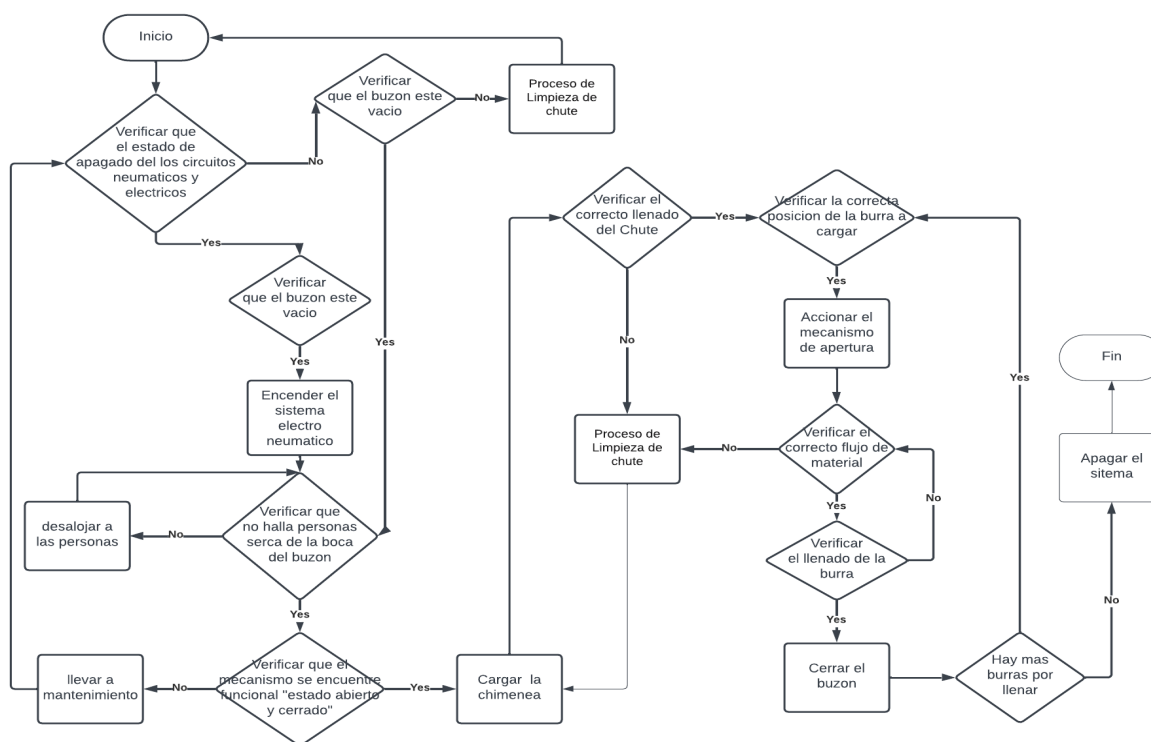
Se buscaron soluciones eficientes y de fácil comprensión, facilitando así la implementación y el manejo del circuito electroneumático.

Una vez completado el diseño del circuito en FluidSIM, se realizaron pruebas virtuales para verificar su funcionamiento y optimizar cualquier aspecto que pudiera mejorar el rendimiento del mecanismo del buzón.

Para comprender el sistema se realizó un flujograma del proceso de operación, en la figura 30 se ve el flujograma, y se tomó la decisión de utilizar tres botones distintos en el circuito electroneumático. Estos botones fueron diseñados para realizar funciones específicas y garantizar un control adecuado del mecanismo del buzón. A continuación, se describen las funciones de cada botón:

Figura 30

Proceso de operación.



En el diseño del circuito neumático para el buzón, se utilizaron varias piezas neumáticas para asegurar un funcionamiento adecuado. El proceso de selección de elementos neumáticos para aplicaciones en un entorno minero requiere una consideración exhaustiva de múltiples factores técnicos y normativos. En este contexto, se han aplicado las siguientes normas internacionales: ISO 3320:2012, ISO 15552, ISO 15407 y IEC 60529, para garantizar la conformidad, confiabilidad y rendimiento óptimo de los componentes neumáticos seleccionados.

La norma ISO 3320:2012, proporciona un marco de dimensiones de cilindros para el sistema métrico, utilizadas en maquinaria hidráulica y neumática. Al seguir esta norma, se ha asegurado una comunicación clara y precisa en la selección de los elementos neumáticos, permitiendo una comprensión común de los conceptos y términos utilizados en la industria minera.

La norma ISO 15552, titulada "Cilindros neumáticos de carrera ajustable y fija: Serie métrica", ha sido aplicada para seleccionar el cilindro adecuado para el pistón de 625 mm de carrera y la fuerza requerida de 111.90 Kgf. Siguiendo esta norma, se han considerado los requisitos de diseño, materiales, dimensiones y rendimiento del cilindro neumático para asegurar su compatibilidad con las especificaciones del proyecto y su operación confiable en un entorno minero.

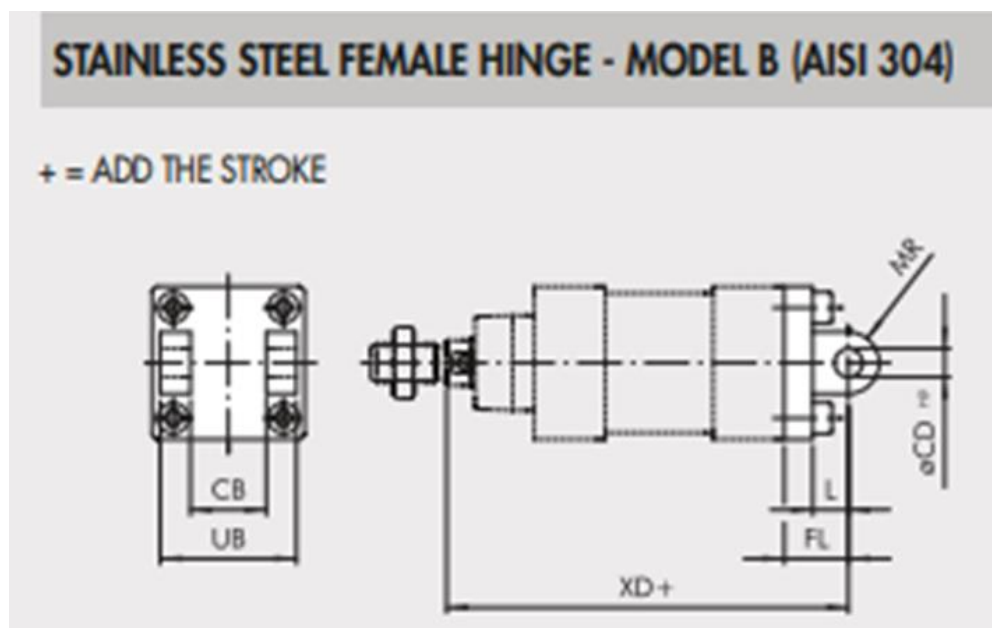
La norma ISO 15407, "Válvulas neumáticas e hidráulicas - Dimensiones de montaje de las válvulas y accesorios de control", ha sido utilizada para seleccionar una válvula 5/2 con solenoide y otra válvula 3/2 con solenoide, que cumplan con los estándares de montaje y dimensiones específicas. Estas válvulas se han elegido para controlar y regular el flujo de aire en el sistema neumático, considerando los requisitos de la aplicación y las condiciones del entorno minero.

Además, se ha tenido en cuenta la norma IEC 60529, "Grados de protección proporcionados por los recintos (Código IP)", que establece los niveles de protección de los equipos eléctricos y electrónicos contra la entrada de polvo y agua. En un entorno minero, donde la presencia de polvo y agua es frecuente, donde el grado de protección es el IP65: Protección total contra la entrada de polvo y chorros de agua a presión desde cualquier dirección.

Se selecciono componentes neumáticos que cumplen con los estándares de protección adecuados, garantizando su funcionamiento seguro y confiable.

Figura 31

Piston doble efecto ISO 15552 con bisagra hembra.



Ø	UB	CB	FL	CD	XD	MR	L	Weight [g]
32	45	26	22	10	142	10	9	175
40	52	28	25	12	160	12	9	250
50	60	32	27	12	170	12	11	425
63	70	40	32	16	190	16	11	635
80	90	50	36	16	210	16	14	1270
100	110	60	41	20	230	20	14	2000
125	130	70	50	25	275	25	20	3715

with 4 screws, 4 washers. **WITHOUT PIN.**

Figura 32

Clave de los códigos ISO 15552.

KEY TO CODES						
CYL	1 2 1 TYPE	0	32 BORE	0050 STROKE	B MATERIAL	L GASKETS
	121 Double-acting, cushioned	0 Standard	32	For the maximum	B AISI 316 rod, technopolymer piston rod: standard for cylinders of Ø32 to Ø63	L Piston rod gaskets made of special polyurethane; other gaskets made of NBR
▲	122 Through-rod	5 Standard Non-magnetic	40	suppliable strokes, look at the technical data	W AISI 316 rod, aluminium piston rod: standard for all cylinders from Ø80 to 125, Ø32 to 63 with strokes > 999 and Ø32 to 125 for through piston rod versions	
	124 Double-acting, non-cushioned	3 Series 3	50			
		5 Series 3 Non-magnetic	63			
			80			
			■ 100			
			■ 125			

3.3.7. Construcción Modelo Escala

Se lleva a cabo con el objetivo de evaluar y previsualizar el funcionamiento automatizado del buzón, siendo la seguridad del operario un factor fundamental en este estudio, ya que se busca identificar los riesgos asociados con cada enfoque y evaluar la efectividad de los mecanismos de seguridad implementados.

En primer lugar, se realizará la construcción a escala de un buzón neumático utilizando piezas impresas en 3D y diversos materiales como, cartón, espuma flex, madera entre otros.

Se analizará la seguridad del operario durante la manipulación y operación del buzón identificando posibles riesgos de cada operación, como la correcta apertura durante el mantenimiento, que no exista errores de apertura y evaluando la efectividad de los mecanismos de seguridad implementados en el diseño como el botón de parada y el funcionamiento de las luces de advertencia

Pasos que se llevarán a cabo para la construcción de la maqueta:

- **Diseño del Buzón en Software Inventor:** Se utilizó el software Inventor para diseñar el buzón a escala. Se tuvieron en cuenta los requisitos de funcionamiento, las dimensiones y las restricciones de fabricación. Se modelaron todas las partes del buzón, incluyendo la compuerta, las paredes, la estructura y los mecanismos de apertura y cierre.
- **Impresión de las Piezas en 3D:** Una vez completado el diseño en el software Inventor, se exportaron los archivos en formato compatible con la impresión 3D. Se seleccionará un material adecuado para la impresión, considerando factores como resistencia, durabilidad y flexibilidad. Se procedió a la impresión de todas las piezas necesarias para el ensamblaje del buzón.
- **Ensamblaje del Buzón Neumático:** Con las piezas impresas en 3D listas, se procederá al ensamblaje del buzón. Siguiendo las instrucciones de ensamblaje detalladas en el diseño, utilizando herramientas y técnicas adecuadas.

1. Selección de Materiales:

○ Materiales Operativos:

- i. **Bronce:** Empleado en componentes que requieren alta resistencia y durabilidad, además de ofrecer propiedades de

baja fricción ideal para la estructura de la tolva y compuerta del buzón.

- ii. MDF: Utilizados para la base y el armazón, proporcionando rigidez y soporte de la estructura de la maqueta.
- iii. PLA: Utilizado en impresión 3D, debido a su facilidad de uso y biodegradabilidad. Ideal para piezas que no están sometidas a altas tensiones o temperaturas como los vagones y rieles.
- iv. Poliacrílico: Utilizado por sus propiedades de transparencia y resistencia, usado en la cubierta de la chimenea, para poderse observar el comportamiento del material durante la descarga.
- v. Componentes electrónicos: cables, un puente H, motor eléctrico, resistencia y dos transformadores de 12v.
- Materiales de acabado:
 - i. Espuma flex: usado para simular las irregularidades del interior de una mina.
 - ii. Yeso: Utilizado para crear texturas realistas y detalles en superficies, ideal para simular acabado de piedra.
 - iii. Madera balsa: Empleada para detalles finos y estructuras ligeras como el soporte del buzón que en este caso es puramente estético
 - iv. Modelos en miniatura: Incluye tres mineros y una locomotora, utilizados para añadir detalles realistas a la maqueta y facilitar la percepción de escala y contexto.

