

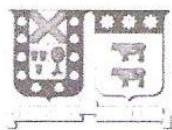
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR- JOSÉ MIGUEL CARRERA

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE FORTIFICACIÓN MINERA MEDIANTE
EQUIPO AUTOMATIZADO EMPLEANDO REALIDAD VIRTUAL**

Proyecto de titulación para optar al Título de
INGENIERÍA EN FABRICACIÓN Y
DISEÑO INDUSTRIAL con Licenciatura en
Ingeniería en Fabricación y Diseño Industrial.

Alumna:
Catalina Andrea Araya Corvalán

Profesor guía:
Dr. Carlos Antillanca Espina



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Optimización del proceso de forтификаción minera mediante equipo automatizado empleando realidad virtual.

Nombre del candidato(a): Catalina Andrea Araya Corvalán

Carrera / Grado: Ingeniería en fabricación y diseño industrial

Campus: Viña del Mar ; Departamento: Diseño y manufactura

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Carlos Antillanca Espina, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 31/07/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 31/07/2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

RESUMEN TÉCNICO

KEYWORDS: DISEÑO DE EQUIPO MINERO, FORTIFICACIÓN, AUTOMATIZACIÓN, MODELADO 3D, SIMULACIÓN EN UNITY, REALIDAD VIRTUAL.

El propósito de este estudio es diseñar y desarrollar un equipo automatizado que permita transportar e instalar marcos prefabricado de hormigón armado dentro de los túneles previamente fortificados, lo que permitirá un recubrimiento seguro y la movilización en las faenas, específicamente en la mina Esmeralda de la división El Teniente de Codelco. La necesidad surge a partir de la ineficacia del método actual de fortificación, donde los recubrimientos son irregulares, afectando la calidad de los trabajos subterráneos y la eficiencia en el entorno laboral. Esto es crucial considerando las características geológicas de la mina, que presentan un alto riesgo de derrumbes debido a su alta sismicidad. Además, se utiliza la realidad virtual (RV) como herramienta para la visualización del prototipo, permitiendo evaluar y optimizar el diseño antes de su fabricación, reduciendo así el uso excesivo de material y asegurando un proceso más eficiente y seguro.

Este proyecto de título consta de tres capítulos, el primer capítulo corresponde a “ANTECEDENTES GENERALES DOCUMENTACIÓN”, que hace referencia al Diagnóstico del proyecto, Metodología, Análisis estratégico causa, problema y consecuencia (CPC), información sobre tecnologías de fortificación y minería, etc.

En el segundo capítulo hace mención a la “INGENIERÍA CONCEPTUAL DEL PROYECTO”, y se abordará el estudio técnico, descripciones del proceso, determinación de insumos, programas de trabajo, capital de trabajo, modelación 3D, la visualización inicial para poder proyectar en realidad virtual, y una evaluación de factibilidad técnica.

En el tercer capítulo se abordan los “CUBICACIÓN Y EVALUACIÓN DE COSTOS”, los cuales incluyen un desglose detallado de los costos asociados a la máquina y al prototipo virtual, determinación del uso real de materiales y costos e imprevistos.

ABSTRACT

KEYWORDS: MINING EQUIPMENT DESIGN, FORTIFICATION, AUTOMATION, 3D MODELING, UNITY SIMULATION, VIRTUAL REALITY.

The purpose of this study is to design and develop an automated machine capable of transporting and installing prefabricated reinforced concrete frames within previously fortified tunnels. This will ensure safe coverage and enable mobility in mining operations, specifically in the Esmeralda mine of Codelco's El Teniente division. The need arises from the inefficiency of the current fortification method, where irregular coverings compromise the quality of underground work and operational efficiency. This challenge is critical due to the geological characteristics of the mine, which present a high risk of collapses caused by significant seismic activity. Additionally, virtual reality (VR) is employed as a tool to visualize the prototype, allowing for the evaluation and optimization of the design before manufacturing. This reduces excessive material use while ensuring a safer and more efficient process.

This thesis project consists of three main chapters. The first chapter, "GENERAL BACKGROUND AND DOCUMENTATION," includes the project diagnosis, methodology, strategic analysis of cause-problem-consequence (CPC), and relevant information about fortification and mining technologies.

The second chapter, "CONCEPTUAL ENGINEERING OF THE PROJECT," focuses on the technical study, detailed process descriptions, determination of inputs, work plans, capital requirements, 3D modeling, initial visualization for projection in virtual reality, and a technical feasibility evaluation.