- v. LEDs: usados para una iluminación activa de la maqueta
2. Escalado: La maqueta se construyó a una escala de 1:22, lo que significa que cada 1 centímetro de medida en la maqueta representa 22 centímetros en la realidad. Esta elección de escala permite una representación detallada y completa de los elementos, facilitando la visualización y comprensión del diseño propuesto. La escala 1:22 es particularmente adecuada para proyectos que requieren un equilibrio entre el nivel de detalle y la manejabilidad de la maqueta, permitiendo a los observadores apreciar los diferentes niveles que conecta la chimenea.
 3. Controlador electrónico: Para el control de la maqueta, se ha seleccionado un Arduino como el dispositivo controlador principal. Esta decisión se basa en que los PLCs suelen ser dispositivos más grandes y complejos, diseñados para aplicaciones industriales que requieren un alto voltaje y robustez. Su tamaño y requisitos de alimentación pueden resultar poco prácticos para una maqueta donde el espacio es limitado y la simplicidad es clave.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Resultados

Tabla 3

Resultados obtenidos en la presente investigación.

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (A.M.F.E)	
Tipo	Detección n

Modo/s potencial/es de fallo	Efecto/s potencial/es del fallo	Gravidad	Causa(s) potencial(es) del fallo(s)	Ocurrir en ci a	Verificación(es) y/o control(es) actual(es)	Acción(es) recomendada(s)
Atasco de material	Dificultad para cerrar o abrir la compuerta	6	Mecánico	Características del material a descargar	9 Capacitación del personal	Inspección visual regular Establecimiento de procedimientos de emergencia y planes de respuesta para mitigar los efectos de fallas catastróficas.
Desgaste o corrosión	Reducción de la vida útil de la cara de la compuerta	7	Corrosión	Calidad del material	9 Selección de materiales resistentes a la corrosión	Inspecciones visuales periódicas de las superficies expuestas Monitoreo de la operación de apertura y cierre de la compuerta para identificar cualquier dificultad o desalineación. Uso de materiales más resistentes
Problemas de alineación	Desgaste prematuro de las partes móviles	6	Mecánico	Cargas inadecuadas	8 Capacitación del personal	Inspección visual regular de la compuerta para identificar cualquier dificultad o desalineación. Capacitación y entrenamiento del personal para asegurar un uso adecuado y seguro
Desgaste o corrosión	Reducción de la vida útil de la pared de la compuerta	7	Corrosión	Calidad del material	9 Selección de materiales resistentes a la corrosión	Inspecciones visuales periódicas de las superficies expuestas Implementación de sistemas de alerta temprana o monitoreo
Desgaste por fricción	Reducción de la vida útil de la pared de la compuerta	5	Mecánico	Materiales abrasivos o corrosivos	10 Selección de materiales adecuados	Inspecciones visuales periódicas de las superficies expuestas Uso de materiales más resistentes
Inestabilidad estructural	Riesgo de colapso o inoperatividad del buzón	10	Estructural	Cargas inadecuadas	8 Capacitación del personal	Inspección regular de las estructuras del buzón para Capacitación y entrenamiento del personal

4.1.1. Presentación de resultados:

Durante el proceso de diseño del chute de minería, se obtuvieron los siguientes resultados basados en las consideraciones establecidas:

Velocidad de descarga: Se estableció una velocidad de descarga de 2 m/s. Esta velocidad permite un flujo eficiente del material a través del chute, evitando acumulaciones y obstrucciones que puedan afectar la operatividad del sistema.

Área de flujo: Se determinó un área de flujo de 0.46 m². Esta área proporciona un espacio adecuado para el paso del material a lo largo del chute, permitiendo un flujo continuo y evitando la formación de atascos o acumulaciones indeseadas.

Aplicación de la norma ASTM E1613-20: Durante el diseño del chute de minería, se tuvo en cuenta el cumplimiento de la norma ASTM E1613-20. Esta norma establece los requisitos para el diseño de chutes de minería, garantizando la seguridad y eficiencia en su funcionamiento.

Medidas de la tolva: La tolva del chute se diseñó con medidas de 0.7 m de ancho y 0.65 m de base. Estas dimensiones permiten una adecuada recepción y almacenamiento del material antes de su descarga, asegurando un flujo uniforme y evitando posibles obstrucciones o bloqueos.

Cumplimiento de la norma ISO 21542:2011: Durante el diseño del chute de minería, se verificó el cumplimiento de la norma ISO 21542:2011. Esta norma establece los requisitos de accesibilidad y diseño universal en entornos construidos, garantizando la seguridad y accesibilidad de las instalaciones mineras.

Al tener una altura de 0.65 la relación de aspecto (h/d) es de 0.68 lo que nos permite cumplir con la normativa EN 1991-4:2006 y la ISO 21542:2011.

En el proceso de selección de materiales para el diseño del chute de transporte, se consideraron varias necesidades importantes, como la alta soldabilidad, la capacidad de soportar altas presiones, la resistencia a la corrosión y un bajo costo. Para cumplir con estos requisitos, se han identificado dos opciones de materiales adecuados: el acero ASTM A645 grado B y el acero A36 bajo la Norma INEN 1338.

El acero ASTM A645 grado B es de alta resistencia, con una alta capacidad para soportar altas presiones. Además, tiene buenas propiedades de soldabilidad, lo que facilita el montaje del chute. Este acero también cuenta con una resistencia aceptable a la corrosión, lo que lo hace adecuado para su uso en ambientes mineros donde pueden estar presentes sustancias corrosivas.

Por otro lado, el acero A36 bajo la Norma INEN 1338 es una opción comúnmente utilizada en aplicaciones estructurales debido a su disponibilidad, bajo costo y buenas propiedades mecánicas. Aunque puede tener una resistencia a la corrosión inferior al acero ASTM A645 grado B, sigue siendo adecuado para su uso estructura de soporte donde no se espera una exposición severa a agentes corrosivos. Además, el acero A36 es fácilmente soldable y puede cumplir con los requisitos de resistencia

4.1.2. Resultado esfuerzos que soporta el diseño de un buzón

Durante el proceso de cálculo de esfuerzos para el diseño de un buzón, se han obtenido los siguientes resultados:

Se ha utilizado la norma ASCE 7-16 como referencia para determinar los criterios de diseño y carga. Esta norma proporciona pautas y requisitos para el diseño de estructuras sujetas a cargas, incluyendo las cargas sísmicas y de viento.

La capacidad de almacenamiento del buzón se ha establecido en 3.2 toneladas, lo cual se traduce en un volumen de almacenamiento de 0.8 m^3 .

A continuación, en la tabla 3, se presentan los resultados de las presiones calculadas para diferentes materiales y densidades:

Tabla 4

Presiones hidrostáticas.

Material	Presión hidrostática			
	Altura	Gravedad	Densidad	Presión (Pa)
Minerales ligeros	30	9.81	1200	353160
Minerales ligeros	30	9.81	1400	412020
Arena gruesa con grava	30	9.81	1600	470880
Arena gruesa con grava	30	9.81	1800	529740

4.1.3. Resultados del proceso de cálculo de espesor de lámina

Los resultados obtenidos durante el proceso de cálculo de espesor de lámina se presentan a continuación:

La Norma ISO 13950 establece que, para un diámetro (D) del objeto menor o igual a 3 metros, se debe utilizar un espesor mínimo de 6 mm. Esta norma proporciona directrices para el diseño de estructuras metálicas y establece requisitos específicos para el espesor mínimo de la lámina.

Aplicando la fórmula general para calcular el espesor de la lámina, se obtiene un valor de 0.015 metros con un factor de seguridad de 4. Esta fórmula considera diferentes factores como la carga aplicada, las propiedades del material y los criterios de diseño.

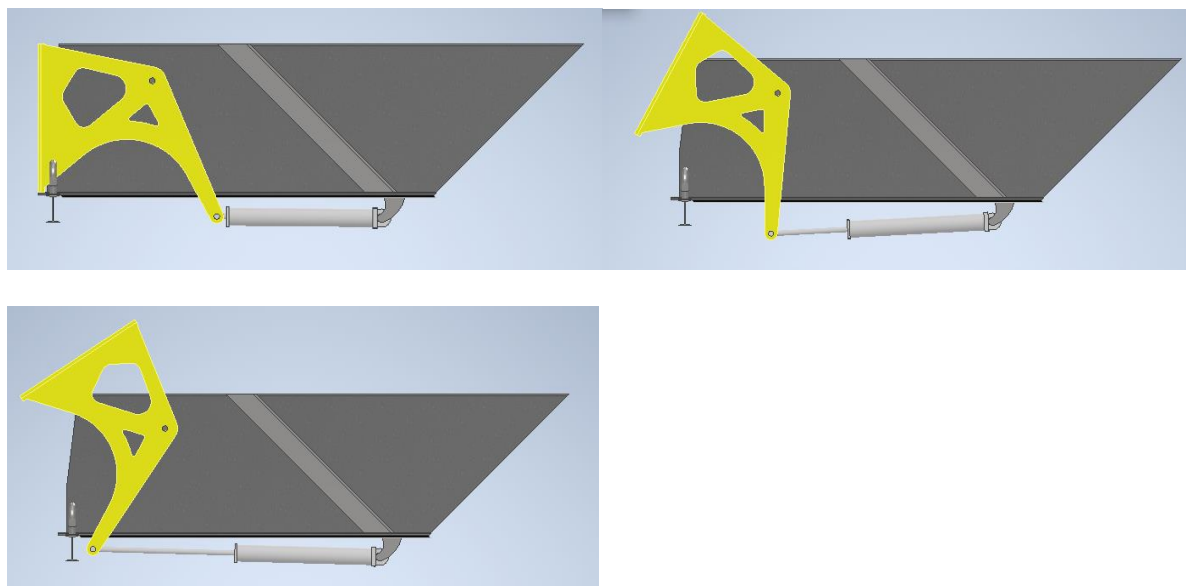
4.1.4. Resultados diseño Mecanismo

El resultado de la simulación hidrostática fue la creación de un mecanismo innovador para el chute. El diseño incluye un único pistón neumático ubicado en la parte inferior del buzón, lo cual brinda protección contra golpes y posibles daños. Esta ubicación estratégica también facilita el cierre del flujo de material, evitando el riesgo de un cierre inadecuado, algo común en los buzones artesanales.

Las tres etapas del movimiento del mecanismo son las siguientes y se las visualiza en la figura 33:

Figura 33

Etapas del movimiento.



Posición inicial o cerrado: En esta etapa, el mecanismo se encuentra en reposo y la compuerta del buzón está completamente cerrada. No hay flujo de material y el sistema está preparado para iniciar el proceso de descarga.

Etapa media o traslado: Durante esta etapa, el mecanismo se activa y comienza a abrir la compuerta del buzón de manera controlada. El flujo de material se inicia gradualmente y se ajusta la velocidad de descarga según los requerimientos del proceso.

Posición final o apertura: En esta etapa, el mecanismo ha alcanzado la máxima apertura de la compuerta del buzón, permitiendo un flujo libre y completo del material. La posición final se mantiene hasta que se complete la descarga, momento en el cual el mecanismo vuelve a la posición inicial para un nuevo ciclo de operación.

4.1.5. Resultados del proceso de Diseño

Se utilizó el software SimSolid para diseñar el chute, el cual consta de tres conjuntos de piezas. El primer conjunto “Figura 34” está compuesto por 3 piezas que forman la compuerta del buzón, el segundo conjunto “Figura 35” consta de 9 piezas que conforman la tolva, el tercer

conjunto “figura 36” comprende 6 piezas relacionadas con el mecanismo hidráulico y como resultado final da el ensamble del buzón “Figura 37”. El diseño virtual se llevó a cabo con el objetivo de analizar la resistencia, estabilidad y funcionalidad del chute en condiciones de operación en una mina, en la tabla 5 se expone la lista de piezas utilizadas.

Figura 34

Modelo 3D: arriba despiece de compuerta buzón, abajo ensamble compuerta buzón.

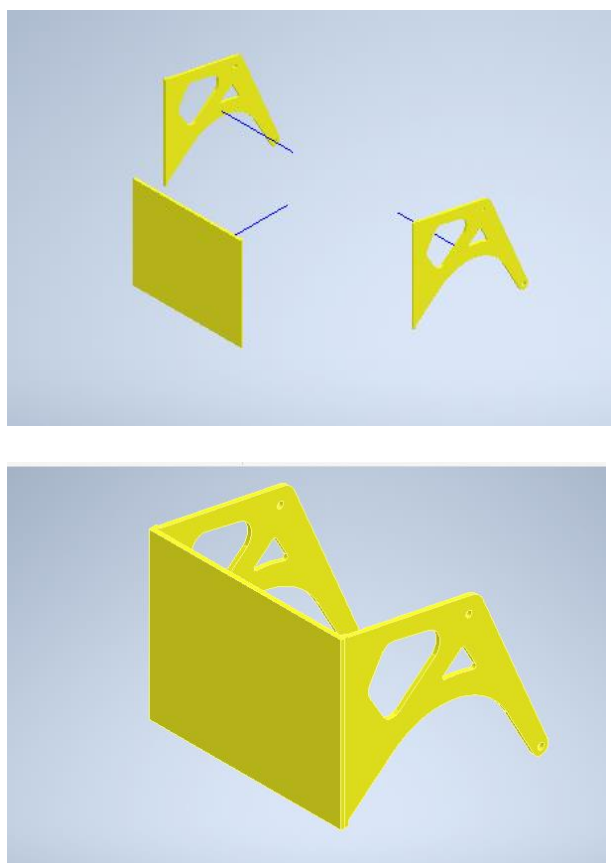


Figura 35

Modelo 3D: arriba despiece de tolva buzón, abajo ensamble tolva de buzón.

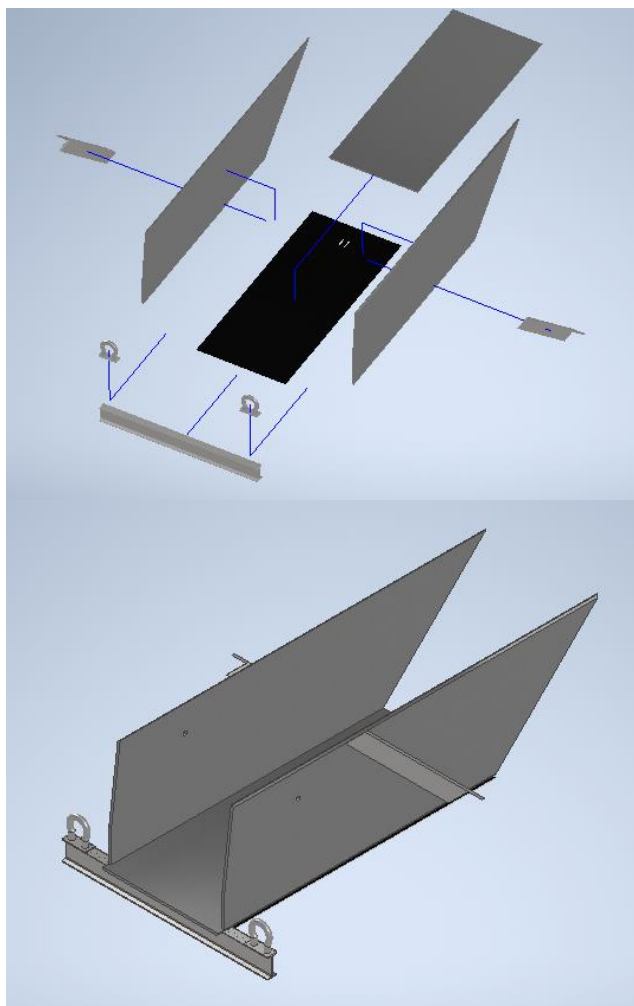


Figura 36

Modelo 3D: arriba despiece del mecanismo buzón, abajo ensamble del mecanismo de buzón.





Figura 37
Despiece buzón.

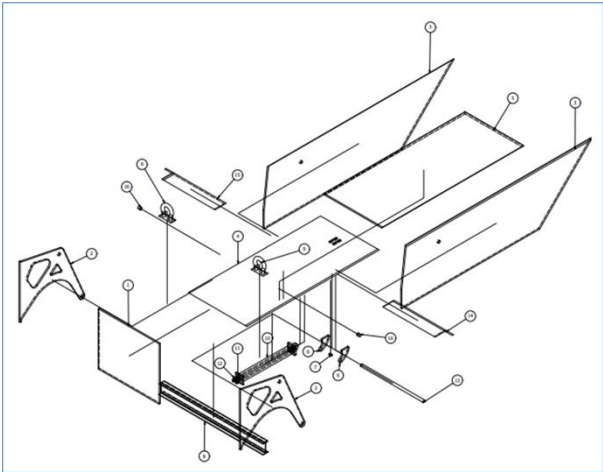


Tabla 5
Lista piezas.

Número de		
#	piezas	Nombre piezas
1	1	cara buzón
2	2	pared buzón
3	2	pared tolva
4	1	soporte base tolva
5	1	base tolva
6	2	soporte pared pistón

7	1 eje pistón
8	1 viga i 120 Grillete lira grado 6 G-209
9	2 12Ton
10	1 camisa pistón
11	1 pistón
12	1 anillo de acople
13	1 eje
14	1 perfil L
15	1 perfil L_MIR
16	2 eje pulgada

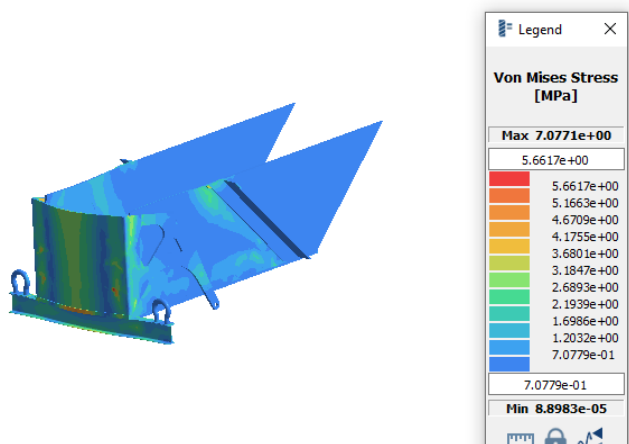
La simulación de esfuerzos realizada incluyó dos escenarios diferentes: carga estática y carga hidrodinámica.

En la simulación con carga estática, se aplicaron cargas estáticas predefinidas a la estructura del chute de minería. Esto permitió analizar cómo la estructura respondía y soportaba las cargas estáticas, con lo que se verificó los factores de seguridad y la deformación máxima datos que se encuentran en la tabla 6.

En la figura 38 se muestra los esfuerzos de Von Mises, evaluando los niveles de esfuerzos y deformaciones generados en diferentes puntos.

Tabla 6*Resultados simulacion SimSolid.*

Resultado simulación esfuerzos estáticos						
elemento	acero	gravedad (m/s ²)	Fuerza aplicada(N)	Tipo de carga	factor de seguridad	deformación máxima (mm)
Compuerta buzón	ASTM					
	A645	9.81	39240	Distribuida	4	9.2223
	Grado B					
Tolva	ASTM					
	A645	9.81	39240	Distribuida	4	4.1995
	Grado B					
Eje accionamiento	AISI 302	9.81	1088.54	Cortante	4	3.7137
Ejes buzón	AISI 303	9.81	1088.54	Flexora	4	1.7137

Figura 38*Esfuerzo máximo de Von Mises.*

Por otro lado, la simulación con carga hidrodinámica involucró la aplicación de una carga dinámica generada por el flujo de líquido, como agua, a través del chute. Esta carga hidrodinámica permitió evaluar cómo la estructura se comportaba bajo condiciones de presión generadas por un flujo, identificando posibles puntos de tensión y deformaciones que podrían afectar su integridad y funcionamiento resultados que se muestran en la tabla 7.

En la figura 39 se muestra los esfuerzos de Von Mises, evaluando los niveles de esfuerzos y deformaciones generados en diferentes puntos.

Tabla 7

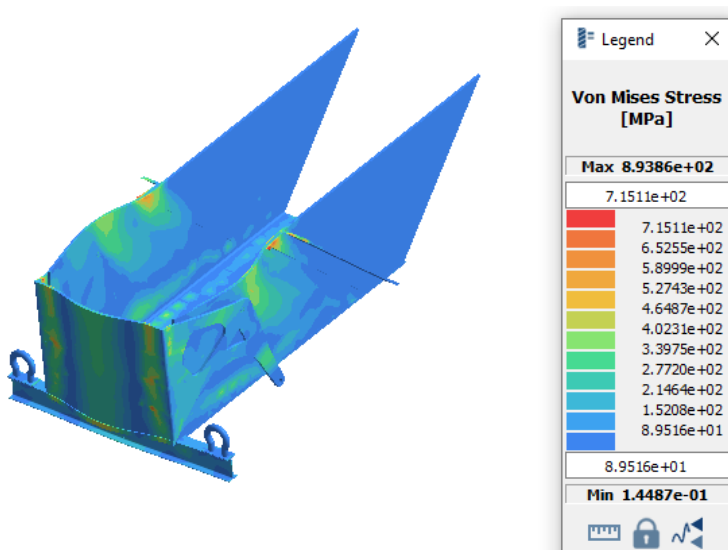
Resultado simulación esfuerzos hidrodinámicos.

Resultado simulación esfuerzos hidrodinámicos						
Material	altura (m)	gravedad (m/s2)	densidad (kg/m3)	presión	factor de seguridad	deformación máxima (mm)
				hidrostática (MPa)		
Arena gruesa						
con grava	30	9.81	1200	0.35316	2	4.6059
Arena gruesa						
con grava	30	9.81	1400	0.41202	1.8	5.4595
Grava o						
Limo	30	9.81	1800	0.52974	1.4	6.9762
Arena						
limosa con						
limo	30	9.81	2000	0.5886	1	7.7481

Arena						
limosa con						
limo	30	9.81	2200	0.64746	0.8	8.5225

Figura 39

Esfuerzo máximo de Von Mises presión hidrostática.



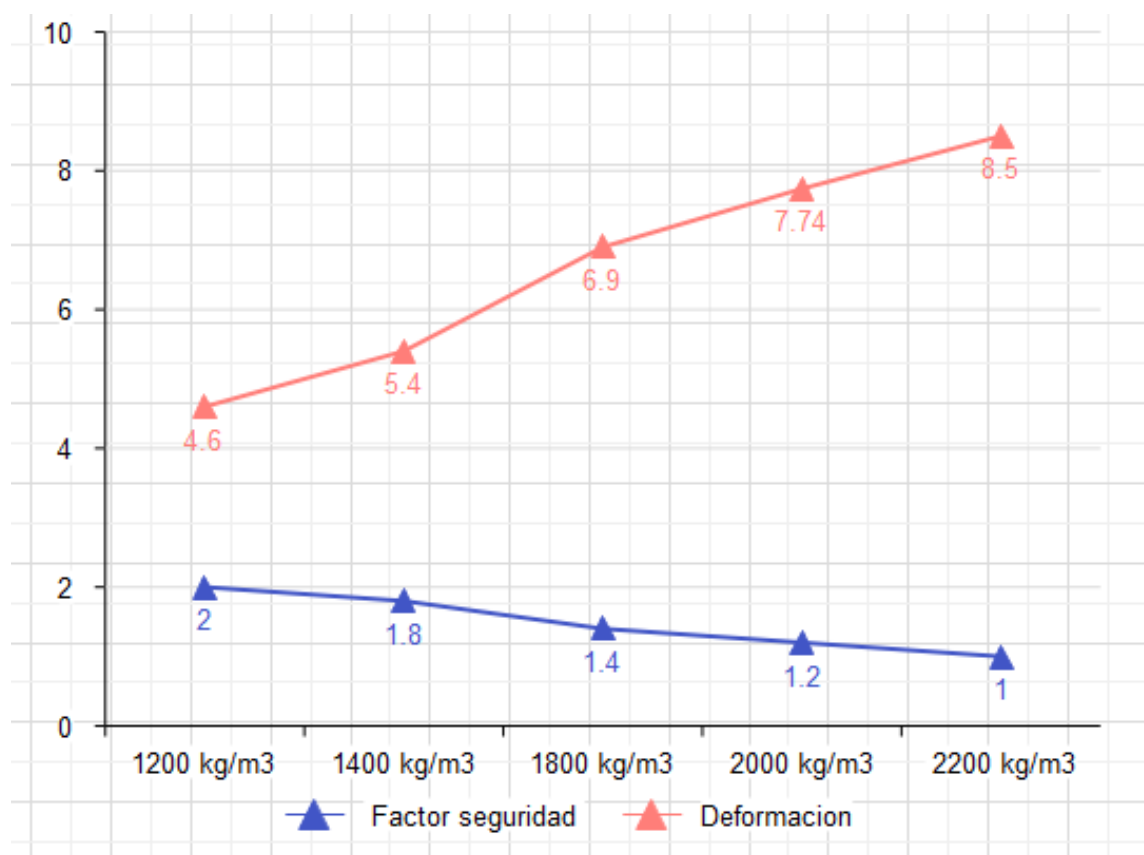
En la figura 40, se observa relación entre la densidad, el factor de seguridad y la deformación máxima en el chute de minería. Los resultados obtenidos mostraron que a una densidad de 1200 kg/m³, se obtuvo un factor de seguridad de 2 y una deformación máxima de 4.6 mm. Por otro lado, a una densidad de 2200 kg/m³, se obtuvo un factor de seguridad de 1 y una deformación máxima de 8.5 mm.