Finally, the third chapter, "CUBICATION AND COST EVALUATION," presents a detailed breakdown of the costs associated with the machine and virtual prototype, determination of actual material usage, and unforeseen expenses, ensuring a comprehensive and practical approach to the project implementation.

ÍNDICE

RESUMEN

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES Y DOCUMENTACIÓN 2

1.1.	OBJETIVOS DEL PROYECTO	3
1.1.1.	Objetivo general	3
1.1.2.	Objetivo específico	3
1.2.	CONTEXTO DE DESARROLLO	4
1.2.1.	Antecedentes	4
1.2.2.	Fortificación minera	4
1.2.3.	Tipos de materiales para fortificación	10
1.2.4.	Selección de materiales adecuados para maquinaria	11
1.2.5.	Realidad virtual para visualización	12
1.2.6.	Realidad virtual en minería	13
1.2.7.	Datos entregados por el mandante	15
1.3.	IMPACTO RELACIONADO CON EL PROYECTO	16
1.4.	ANÁLISIS FODA	18
1.5.	ANÁLISIS ESTRATÉGICO CAUSA, PROBLEMA Y CONSECUENCIA	20
1.6.	DIAGNÓSTICO Y METODOLOGÍA	21
1.6.1.	Definición de situación sin proyecto	21
1.6.2.	Definición de situación con proyecto	24
1.6.3.	Metodología Stage-Gate	25
1.7.	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROYECTO	28
1.8.	NORMAS NACIONALES	29
1.9.	NORMAS INTERNACIONALES	30

CAPÍTULO 2: INGENIERÍA CONCEPTUAL 32

2.1.	ESTUDIO TÉCNICO	33
2.2.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	36
2.3.	SELECCIÓN DE EQUIPOS	38
2.4.	DETERMINACION DE INSUMOS	40
2.5.	PROGRAMA DE TRABAJO	43
2.6.	CARGOS, PERFILES Y SUELDOS	43
2.7.	CAPITAL DE TRABAJO	44
2.8.	VISUALIZACIÓN PARA LLEVAR A LA REALIDAD VIRTUAL	45
2.9.	MODELACIÓN 3D EN FUSION 360	47
2.10.	ANIMACIÓN FUNCIONAL DEL EQUIPO	52
2.11.	INTEGRACIÓN A UNITY	53

2.12.	EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD TÉCNICA	55
CÁPITULO 3: CUBICACIÓN Y EVALUACIÓN DE COSTOS		61
3.1.	COSTOS ASOCIADOS AL PROTOTIPO VIRTUAL	62
3.2.	COSTOS ASOCIADOS AL EQUIPO	63
3.3.	DETERMINACIÓN DEL USO REAL DE MATERIALES	64
3.4.	COSTO DE MANO DE OBRA	67
3.5.	COSTO TOTAL	69
3.6.	COSTOS DE IMPREVISTOS	69
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		70
BIBLIOGRAFÍA		71
ANEXOS		
Anexo A.	PLANO ESTRUCTURA PRINCIPAL.	48
Anexo B.	PLANO ALMACENAMIENTO ELECTRÓNICO	48
Anexo C.	PLANO SOPORTE INFERIOR	49
Anexo D.	PLANO ARCO	49
Anexo E.	PLANO EQUIPO COMPLETO	49
Anexo F.	PLANO SOPORTE SUPERIOR	50
Anexo G.	PLANO SOPORTE LATERAL	50
Anexo H.	PLANO DE CONJUNTO	50
Anexo I.	ANIMACIÓN ESTRUCTURA COMPLETA	52
Anexo J.	ANIMACIÓN FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1.	Ventajas y desventajas de sistemas de Fortificación	11
Tabla 1-2.	CPC automatización en la instalación de marcos	21
Tabla 2-1.	Detalle de cargas dinámicas según tipo de marco	35
Tabla 2-2.	Especificaciones técnicas Oculus Quest 2	41
Tabla 2-3.	Especificaciones técnicas del dispositivo	42
Tabla 2-4.	Cargos y sueldos	44
Tabla 3-1.	Costos de prototipo virtual	62
Tabla 3-2.	Costos asociados a los materiales necesarios	63
Tabla 3-3.	Uso real de materiales estructura base del equipo	66
Tabla 3-4.	Clasificación de complejidad de fabricación	68
Tabla 3-5.	Resumen costo total del proyecto	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1.	KJ211-CYTJ45C Equipo de perforación de túneles hidráulico	7
Figura 1-2.	Robot de demolición Brokk 200	8
Figura 1-3.	Sistema AutoMine® para cargadores subterráneos	9
Figura 1-4.	Casos de éxito: Proyecto Traspaso Codelco. VirtualWorld	14
Figura 1-5.	Casos de éxito: Proyecto Traspaso Codelco. División Andina	14
Figura 1-6.	Minverso: Metaverso Minero	15
Figura 1-7.	Sectores productivos, Mina Esmeralda, El Teniente	16
Figura 1-8.	Instalación de marcos prefabricados mediante brokk	22
Figura 1-9.	Instalación de varillas de acero	23
Figura 1-10.	Relleno de hormigón proyectado	24
Figura 2-1.	Distribución espacial Mina Esmeralda	33
Figura 2-2.	Diseño de curvas	34
Figura 2-3.	Marcos prefabricado de hormigón armado	35
Figura 2-4.	Oculus Quest 2	40
Figura 2-5.	Diagrama de bloques	43
Figura 2-6.	Boceto de cuerpo principal	46
Figura 2-7.	Boceto soporte de marco con cercha	46
Figura 2-8.	Boceto vista frontal general	47
Figura 2-9.	Render diseño 3D estructura base	47
Figura 2-10.	Render diseño 3D rotación oruga	48
Figura 2-11.	Render diseño 3D incorporación de marcos estructurales	49
Figura 2-12.	Render diseño 3D marcos adaptables	50
Figura 2-13.	Render diseño 3D túnel desquinchado	51
Figura 2-14.	Render diseño 3D túnel fortificado	51