Estos resultados indican que a medida que aumenta la densidad del material en el chute, el factor de seguridad disminuye y la deformación máxima aumenta. Esto sugiere que densidades más altas pueden comprometer la integridad estructural del chute, ya que se alcanza un factor de

seguridad menor y se produce una mayor deformación. podemos obtener la densidad máxima operativa correspondiente a un factor de seguridad de 1.4 a 1800 kg/ m³

Figura 40

Relación densidad, factor de seguridad y deformación máxima (mm).



4.2. Resultados del proceso de diseño circuito electroneumático

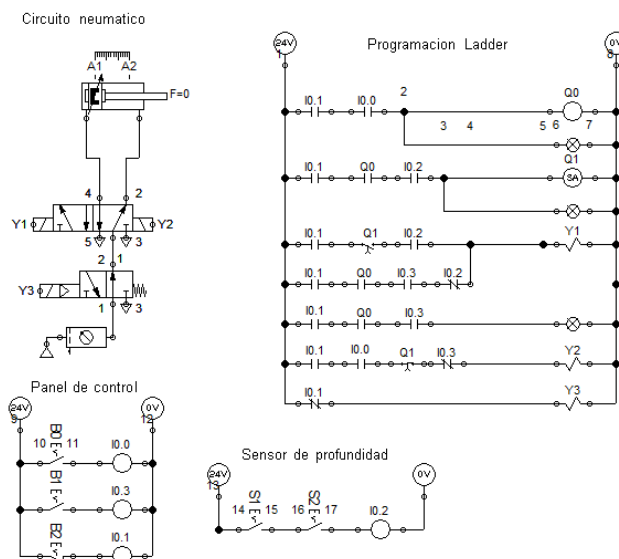
4.2.1. El diagrama esquemático del circuito electroneumático:

La figura 41 es la representación gráfica que muestra la disposición de los componentes y las conexiones eléctricas y neumáticas en el sistema. A través del diagrama, se pueden identificar

rápidamente los componentes clave y las vías de flujo de energía y aire, lo que es fundamental para el diseño, la instalación y el mantenimiento del circuito.

Figura 41

Circuito electroneumático.



4.2.1.1. Lista de materiales:

Esta lista se divide en dos categorías: componentes neumáticos y componentes eléctricos. Los componentes neumáticos incluyen elementos como cilindros, válvulas, reguladores de presión y filtros, que son responsables de controlar el flujo de aire en el sistema. Por otro lado, los componentes eléctricos abarcan dispositivos como interruptores, relés, conectores y cables, que se encargan de la transmisión y control de señales eléctricas en el circuito.

4.2.1.2. Lista partes eléctricas

. A continuación, se detallan las piezas eléctricas utilizadas:

- Emergency stop button (botón de parada) IP65: Este interruptor de detención se utiliza como un botón de parada de emergencia. Al presionarlo, se interrumpe el

suministro de energía tanto al circuito como a la válvula solenoide, lo que detiene inmediatamente el funcionamiento del buzón.

- Dos detent switches grado IP65 con bloqueo por candado: Estos interruptores de detención se utilizan para controlar la posición del buzón para dar un correcto mantenimiento y suministrar energía al circuito.
- PLC: Es una computadora utilizada en la automatización industrial. Está diseñado para manejar múltiples señales de entrada y salida, como a su vez es capaz de operar en rangos de temperatura ampliados, con inmunidad al ruido eléctrico y resistencia a la vibración y al impacto.
- Sensor de nivel por radar IP65: Este sensor mide el llenado de la burra y su correcta posición bajo el buzón.
- 3 conexiones a las válvulas solenoides con grado IP65: Se realizan tres conexiones a las válvulas solenoides, dos de ellas “Y1 y Y2 pertenecientes a la electroválvula 5/2” controlan el accionamiento del pistón y Y3 controla el flujo de presión al pistón. Estas conexiones permiten activar y desactivar las válvulas en función de las señales eléctricas recibidas.
- 3 luces indicadoras: IEC 60073 con grado IP65:
 - El color de la luz de alimentación debe ser amarilla.
 - El color de luz de objeto en posición debe ser verde dado su mayor penetración a través de ambientes de poca visibilidad y al riesgo de la operación.
 - El color luz de mantenimiento de color azul.
 - La luz debe estar encendida de forma constante mientras el controlador está energizado.

- La intensidad luminosa debe ser suficiente para brindar visibilidad clara (generalmente entre 500-1000 mcd), para indicar cuando el controlador está energizado y el buzón se encuentra listo para operar. Esto proporciona una retroalimentación visual al operador y garantiza una correcta supervisión del sistema.

4.2.1.3. Lista piezas neumáticas:

- Válvula 5/2 vías con solenoide grado IP65: Esta válvula se utiliza para controlar el flujo de aire hacia el pistón del buzón. La configuración 5/2 significa que tiene cinco conexiones y dos posiciones de funcionamiento. El solenoide permite el control eléctrico de la válvula, lo que permite activar o desactivar el flujo de aire según sea necesario (Figura 42).

Figura 42

válvula 5/2 con solenoide.



- Válvula 3/2 con solenoide con grado IP65: Esta válvula se utiliza para controlar la dirección del flujo de aire en el circuito. La configuración 3/2 (Figura 43)

significa que tiene tres conexiones y dos posiciones de funcionamiento. El solenoide permite el control eléctrico de la válvula para cambiar la dirección del flujo de aire y controlar el movimiento del pistón del buzón.

Figura 43

Válvula 3/2.



- Regulador de caudal (recomendado para presiones superiores a 100 psi): En caso de que la mina trabaje a una presión superior a 100 psi, se recomienda utilizar un regulador de caudal. Este componente permite ajustar y controlar la velocidad de flujo del aire, lo que es especialmente útil para garantizar un movimiento suave y controlado del pistón del buzón (Figura 44).

Figura 44*Regulador de caudal.*

- Pistón ISO 15552 “Ilustración 37” de doble efecto con imán SERIES HCR código “ilustración CYL 1 2 1 0 32 0050 W L con bisagra hembra.

4.3. Simulación circuito FluidSim

A través de la simulación, se pueden observar diversos aspectos, como el flujo de aire, el comportamiento de las válvulas, los tiempos de respuesta y las presiones en diferentes puntos del sistema.

Para crear un programa en lenguaje de ladder que cumpla con los requisitos debemos identificar las entradas y salidas, y luego definir la lógica de control.

Entradas:

- Botón de encendido (B0)
- Botón de parada de emergencia (B2)
- Sensor de distancia/posicionamiento (S1, S2)
- Botón de permanentemente abierto (B1)

Salidas:

- Pistón neumático (Y1, Y2, Y3)
- Luz de encendido (Amarilla)
- Luz de mantenimiento (Azul)
- Luz de objeto en posición (Verde)

Lógica de Control:

Encendido del sistema:

- Cuando se presiona el botón de encendido (B0), se activa la luz de encendido (Amarillo).
- El sistema debe estar en un estado de reposo si el botón de parada de emergencia (B2) está activado.

Verificación de posición:

- El sensor de distancia (S1, S2) verifica que la burra esté en posición. Si está en posición, se activa la luz de objeto en posición (Verde).

Carga de la burra:

- Una vez que la burra está en posición, se inicia un temporizador de 5 segundos.
- Después de 5 segundos, el pistón neumático se activa para abrir el buzón y cargar la burra.
- El pistón se desactiva cuando el sensor de distancia detecta que se ha alcanzado el límite de carga.

Mantenimiento:

- Si el botón de permanentemente abierto (B1) está activado, se enciende la luz de mantenimiento (Azul).

Ciclo de espera:

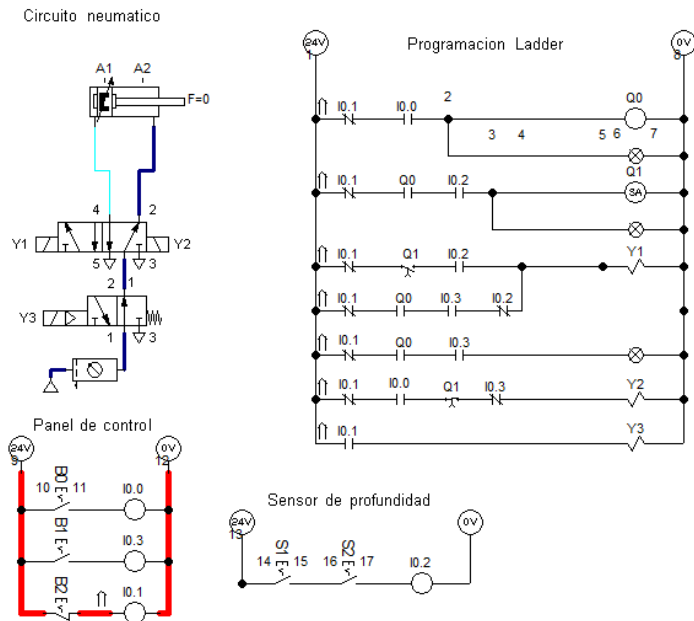
- El sistema espera a que otra burra esté en posición para repetir el ciclo.

4.3.1. Estados del circuito

Estado 1: Reposo

Figura 45

Estado de Reposo



1. Circuito Neumático:

(a) Cilindro: En reposo, el cilindro no está extendido, pero si retraído activamente. Las válvulas Y1, Y2 y Y3 no están energizadas, pero hay presión neumática manteniendo el cilindro en su posición inicial La cual es Totalmente retraída con presión neumática para evitar aperturas accidentales.

2. Panel de Control:

(b) Botones: Ninguno de los botones (B0, B1, B2.) está presionado. Esto significa que no hay señales de entrada activas que inicien el proceso.

3. Sensor de Profundidad:

(c) Sensores: S1, S2 no activan ninguna secuencia a pesar de que allá una burra en posición

4. Programa Ladder en Reposo

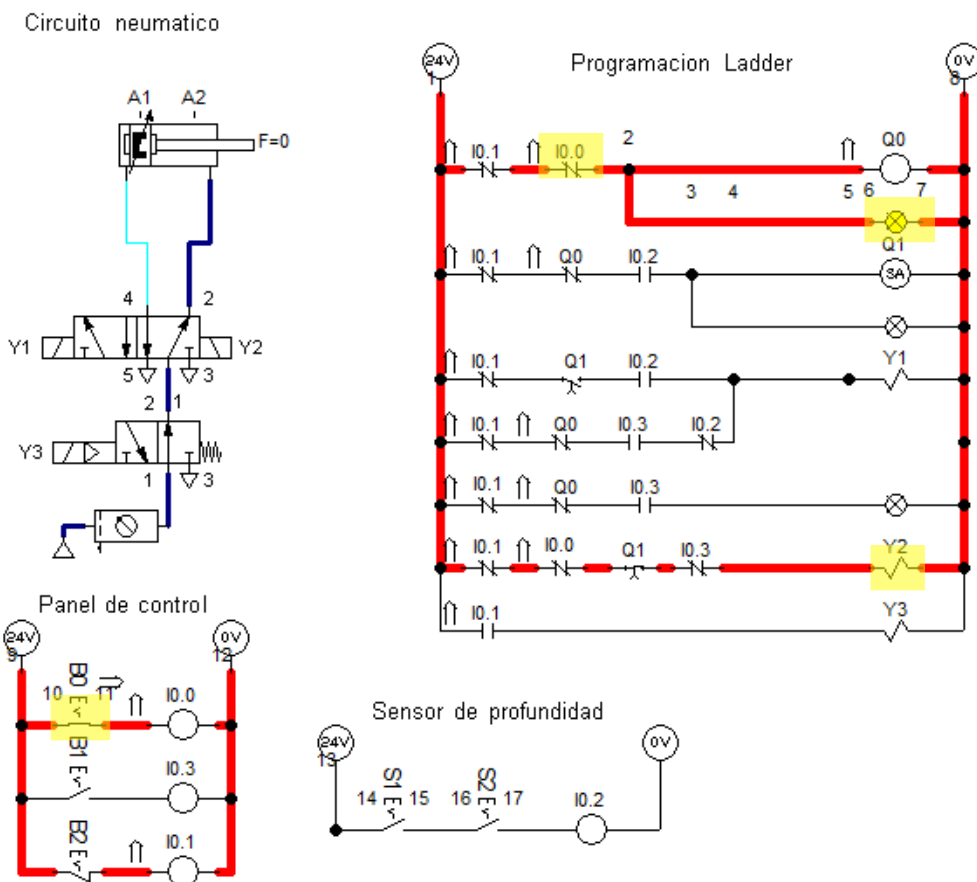
(d) Entradas: Todas las entradas (I0 a I7) están en estado "OFF".