Figura 2-15.	Render diseño 3D mina Esmeralda	52
Figura 2-16.	Avatar girando, maqueta virtual Unity	53
Figura 2-17.	Minicargador, maqueta virtual Unity	54
Figura 2-18.	Camioneta, maqueta virtual Unity	54
Figura 2-19.	Equipo, maqueta virtual Unity	55
Figura 2-20.	Jumbo, maqueta virtual Unity	55
Figura 2-21.	Simulación estática, fuerza de contacto	57
Figura 2-22.	Simulación estática, presión de contacto	58
Figura 2-23.	Simulación estática, deformación	59
Figura 2-24.	Simulación estática, fuerza de reacción	59
Figura 2-25.	Simulación estática, desplazamiento	60
Figura 2-26.	Simulación estática, estrés de Von Mises	61
Figura 2-27.	Simulación estática, factor de seguridad	61
Figura 3-1.	Identificación de piezas arco	64
Figura 3-2.	Identificación de piezas estructura base	65

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLA

ANSI:	American National Standards Institute
ASTM:	American Society for Testing and Materials
CAD:	Computer-Aided Design
CPC:	Causa, Problema y Consecuencia
C#:	Lenguaje de programación
DS:	Decreto Supremo (Chile)
IEEE:	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INN:	Instituto Nacional de Normalización
ISO:	International Organization for Standardization
NCh:	Norma Chilena
ROG:	Republic of Gamers (línea de productos ASUS)
SDK:	Software Development Kit
SEIA:	Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
SSD:	Solid State Drive
UF:	Unidad de Fomento (moneda chilena)
VR:	Virtual Reality
3DoF:	Three Degrees of Freedom
6DoF:	Six Degrees of Freedom

B. SIMBOLOGÍA

Inc:	Pulgada
kg:	Kilogramo
kW:	Kilovatio
m:	Metros
mm:	Milímetros
m²:	Metros cuadrados

INTRODUCCIÓN

La fortificación en minería es un proceso fundamental para garantizar la estabilidad y seguridad de las estructuras subterráneas, especialmente en entornos complejos como las faenas mineras. Este proyecto se centra en el diseño y desarrollo virtual de un equipo automatizado para la movilización e instalación de marcos prefabricados de hormigón armado, cuyo objetivo es reforzar la infraestructura minera y optimizar la eficiencia operativa. Actualmente, los métodos convencionales presentan limitaciones en cuanto a seguridad, precisión y continuidad en las operaciones, lo cual incrementa el riesgo para los trabajadores y afecta la productividad.

En este contexto, la realidad virtual (RV) se presenta como una herramienta clave para apoyar la representación visual del desarrollo y análisis del entorno minero y el equipo. A través de una visualización tridimensional, esta tecnología permite evaluar el diseño y funcionamiento del sistema en un espacio virtual. Esta experiencia, permite al usuario adentrarse en el espacio digital de forma inmersiva, facilitando la comprensión del funcionamiento del sistema y su integración en faenas reales. La incorporación de RV inmersiva no interactiva contribuye significativamente al análisis espacial, la proyección del diseño y la comunicación efectiva de propuestas innovadoras en un entorno simulado y seguro.