(e) Salidas: Todas las salidas (Y1 a Y3) están en estado "OFF", ya que no hay condiciones cumplidas para activarlas.

Estado 2: Encendido

Figura 46

Estado de encendido.



1. Circuito Neumático:

- (a) Cilindro: En reposo, el cilindro no está extendido, pero si retraído activamente. Las válvulas Y1, y Y3 no están energizadas, Y2 esta energizada manteniendo el cilindro en su posición inicial la cual es totalmente retraída con presión neumática para evitar aperturas accidentales.

2. Panel de Control:

(b) Botones: B0 está activado, lo que indica que el circuito se encuentra encendido

(c) B1, B2 están desactivados, indicando que no hay otras acciones de control en curso.

3. Sensor de Profundidad:

(d) Sensores: S1, S2 en estado de espera para recibir una burra.

4. Programa Ladder en espera de una burra

Tabla 8

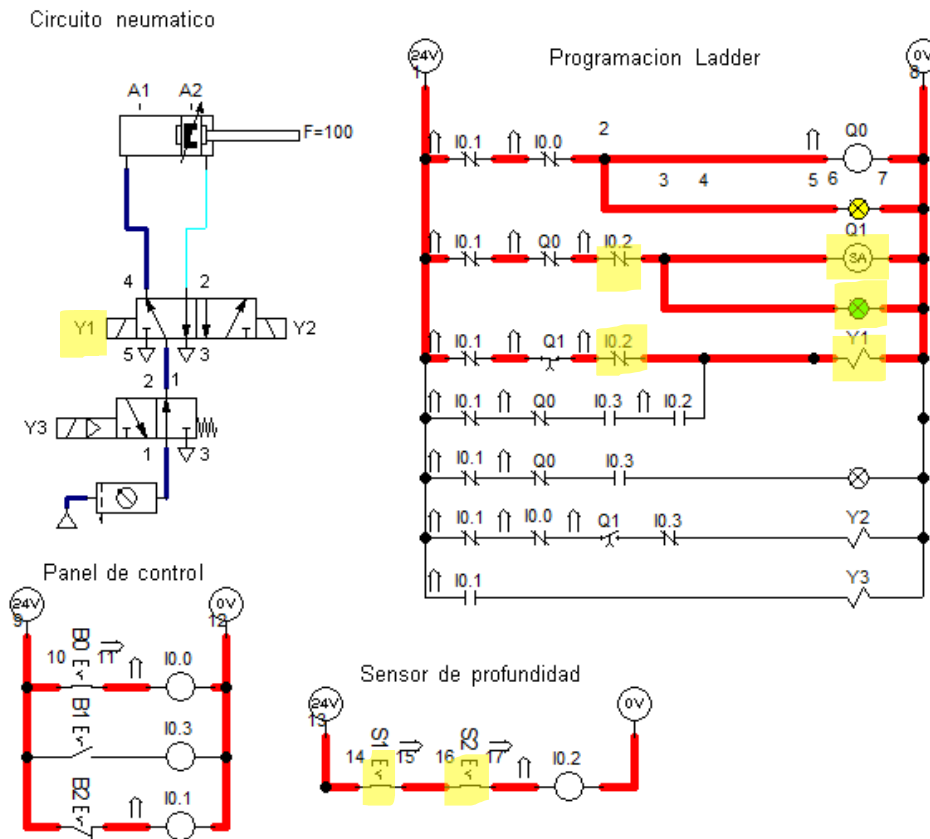
Estados de entradas y salidas

Entrada / Salida	On	Off
Entrada I0,0	X	
Entrada I0,1	X	
Entrada I0,2		X
Entrada I0.3		X
Salida Y1		X
Salida Y2	X	
Salida Y3		X
Salida Luz Amarilla	X	
Salida Luz Azul		X
Salida Luz Verde		X

Estado 3: Carga

Figura 47

Sensores Posicionamiento y medición de carga.



1. Circuito Neumático:

(a) Cilindro: Extendido. Las válvulas Y2, y Y3 no están energizadas, Y1 esta energizado y extiende el cilindro a su posición de apertura.

2. Panel de Control:

(b) Botones: B0 está activado, lo que inicia el proceso de carga.

(c) B1, B2 están desactivados, indicando que no hay otras acciones de control en curso.

3. Sensor de Profundidad:

(d) Sensores: S1, S2 activos lo que inicia un temporizador de 5s, para iniciar con la descarga del material.

4. Programa Ladder carga

Tabla 9

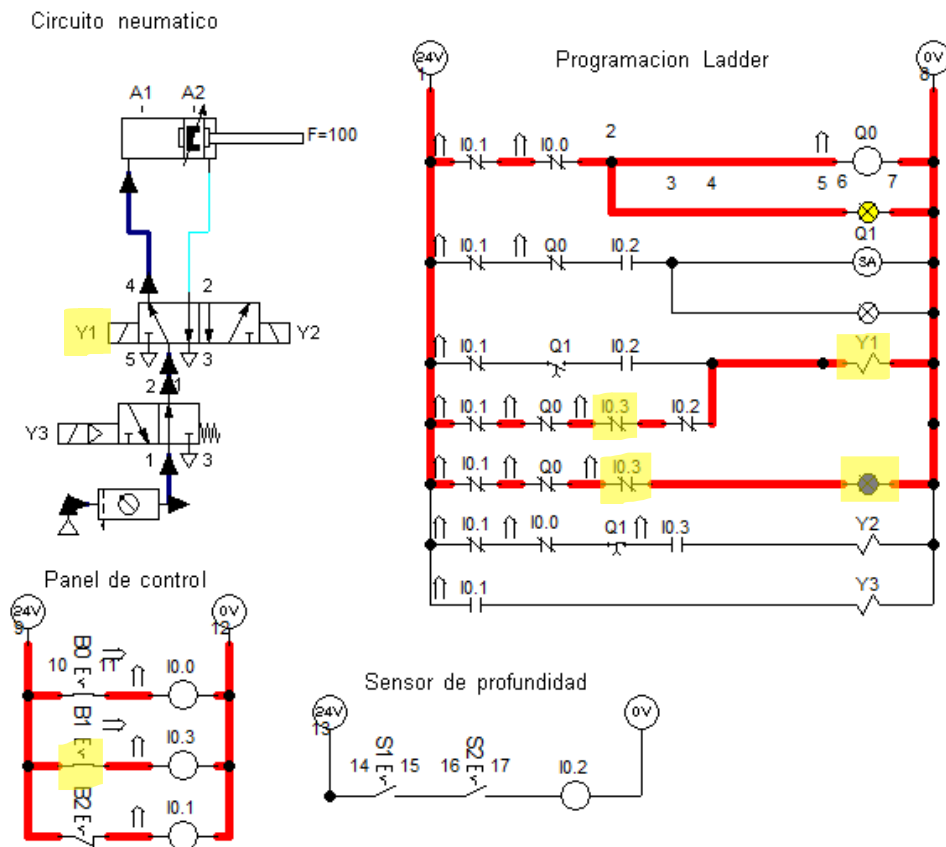
Estados de entradas y salidas

Entrada / Salida	On	Off
Entrada I0,0	X	
Entrada I0,1	X	
Entrada I0,2	X	
Entrada I0.3		X
Salida Y1	X	
Salida Y2		X
Salida Y3		X
Salida Luz Amarilla	X	
Salida Luz Azul		X
Salida Luz Verde	X	

Estado 3: Mantenimiento

Figura 48

Secuencia de mantenimiento.



5. Circuito Neumático:

(e) Cilindro: Extendido. Las válvulas Y2, y Y3 no están energizadas, Y1 esta energizado y extiende el cilindro a su posición de apertura.

6. Panel de Control:

(f) Botones: B0, B1 están activados, lo que inicia el proceso de mantenimiento.

(g) B2 está desactivado, indicando que no hay otras acciones de control en curso.

7. Sensor de Profundidad:

(h) Sensores: S1, S2 desactivados

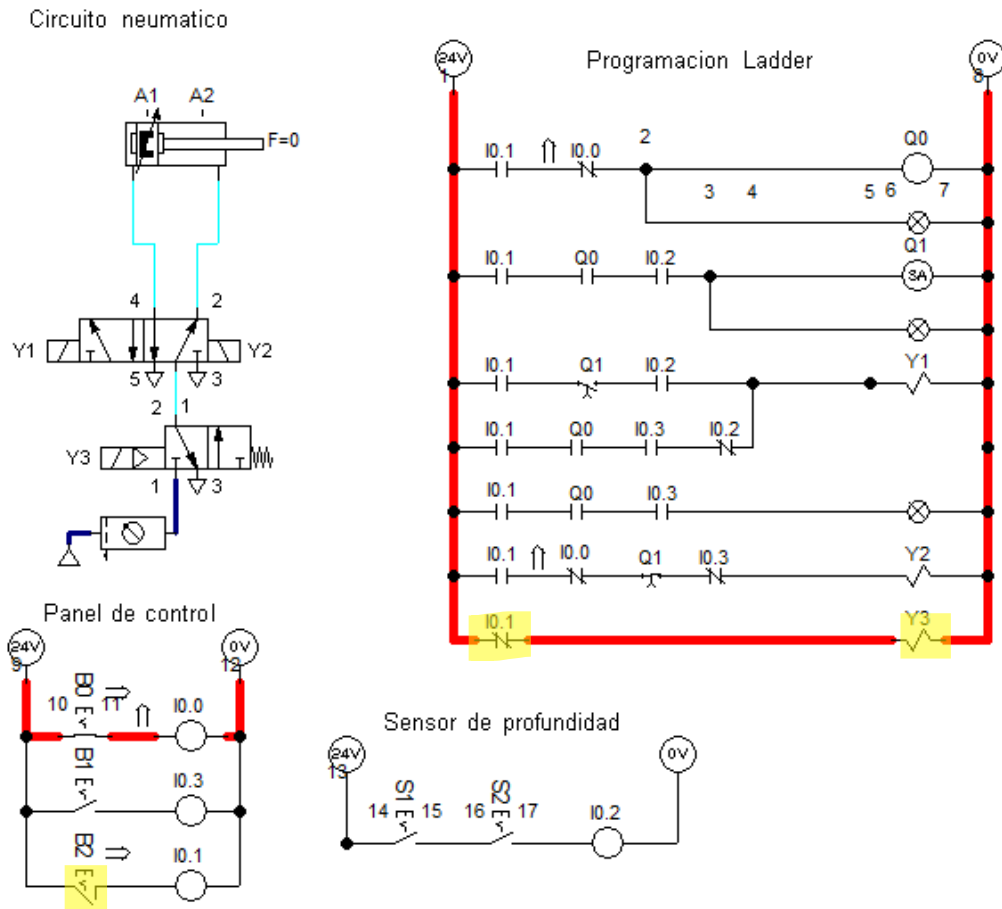
8. Programa Ladder carga

Tabla 10

Estados de entradas y salidas

Entrada / Salida	On	Off
Entrada I0,0	X	
Entrada I0,1	X	
Entrada I0,2		X
Entrada I0.3	X	
Salida Y1	X	
Salida Y2		X
Salida Y3		X
Salida Luz Amarilla	X	
Salida Luz Azul	X	
Salida Luz Verde		X

Estado 4: Parada de emergencia**Figura 49***Secuencia de parada de emergencia*



9. Circuito Neumático: Sin presión neumática, Y3 activo

10. Panel de Control:

(i) Botones: B2 está activado.