Este estudio aborda el diseño integral y desarrollo de un equipo de fortificación automatizado, considerando aspectos técnicos, normativas de seguridad, características mecánicas y tecnológicas, además de un análisis detallado de costos y presupuestos. La solución propuesta busca cumplir con los altos estándares de calidad exigidos por la empresa solicitante y el mercado, ofreciendo una alternativa avanzada que optimiza la seguridad y eficiencia en las operaciones subterráneas.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES Y DOCUMENTACIÓN

1. ANTECEDENTES GENERALES Y DOCUMENTACIÓN

En este capítulo hace referencia al diagnóstico y los antecedentes del proyecto. Metodología, Análisis estratégico causa problema y consecuencia (CPC), al análisis de materiales para la construcción de maquinaria minera, normativas, y el uso de la realidad virtual para el diseño de la nueva máquina que moviliza e instala marcos prefabricados de hormigón armado para la fortificación minera, además de un análisis sobre las tecnologías de recubrimientos.

1.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO

Estos objetivos abarcan tanto la investigación de los problemas actuales del proceso de fortificación minera, como el desarrollo de un modelo eficiente que incorpore tecnologías de automatización y pueda ser visualizado mediante realidad virtual inmersiva no interactiva. Esto con el fin de facilitar el análisis, la validación visual y la proyección del equipo en entornos mineros simulados, mejorando así la seguridad, calidad y eficiencia del proceso.

1.1.1. Objetivo general

Diseñar un equipo automatizado para movilizar e instalar marcos prefabricados de hormigón armado, destinado al fortalecimiento de la infraestructura subterránea en las faenas mineras solicitantes, incorporando su validación funcional en un entorno de realidad virtual inmersiva.

1.1.2. Objetivos específicos

- a) Investigar las deficiencias del proceso actual de fortificación en las faenas mineras solicitadas.
- b) Identificar los factores que afectan a la hora del proceso de recubrimiento.
- c) Analizar las limitaciones técnicas y mecánicas asociadas a los métodos de fortificación utilizados actualmente.
- d) Evaluar los desafíos que las condiciones subterráneas imponen al diseño y a la instalación de marcos prefabricados de hormigón.
- e) Elaborar un modelo funcional del equipo automatizado, considerando dimensiones, capacidades de carga y mecanismos adecuados para la instalación.
- f) Desarrollar una visualización digital del equipo en funcionamiento mediante una simulación en realidad virtual inmersiva no interactiva.

- g) Aplicar la tecnología de realidad virtual como herramienta para representar el entorno minero simulado y facilitar la comprensión espacial y operativa del equipo diseñado.

1.2. CONTEXTO DE DESARROLLO

Se requiere un análisis detallado de los procesos de fortificación minera y de los factores técnicos existentes e involucrados para incluir tecnologías innovadoras como la realidad virtual y poder evaluar su funcionamiento antes de la implementación en faenas.

1.2.1. Antecedentes

El diseño y desarrollo de un nuevo equipo para transportar e instalar marcos prefabricados de hormigón inmerso en realidad virtual, requiere una comprensión integral de diversos conceptos y principios relacionados con la minería e ingeniería.

1.2.2. Fortificación minera

Se estudiarán los principios fundamentales del proceso de fortificación y recubrimiento de cerros, especializándose en la faena solicitada, Mina Esmeralda de la mina El Teniente.

A. Factores que influyen en el proceso de recubrimiento

Los factores que intervienen en el proceso de recubrimiento en minería son esenciales para garantizar la estabilidad de las estructuras subterráneas. Aspectos como las condiciones geológicas, los métodos de extracción, el entorno ambiental, los materiales de fortificación y las tecnologías empleadas serán analizados a continuación para entender su impacto en la fortificación de la Mina Esmeralda.

a. Condiciones geológicas

Se ha documentado que las condiciones geológicas, en la mina Esmeralda, se relacionan a la densidad de fallas y su influencia en la estabilidad del macizo rocoso. La densidad de fallas mayores se entiende como la cantidad de fracturas grandes presentes en un área determinada, esta densidad es influenciada por la proximidad a sistemas de fallas preexistentes y a los contactos litológicos, es decir, zonas donde se encuentran distintos tipos de rocas. Estas áreas, en particular aquellas involucradas con el Complejo Máfico El Teniente (una formación de rocas ígneas ricas en hierro y magnesio), tienden a tener una mayor concentración de fallas. Esta situación geológica incrementa la inestabilidad del terreno, lo que exige la implementación de sistemas de fortificación avanzados para garantizar la seguridad y estabilidad de las operaciones en el yacimiento. (Brzovic, 2015).