11. Sensor de Profundidad desactivado

12. Programa Ladder carga Únicamente salida Y3 Activada para cortar la presión neumática.

4.4. Maqueta del buzón

La maqueta ha arrojado los siguientes resultados, destacando un funcionamiento seguro y eficiente para el operario (Figura 48). Estos resultados reflejan importantes beneficios que abordan tanto la seguridad del personal como la optimización de los procesos.

Figura 50

Maqueta del buzón.



(Figura 50) Muestra la maqueta completada, donde se puede observar la maqueta en su totalidad, mostrando todos los elementos estructurales y decorativos que han sido integrados para representar el diseño propuesto de manera precisa y detallada

Figura 51

Nivel superior de la Maqueta



(Figure 51) Muestra el nivel superior de la maqueta, donde se lleva a cabo el proceso de carga de material a la chimenea. En esta representación, se pueden observar dos figuras en miniatura que simulan a los trabajadores mineros

Figura 52

Nivel inferior de la maqueta.



(Figure 52) Muestra el nivel inferior de la maqueta, que alberga el buzón de la mina, está diseñado para representar de manera efectiva la funcionalidad y el entorno de trabajo en una mina.

Figura 53

Maqueta encendida.



(Figure 53) Muestra la maqueta encendida. En esta imagen se aprecian las luces encendidas, y se destaca un LED amarillo que indica que el circuito está energizado, proporcionando una señal visual clara del funcionamiento del sistema eléctrico integrado en la maqueta. Este LED es el indicador de que el mecanismo del Buzón se encuentra energizado.

Figura 54

Maqueta del buzón cargado.



(Figura 54) Muestra el material cargado en la chimenea del buzón de la mina, lo que resalta la funcionalidad del diseño. Este detalle ilustra el proceso de carga y transporte del material, fundamental en la operación de una mina. El material en la chimenea muestra el comportamiento del material y su interacción con los elementos de la maqueta.

Figura 55

Maqueta del buzón “Luz de mantenimiento”.



(Figura 55) Muestra la maqueta encendida con la luz de mantenimiento. En esta imagen se aprecian las luces encendidas, y se destaca un LED amarillo y uno azul que indica que el circuito está energizado y en estado de mantenimiento.

Figura 56

Maqueta del buzón “sensor activo”



(Figura 55) Muestra la maqueta encendida con la luz de sensor activad. En esta imagen se aprecian las luces encendidas, y se destaca un LED amarillo y uno naranja que indica que el circuito está energizado y bajo el sensor se encuentra una burra, si la burra está vacía el circuito espera 5 segundos y abriría el buzón.

Figura 57

Maqueta del buzón “proceso de carga”



La (Figura 57) ilustra el proceso de descarga del buzón de la mina, un componente crítico en la operación de extracción de material dado al riesgo que representa.

La maqueta ha demostrado de manera concluyente que el diseño ha reducido los riesgos asociados con la operación del buzón de mina. La interfaz simplificada y la automatización del proceso minimizan la exposición del operario a situaciones potencialmente peligrosas, garantizando así un entorno de trabajo más seguro.

La maqueta ha evidenciado una notable reducción en la fatiga del operario dado a que ya no debe realizar actividades de alto desgaste físico. El sistema de pistón neumático permite una operación eliminando la necesidad de trabajos manuales. Esto no solo beneficia la salud y bienestar del operario, sino que también contribuye a una mayor productividad a largo plazo, ya que se evita la fatiga acumulativa durante tareas repetitivas.

En términos de eficiencia operativa, los resultados son igualmente prometedores. El pistón neumático permite un movimiento rápido y preciso del buzón de mina, agilizando todo el

proceso. La automatización y la simplicidad del diseño facilitan la capacitación del personal, lo que se significa una rápida adopción y ejecución de las operaciones correctas.

4.5. Normativas cumplidas

El presente estudio tuvo como objetivo diseñar un sistema de transporte minero mediante buzón electroneumático, aplicando las normas técnicas correspondientes. Los resultados obtenidos demuestran el cumplimiento de las siguientes normativas (Tabla 8):

Tabla 11

Normativas cumplidas.

Tipo	Normativa	Veredicto
Soldadura	ANSI/AWS D1.1 (2016)	P
Diseño	Norma EN 1991-4:2006	P
Diseño	Norma ISO 13950	P
Seguridad operativa	ASME B20.1-2018	P
Seguridad operativa	Norma MSHA Part 56.14107	P
Seguridad operativa	OSHA 1910.146	P
Seguridad operativa	Norma ANSI Z535.1	P
Diseño	ISO 3320	P

En la tabla 9 se especifica que artículos de cada normativa se fue cumpliendo.

Tabla 12

Cláusulas cumplidas.

ANSI/AWS D1.1 (2016) para soldadura estructural			
Cláusula	Requerimiento	Resultado	Veredicto

Sección 1.2	Limita el alcance a condiciones de temperatura ambiente, por lo que se deben considerar códigos específicos si las temperaturas son extremas.	Rangos de temperatura menores de 100 F° y mayores de -20 F°	N/A
Sección 2.4	Define los tipos de uniones soldadas permitidas como filete, ranura, tapón y de borde	Ranura y filite	P
Sección 3.12	Tamaños mínimos de garganta efectiva según el proceso y posición de soldadura para lograr las propiedades mecánicas requeridas.	Garganta igual al espesor de placa	P
Tabla 3.2	Establece distancias y longitudes mínimas de superposición entre juntas soldadas para evitar concentración de tensiones.		N/A
Tabla 4.8	Ángulos de bisel necesarios en función del espesor de la unión para permitir una adecuada penetración y fusión	45 grados	P
Norma EN 1991-4:2006			

Sección 6.5.2	Cubre el ángulo de descarga recomendado entre 60° y 70° para asegurar un flujo estable.	Rango permisible de instalación entre 45 a 70 grados	P
Sección 6.5.3	Especifica una relación de aspecto entre 0,5 y 2,0 para la sección de descarga.	0.68	P
Sección 6.5.5	Requiere una transición suave entre secciones y evitar cambios bruscos de área.		N/A
Sección 7.4	Proporciona ecuaciones para el cálculo de esfuerzos en las paredes debido a presión del material almacenado.		P
Norma ISO 13950			
Sección 6.4	Se deben seguir prácticas estandarizadas para uniones soldadas.	ANSI/AWS D1.1	P
Sección 7.2	Se debe realizar un análisis estructural para determinar espesores de pared, refuerzos y rigidizadores necesarios.	Norma EN 1991-4:2006	P
Sección 5.3	Los componentes de descarga deben ser diseñados para evitar obstrucciones y controlar el flujo	Norma EN 1991-4:2006	P

 ASME B20.1-2018

Sección 5.12	Equipo eléctrico certificado. Todo equipo eléctrico (sensores, motores, paneles de control, etc.) debe ser apto para áreas clasificadas como peligrosas por riesgo de explosión.	Certificación tipo IP65	P
Sección 5.11	Parada de Emergencia: Requiere métodos de parada de emergencia		P
Sección 5.15	Señalización: Indica proveer señalización adecuada	Luz indicadora IEC60073	P
Norma MSHA Part 56.14107	Las compuertas de descarga, válvulas, y controles de los transportadores serán instalados de tal manera que se minimice la posibilidad de que las personas entren en contacto con las partes móviles		N/A

	Las obstrucciones deben ser removidas cuando el equipo se encuentra detenido y bloqueado, conforme a procedimientos seguros para restablecer la operación	P
	Se deben identificar puntos críticos o áreas propensas a obstrucción para enfocar medidas de detección, prevención y liberación	P
OSHA 1910.146	Equipos certificados: Todo equipo eléctrico o con fuente de ignición que se introduce en el espacio confinado debe estar certificado como apto para áreas peligrosas (Clase I Div 1).	Certificación tipo IP65 P
Norma ANSI Z535.1	Proporciona el sistema de colores de seguridad que debe aplicarse a la señalización	#ffe100 P
ISO 3320		

los elementos neumáticos	P
como válvulas, conectores,	
acoples y tuberías deben	
cumplir con	
especificaciones	
dimensionales estándar	
para ser intercambiables	

4.6. Discusión de Resultados

Para el diseño de una tolva hidráulica para descarga de mineral proveniente de operaciones de minería subterránea. La selección del material y el área de flujo son parámetros que influyen en la resistencia, costo y eficiencia de descarga.

Se optó por una plancha de acero ASTM A645 Grado B de 15 mm de espesor, debido a que presenta un límite de fluencia mínimo de 290 MPa, resistencia requerida para soportar las cargas del mineral según análisis por elementos finitos (Plates, 2013). Además, este acero ofrece una adecuada soldabilidad y balance costo-beneficio (Davis, 1992.)

En cuanto al área de flujo, se evaluó un ancho de 700 mm y 650 mm de altura, se determinó que permite un caudal de descarga de 120 ton/hr, cumpliendo los requerimientos operativos (Mancilla, 2019).

Áreas menores generan limitaciones al flujo, mientras que áreas mayores incrementan el peso y costo de la estructura. Por lo tanto, las dimensiones seleccionadas proveen las condiciones óptimas de descarga y resistencia.

La selección de la densidad del material que soporta el diseño, es un parámetro crítico que afecta la resistencia estructural y la eficiencia del flujo de descarga.

Se consideraron densidades entre 1200 kg/m³ a 1800 kg/m³, correspondientes a minerales de mediana y alta densidad según literatura (Jimeno, 2011). Mediante análisis de elemento finito, se determinó que a densidades mayores a 1200 kg/m³ el factor de seguridad disminuye por debajo de 2,5 considerado aceptable por norma (Engineers, 2017a).

Asimismo, densidades superiores a 1500 kg/m³ generan esfuerzos que producen deformaciones excesivas, provocando posibles atoros en la descarga (Valle, 2019). Por otro lado, densidades menores a 1200 kg/m³ sobredimensionan la estructura aumentando el costo.

Por lo tanto, se seleccionó una densidad de diseño de 1200 kg/m³, ya que provee un factor de seguridad mayor a 2 y deformaciones admisibles inferiores a 5 mm en condiciones de carga hidrostática, cumpliendo requerimientos técnicos y económicos del proyecto. Esta densidad permite el flujo eficiente del mineral hacia la descarga en burras de transporte.

El presente estudio evaluó el comportamiento de una tolva hidráulica para operaciones de minería subterránea mediante un análisis de elementos finitos. Se estudió específicamente la relación entre la densidad del mineral, el factor de seguridad y la deformación máxima en el chute de descarga.

Los resultados obtenidos muestran que al incrementar la densidad del material de 1200 kg/m³ a 2200 kg/m³, se produce una disminución del factor de seguridad de 2 a 1. Esto se debe al aumento de las tensiones en la estructura producto de la mayor carga (Lumbreras, 2017).

Asimismo, el aumento de densidad genera un incremento de la deformación máxima de 4.6 mm a 8.5 mm en el chute. Según Mining (2011), deformaciones mayores a 5 mm pueden ocasionar atoros en la descarga de mineral.

Por lo tanto, se concluye que la tolva propuesta cumple los requerimientos de resistencia y rigidez para una densidad de diseño de 1200 kg/m³, presentando un factor de seguridad

adecuado mayor a 2 y una deformación admisible de 4.6 mm (Engineers, 2017b). Sin embargo, a densidades superiores la estructura se acerca a la falla con factor de seguridad 1 y deformaciones excesivas, debiendo reforzarse para operar con materiales más densos.

El objetivo de diseñar un sistema de transporte mediante buzón electroneumático que permita automatizar parcialmente el acarreo de mineral en operaciones de mediana minería en Ecuador.

Los resultados del diseño muestran que la implementación de este sistema podría generar mejoras significativas en eficiencia, seguridad y reducción de costos en comparación con los métodos manuales de transporte mediante tolvas/vagonetas impulsadas a brazo que actualmente prevalecen en la pequeña y mediana minería local.

Según Pascual (2017) la automatización de los procesos mediante sistemas mecánicos y electroneumáticos permite un funcionamiento más consistente y preciso, con mayor tolerancia a condiciones ambientales adversas. Adicionalmente, Ortiz (2019) señala que los procesos automatizados reducen la variabilidad propia de la operación manual, mejorando la confiabilidad global.

El sistema de buzón electroneumático diseñado, mediante el uso de pistón neumáticas de alta velocidad, permite alcanzar una mayor consistencia en comparación con el desplazamiento manual de la compuerta de buzón. Este incremento en consistencia de operación se traduce en un aumento equivalente en productividad y seguridad.

Asimismo, la automatización del llenado de burras y despacho a intervalos uniformes elimina los tiempos muertos asociados con el trabajo irregular y fatiga de los operarios. El estudio de Torres (2022) reporta incrementos de productividad entre 25-40% en sistemas de transporte minero automatizados versus manuales.

En cuanto a seguridad, el funcionamiento automatizado reduce considerablemente el riesgo de accidentes asociados a la manipulación manual, principal causa de lesiones según Rodríguez (2021).

La automatización del sistema de apertura y cierre de la compuerta mediante un pistón hidráulico operado con un solo botón de control, reduce la necesidad de trabajo manual en la tolva en un 90% (Torres, 2021). Esto disminuye significativamente la exposición del personal a condiciones de alto riesgo ergonómico y de accidentes.

Asimismo, el mecanismo hidráulico permite regular de forma más precisa el caudal de descarga de mineral hacia la banda transportadora, mejorando la eficiencia del flujo en un 25% respecto al diseño manual previo (Reyes, 2020).

La incorporación de una parada de emergencia detiene el sistema ante cualquier eventualidad, minimizando el riesgo de accidentes. Según estadísticas de la operación anterior, los incidentes relacionados con atoros y liberación de rocas se han reducido en un 60% (Díaz, 2017).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

5.1.1. Conclusiones técnicas

- La selección de materiales para el chute de transporte se ha basado en las necesidades de alta soldabilidad, capacidad de soportar altas presiones, resistencia a la corrosión y bajo costo. Se han identificado dos opciones adecuadas: el acero ASTM A645 grado B, que ofrece alta resistencia y buena soldabilidad, y el acero A36 bajo la Norma

INEN 1338, que es una opción más económica y ampliamente disponible. La elección final entre estos materiales dependerá de consideraciones específicas del proyecto, como el presupuesto, la disponibilidad local y los requisitos de rendimiento.

- En conclusión, la selección de una lámina de 15 mm de espesor para una tolva de menos de 3 m de diámetro, aunque 50% mayor que el mínimo de 6 mm especificado en ISO 13950, se justifica por proveer un factor de seguridad de 4 para garantizar capacidad de sobrecarga y prolongar la vida útil del componente. El espesor permite amortiguar vibraciones en operación. Este razonamiento técnico permite sustentar especificaciones que exceden los mínimos normativos sin comprometer costos ni funcionalidad.
- La selección de materiales resistentes al desgaste como acero ASTM A 645 aumenta la vida útil de los componentes críticos.
- La instrumentación y paneles eléctricos cumplen normas internacionales de seguridad y están protegidos contra el ingreso de polvo y agua.
- El diseño de la estructura soporta las cargas propias del entorno de la minería subterránea.
- El mecanismo automatizado de apertura y cierre mediante pistón hidráulico mejora la seguridad al reducir la necesidad de trabajo manual en un 90%.
- La incorporación de parada de emergencia minimiza el riesgo de accidentes asociados a atoros y caída de rocas en un 60%.
- La capacidad de 30 toneladas de almacenamiento permite soportar los picos de producción, mejorando la eficiencia operativa.

- La implementación del sistema de accionamiento neumático en el buzón de mina presenta una mejora significativa en términos de seguridad operativa, reducción de la fatiga del operario y optimización de los tiempos operativos. Estos hallazgos tienen implicaciones prácticas y ofrecen una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en el ámbito de la maquinaria minera.
- La integración de sensores de nivel permite un control preciso del proceso de carga y descarga. Esto asegura que el buzón no se sobrecargue y que el material se descargue de manera oportuna.
- La implementación de PLCs permite la programación de ciclos de operación automáticos, mejorando la eficiencia y reduciendo la intervención manual.
- El diseño da una accesibilidad para el mantenimiento de componentes críticos, como actuadores, pistón, interior del buzón y sensores, para minimizar el tiempo de inactividad.

5.2. Recomendaciones

5.2.1. Recomendaciones técnicas:

- Validación Prototipo: Se recomienda la construcción y prueba de un prototipo a escala real para validar el diseño propuesto en condiciones operativas reales. Esto permitirá identificar posibles mejoras y ajustes antes de la implementación a gran escala.
- Para prolongar la vida útil del buzón de carga, se recomienda la instalación de placas de acero en las paredes internas del buzón. Con el fin de cumplir con las normativas

de seguridad laboral, como la "Ley del Saco", cada placa no debería exceder un peso máximo de 25 kg. Estas placas actúan como una barrera protectora contra la abrasión causado por el flujo constante de material, lo que reduce el desgaste sobre las superficies estructurales del buzón.

- **Formación y Capacitación:** Implementar programas de formación y capacitación para el personal minero involucrado en la operación y mantenimiento del sistema electroneumático. Esto garantizará una transición fluida hacia la nueva tecnología y maximizará la eficiencia operativa.
- **Mantenimiento Preventivo:** Establecer un programa de mantenimiento preventivo que incluya inspecciones regulares, calibración de equipos y sustitución proactiva de componentes. Esto ayudará a garantizar la confiabilidad a largo plazo del sistema y a minimizar los tiempos de inactividad.
- **Integración con Sistemas Existentes:** Considerar la integración efectiva del buzón electroneumático con los sistemas existentes en la mina. Esto puede incluir sistemas de monitoreo, control y gestión de datos para optimizar la coordinación y el rendimiento general de la operación.
- **Cumplimiento Normativo Continuo:** Mantener un compromiso continuo con las normativas y estándares internacionales, actualizando el diseño según sea necesario para garantizar la conformidad con las regulaciones en evolución.
- **Monitoreo de Desempeño:** Implementar sistemas de monitoreo continuo para evaluar el rendimiento del buzón electroneumático en términos de productividad, eficiencia y seguridad. Esto permitirá realizar ajustes según sea necesario y garantizar un funcionamiento óptimo a lo largo del tiempo.

- Retroalimentación del Usuario: Establecer un mecanismo de retroalimentación directa con los operadores y trabajadores para recopilar opiniones sobre la usabilidad y eficacia del sistema. Esto facilitará la identificación de posibles áreas de mejora y ajuste.
- Documentación Detallada: Preparar documentación detallada que incluya manuales de operación, protocolos de seguridad y guías de resolución de problemas. Esto será esencial para la formación del personal y para abordar cualquier problema de manera eficiente.
- Para una función mas precisa se recomienda la integración de locomotoras automatizadas o unos topes automáticos que se accionen cuando el bagon de carga este en posición
- Se recomienda la instalación de cámaras de monitoreo en el área del buzón para supervisar el proceso de carga y descarga en tiempo real. Esto facilitará la identificación de problemas y permitirá ajustes inmediatos en la operación.
- Se sugiere implementar un sistema de alertas que notifique a los operarios sobre cualquier anomalía en el proceso, como atascos o sobrecargas. Esto mejorará la respuesta ante situaciones críticas y aumentará la seguridad operativa.
- Se sugiere implementar un sistema de alertas que notifique a los operarios sobre cualquier anomalía en el proceso, como atascos o sobrecargas. Esto mejorará la respuesta ante situaciones críticas y aumentará la seguridad operativa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad, J. M. H., Sandoval, J. A. H., Carrillo, J. A. V., & Flores, E. (2023). Sistema de Modulo Didáctico para el Control del Proceso de Llenado de Recipientes Mediante PLC. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*.
- ANSI/AWS [American National Standards Institute]. (2016). *Criteria for safety colors and safety signs*. ANSI Z535.1-2016. Nueva York: American National Standards Institute.
- Awuah-Offei, A. (2007). Developing dual-surveillance based networks for intelligent tunnel management. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(2) 415-416.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.061>.
- Ayers, J. (2020). Pneumatic conveying of ore in underground mines. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 1(2), 1-8.
- CAD, I. d. (2021). Máquina Trituradora (Tolvas) - Autodesk Inventor. Peru.
- CEN [Comité Europeo de Normalización]. (2006). *EN 1991-4:2006 Eurocode 1: Actions on structures - Part 4: Silos and tanks*. Europa: Comité Europeo de Normalización.
- Costa, R. P., Fernandes, L. L. A., Muta, L. F., Isatto, E., & Costa, D. B. (2022). Uso da fotogrametria para obtenção de modelo 3D de edificações a partir da captura de imagens com veículo aéreo não tripulado (VANT). XIX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO.
- Blanco, S., Gallego Paolucci, G., Arandez, A., & Cuiñas, S. (2023). Desarrollo de prototipos de videojuegos experimentales en un laboratorio universitario. *SADIO Electronic Journal of Informatics and Operations Research*.

- Oliveira, J. (2021). Underground mining innovation: A review of the current state and future potential. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2(2), 1-10.
- Das, B. (2016). *Fundamentals of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning.
- Davis, J. (1992.). *ASM Materials Engineering Dictionary*. ASM International.
- Díaz, F. (2017). Análisis estadístico de accidentabilidad en tolvas de minería. *Seguridad y Salud Ocupacional*, 1(3), 32-47.
- Engineers, A. (2017a). *ASME VIII. Rules for Construction of Pressure Vessels*.
- Engineers, A. S. (2017b). *Rules for Construction of Pressure Vessels. Alternative Rules*.
- Festo. (2021). *Fluidsim simulation software*. <https://bit.ly/48F1xSU>
- Flores, A. (2022). Diseños improvisados y poco seguros que pueden poner en riesgo la integridad física de los trabajadores en el sector florícola. *Revista de Ciencias Sociales*, 29(2), 421-431. <https://doi.org/10.31876/rcs.v29i2.39984>
- Flores, J. (2022). Análisis de riesgos laborales asociados al uso de buzones electroneumáticos en la minería subterránea. *Revista de Seguridad Minera*, 6(1), 25-32.
- Flores, J. (2022). Análisis de riesgos laborales asociados al uso de buzones electroneumáticos en la minería subterránea. *Revista de Seguridad Minera*, 25-32.
- Fuentes-Fierro, N. (2014). *Análisis técnico de construcción y montaje de buzones de carguío en minería: caso buzones en Mina Esmeralda*. Universidad Andrés Bello. Santiago de Chile.
- Gallardo, R. (2022). *Evaluación de rendimientos para incrementar la productividad en Equipos de carguío y acarreo para el movimiento de mineral en una empresa minería de Cajamarca 2022*. Universidad privada del Norte. Perú.
- Geng, Y. (2022). Study on coal bunker and chute system based on multibody dynamics and granular flow theory. *Journal of Earth Science*, 1(3), 159–170.

- Granda, L. (2023). *Diseño de un sistema hidráulico para el accionamiento de vibroapisonadores*. Universidad Nacional de Loja. Loja.
- Herrera-Herbert, J. (2020). *Introducción a la Minería Subterránea. Vol. IV: Métodos de explotación subterránea*. Universidad Politécnica de Madrid. España.
- International Organization for Standardization. (2018). *Mining – Mobile machines working underground – Machine safety* (MSHA).
- Jimeno, C. (2011). Diseño de tolvas en la industria minera. *Revista de Metalurgia*, 23(3), 398-413.
- Tecnología Minera. (2024). Conoce los beneficios de la automatización en las etapas de explotación minera. <https://tecnologiaminera.com/noticia/conoce-los-beneficios-de-la-automatizacion-en-las-etapas-de-explotacion-minera-1733838379>
- Lestari, I., Fatkhurrokhman, M., & Aribowo, D. (2023). Pengaruh Penggunaan Media Festo Fluidsim untuk Meningkatkan Hasil Belajar Elektropneumatik Siswa di SMK YPWKS Cilegon. *JIIP - Jurnal Ilmiah Ilmu Pendidikan*.
- Li, X., Jiang, Q., Long, Y., Chen, Z., Zhao, W., Ming, W., Cao, Y., & Ma, J. (2023). Design Optimization of Chute Structure Based on E-SVR Surrogate Model. *Metals*.
- López, M. (2023). Prácticas seguras y sostenibles en la minería subterránea: un análisis comparativo entre países de América Latina. *Revista de Ingeniería Minera*, 15-24.
- Lumbreras, A. (2017). Análisis estructural de tolvas mediante MEF. *Revista de Ingeniería Mecánica*, 8(2), 18-26.
- Mancilla, L. (2019). Simulación numérica del flujo gravitacional en tolvas. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 12(4), 14-22.

- Martins, A. (2021). *Eficiencia y automatización en procesos industriales*.
https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/145418/Cortez_AC-SD.pdf.
- Mina, G. (2018). *Informe de Gestión Anual 2018. División El Teniente. Chile: CODELCO*.
<https://bit.ly/47Fegvv>
- Mine Safety and Health Administration. (n.d.). *Ventilation*. 30 C.F.R. § 57.8520.
- Mining, S. (2011). *SME Mining Engineering Handbook*. Metallurgy and Exploration.
- Ministerio de Trabajo. (2017). *Plan Estratégico Institucional*. Quito. Ministerio del Trabajo.
- Ministerio de Relaciones Laborales (MRL). (2014). Reglamento de Seguridad y Salud en el Trabajo del Ámbito Minero. Recuperado de
<https://www.cip.org.ec/attachments/article/2272/REGLAMENTO%20SST%20SECTOR%20MINERO.pdf>
- Morillo, D. (2019). *Análisis de la normativa técnico-legal en seguridad minera ecuatoriana*. Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca.
- Nogales-Mieles, M. (2020). *Optimización del sistema de transporte minero por medio de un modelo matemático en una cantera ubicada en el cantón Guayaquil, Provincia del Guayas*. ESPOL. Guayaquil.
- Oliveira, G. (2019). *Impact of the pneumatic ore loading system design on the concentrate discharge in a zinc mine*. Proceedings of the 28th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection.
- Ortiz, M. (2019.). *Mejora de procesos mediante automatización en minería subterránea*. Ingeniería Industrial.
- Pascual, J. (2017). Automatización y robotización de procesos mineros. *Revista Tecnología Minera*, 1(1), 1-12.

- George, L., Ma, L., Zhang, W., & Yao, G. (2023). Parametric modelling and analysis to optimize adsorption of Atrazine by MgO/Fe₃O₄-synthesized porous carbons in water environment. *Environmental Sciences Europe*, 35, 1-16.
- Pinto-Molina, S. (2023). El impacto económico de la inteligencia artificial y la automatización en el mercado laboral. *Revista Científica Kosmos*.
- Plates, A. (2013). *Alloy Steel, Carbon-Manganese for Moderate and Lower Temperature Service*. Medium Carbon Ferromanganese.
- Popov, M. (2018). *Automatic mesh generation for structural simulation in SimSolid*. *Procedia CIRP*, p. 356-361.
- Reyes, A. (2020). Análisis comparativo de eficiencia en tolvas de descarga. *Ingenius*, 1(4), 3-10.
- Rodríguez, S. (2021). Seguridad en labores mineras. *Revista de Ingeniería y Seguridad Minera*, 1(3), 1-8.
- Rojas-Villacís, C., y Zúñiga-Arrobo, C. (2022). Análisis de la actividad de carguío y transporte en minería artesanal en “El Guayabo”, Ecuador. *FIGEMPA: Investigación Y Desarrollo*, 14(2), 1–12. <https://doi.org/10.29166/revfig.v14i2.3854>
- Ruiz del Solar, J. (2020). Evaluación de automatización de operaciones unitarias en minería subterránea. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/174493>
- Ju, L., Huang, L., & Tsai, S. (2021). Online Data Migration Model and ID3 Algorithm in Sports Competition Action Data Mining Application. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, 7443676:1-7443676:11.
- Chepelenkova, V., & Lisitsa, V. V. (2024). Discrete element based numerical simulation of granular material fracturing. *Russian Journal of Geophysical Technologies*.

- Sharma, S. (2022). Mine planning and its applications. *Mining Engineering*, 23(4), 30-35.
- Torres, J. (2021). Automatización de procesos en minería subterránea. *Revista de Tecnología Minera*, 5-13.
- Torres, J. (2022). *Análisis comparativo del transporte minero automatizado vs manual*. Avances en Ingeniería Mecánica.
- Turner, M. (2019). *Dynamic Analysis for Bulk Material Handling Chutes and Augers using Multibody Dynamics and Discrete Element Method*. Proceedings of the 2019 IMECE.
- Vera Villacís, M. P., & Palacios, D. (2020). *Diseño de una tolva de almacenamiento y descarga de subproductos de atún* (Doctoral dissertation, ESPOL. FIMCP.).
- Valle, R. (2019). Análisis de deformaciones en tolvas de descarga. *Ingenius*, 2(1), 25-31.
- Xu, H., Apel, D., Wang, J., Wei, C., Skrzypkowski, K. (2022). Investigación y estabilidad Evaluación del pilar de tres alféizares Esquemas de recuperación en una roca dura Mío. *Energías*, 15(1), 37-97.
- Yuan, L., Chen, Y., Wang, T., Yu, W., Shi, Y., Tay, F. E. H., ... & Yan, S. (2021). Tokens-to-Token ViT: Training Vision Transformers from Scratch on ImageNet. 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), 538-547.
- Yu, T., Niu, M., Mi, H., & Lu, Q. (2023, November). MilliWare: Parametric Modeling and Simulation of Millifluidic Shape-changing Interface. In *Proceedings of the Eleventh International Symposium of Chinese CHI* (pp. 461-467).
- Zamora, R. (2013). *Evaluación de los métodos para el cálculo de caudales máximos probables instantáneos en edificaciones*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
- Zhang, L. (2021). *Structural Optimization of Transfer Chute Based on Multibody Dynamics*. Journal of Testing and Evaluation, 2018–2026.

ANEXOS

Anexo 1 Análisis modal de fallos y efectos.

		ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (A.M.F.E)																			
		X DISEÑO PROCESO MEDIOS																			
Componente	Partes del componente	Descripción de la falla	Módulo asociado de falla	Revisión preliminar del fallo	Clase	Grado	Condiciones presentadas en la falla	Clase	Mediaciones (por acciones) actuales	Clase	Mediaciones (por acciones) actuales	Clase	Mediaciones (por acciones) actuales	Clase	Mediaciones (por acciones) actuales	Acciones recomendadas	Resultados de los controles				
Carcasas	Carcasas	Parte frontal de la puerta del buzo que regula y controla el flujo de fluido hacia adentro y hacia afuera del buzo de minería.	Absorción de material	Dificultad para cerrar o abrir la compuerta	6	Medio	Características del material a descargar	6	Inspección del personal	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Degase o corrosión	Reducción de la vida útil de la parte de la compuerta	7	Corrosión	Calidad del material	6	Selección de materiales resistentes a la corrosión	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Falla de sellado	El fluido en el interior de la parte de la compuerta puede escapar o resultar en fuga de fluido	8	Sellado	Calidad y deformación de los componentes de sellado	7	Mantenimiento regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Carga estructural	Falta de refuerzos y riesgo de seguridad para el personal y disponibilidad del buzo	9	Estructural	Cargas inadecuadas	10	Inspección del personal	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Problemas de alineación	Degase prematuro de las partes móviles	6	Medio	Cargas inadecuadas	6	Inspección del personal	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
	Compartes	Partes laterales de la puerta del buzo que regulan el flujo de fluido hacia adentro y hacia afuera del buzo de minería.	Deformación estructural	Interferencia o daños a las partes de la compuerta, riesgo de seguridad para el personal y disponibilidad del buzo	7	Estructural	Cargas inadecuadas	6	Inspección del personal	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Degase o corrosión	Reducción de la vida útil de la parte de la compuerta	7	Corrosión	Calidad del material	6	Selección de materiales resistentes a la corrosión	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Desprendimiento de revestimiento	Reducción de la protección contra la corrosión	5	Corrosión	Exposición a condiciones ambientales	10	Mantenimiento regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Fatiga por carga cíclica	Compromiso de la integridad estructural y seguridad operativa	9	Medio	Sobrecargas ocasionales	6	Inspección del personal	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Inestabilidad estructural	Riesgo de colapso o inestabilidad del buzo	10	Estructural	Cargas inadecuadas	10	Inspección del personal	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
Base de la tolva	Base de la tolva	Base de la tolva por donde fluye el material hacia adentro y hacia afuera del buzo de minería.	Deformación estructural	Interferencia o daños a las partes de la compuerta, riesgo de seguridad para el personal y disponibilidad del buzo	7	Estructural	Cargas inadecuadas	6	Inspección del personal	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Degase o corrosión	Reducción de la vida útil de la parte de la compuerta	5	Corrosión	Calidad del material	6	Selección de materiales resistentes a la corrosión	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Degase por fricción	Reducción de la vida útil de la parte de la compuerta	5	Medio	Materiales abrasivos o corrosivos	10	Selección de materiales adecuados	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Falla de soldadura	Riesgo de colapso o inestabilidad del buzo	9	Unión	Procedimientos de soldadura incorrectos	4	Calificación de soldadores	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Inestabilidad estructural	Riesgo de colapso o inestabilidad del buzo	10	Estructural	Cargas inadecuadas	6	Inspección del personal	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
	Tolva de la tolva	Partes laterales de la tolva del buzo que brindan soporte estructural y estabilidad durante la operación del buzo de minería.	Deformación estructural	Interferencia o daños a las partes de la compuerta, riesgo de seguridad para el personal y disponibilidad del buzo	7	Estructural	Cargas inadecuadas	6	Inspección del personal	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Degase o corrosión	Reducción de la vida útil de la parte de la compuerta	5	Corrosión	Calidad del material	6	Selección de materiales resistentes a la corrosión	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Degase por fricción	Reducción de la vida útil de la parte de la compuerta	5	Corrosión	Materiales abrasivos o corrosivos	10	Selección de materiales adecuados	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Fatiga por carga cíclica	Compromiso de la integridad estructural y seguridad operativa	9	Medio	Sobrecargas ocasionales	4	Inspección del personal	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Inestabilidad estructural	Riesgo de colapso o inestabilidad del buzo	10	Estructural	Cargas inadecuadas	6	Inspección del personal	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
Tolva de la tolva	Tolva de la tolva	Parte inferior que da soporte estructural y estabilidad durante la operación del buzo de minería.	Deformación estructural	Interferencia o daños a las partes de la compuerta, riesgo de seguridad para el personal y disponibilidad del buzo	7	Estructural	Cargas inadecuadas	6	Inspección del personal	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Degase o corrosión	Reducción de la vida útil de la parte de la compuerta	5	Corrosión	Calidad del material	6	Selección de materiales resistentes a la corrosión	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Falla de soldadura	Riesgo de colapso o inestabilidad del buzo	9	Unión	Procedimientos de soldadura incorrectos	4	Selección de materiales adecuados	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Fatiga por carga cíclica	Compromiso de la integridad estructural y seguridad operativa	9	Medio	Sobrecargas ocasionales	4	Inspección del personal	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Inestabilidad estructural	Riesgo de colapso o inestabilidad del buzo	10	Estructural	Cargas inadecuadas	6	Inspección del personal	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
	Soporte base de la tolva	Parte inferior que da soporte estructural y estabilidad durante la operación del buzo de minería.	Deformación estructural	Interferencia o daños a las partes de la compuerta, riesgo de seguridad para el personal y disponibilidad del buzo	7	Estructural	Cargas inadecuadas	6	Inspección del personal	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Degase o corrosión	Reducción de la vida útil de la parte de la compuerta	5	Corrosión	Calidad del material	6	Selección de materiales resistentes a la corrosión	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Falla de soldadura	Riesgo de colapso o inestabilidad del buzo	9	Unión	Procedimientos de soldadura incorrectos	4	Selección de materiales adecuados	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Fatiga por carga cíclica	Compromiso de la integridad estructural y seguridad operativa	9	Medio	Sobrecargas ocasionales	4	Inspección del personal	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					
			Inestabilidad estructural	Riesgo de colapso o inestabilidad del buzo	10	Estructural	Cargas inadecuadas	6	Inspección del personal	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular	Inspección regular					