Por otro lado, Recursos Norte, las operaciones enfrentan desafíos similares. Este sector se encuentra dentro de la expansión del Plan de Desarrollo de El Teniente, lo que incluye la explotación de reservas a mayor profundidad. Las fallas y estructuras tectónicas afectan la estabilidad del yacimiento, lo que hace necesario el uso de técnicas como el preacondicionamiento y fortificaciones especiales. (Codelco, 2020).

b. Métodos de extracción

En la mina subterránea, se utilizan varios métodos de extracción adaptados a las características geológicas del yacimiento y al tipo de mineral. Los principales métodos son:

i. Panel Caving

Un método utilizado para extraer grandes volúmenes de mineral, como en el caso de los yacimientos de pórfido de cobre. Se crea una fractura controlada en bloques de roca subterráneos, que colapsan de manera natural debido a la gravedad. Por ende, se forma una cavidad desde donde el material triturado se extrae desde niveles inferiores a través de galerías de transporte. El proceso comienza con la perforación y detonación de la roca para crear la cavidad inicial, seguida de un hundimiento controlado. El mineral roto se transporta a los puntos de extracción mediante sistemas automatizados, lo que aumenta la eficiencia y reduce la necesidad de mano de obra en áreas de riesgo. Este método es especialmente eficiente para depósitos grandes y profundos, y permite una extracción continua de mineral sin detener las operaciones.

ii. Sublevel Stopping (Detonación Subterránea)

Un método que implica la extracción de mineral a través de perforaciones y detonaciones en distintos subniveles de la mina. Se comienza desarrollando galerías horizontales o subniveles a lo largo del cuerpo mineralizado. Luego, se perfora el mineral entre los subniveles y se realizan detonaciones controladas, lo que permite que el mineral caiga por gravedad hacia las áreas de extracción. Este método es ideal para depósitos con forma regular, donde el mineral tiene buena estabilidad. Tras las detonaciones, el material fragmentado es cargado y transportado por equipos subterráneos.

iii. |Preacondicionamiento

Técnica que se utiliza junto con el método de Panel Caving para mejorar la eficiencia del hundimiento del mineral. Consiste en fracturar la roca antes de iniciar el proceso de hundimiento, lo que puede lograrse mediante perforaciones adicionales o fracturación hidráulica. Este preacondicionamiento reduce las tensiones en la roca y facilita su colapso controlado, mejorando la fragmentación del mineral y minimizando los riesgos de colapsos repentinos. Es especialmente útil en áreas con alta sismicidad o en formaciones geológicas que presentan mayor resistencia.

c. Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales en las minas subterráneas, especialmente Esmeralda y Recursos Norte, son desafiantes debido a su ubicación a gran profundidad y las características geológicas de la Cordillera de los Andes. Las principales condiciones ambientales que afectan las operaciones incluyen:

i. Temperatura de la roca

A medida que las minas se adentran en mayores profundidades, la temperatura de la roca puede elevarse significativamente, lo que genera un ambiente de trabajo más hostil y requiere de sistemas avanzados de ventilación para garantizar condiciones seguras para los trabajadores.

ii. Sismicidad

Las minas están ubicadas en una zona altamente sísmica, lo que incrementa el riesgo de desprendimientos y colapsos. Esto obliga a una planificación geotécnica cuidadosa y a la implementación de tecnologías de fortificación avanzadas para asegurar la estabilidad de las galerías y los túneles.

iii. Ventilación y control de polvo

El manejo de la ventilación es crucial para mantener condiciones de trabajo seguras. Enfía las áreas de trabajo, ayuda a controlar el polvo y los gases tóxicos generados por las actividades mineras, especialmente por la maquinaria y el uso de explosivos.

iv. Agua subterránea

Las filtraciones de agua subterránea pueden afectar la estabilidad de las paredes y el techo de los túneles. Para manejar este problema, se implementan sistemas de drenaje y bombeo efectivos.

d. Materiales de fortificación

La fortificación en las minas es esencial para mantener la estabilidad de las galerías y asegurar la seguridad de los trabajadores en un entorno geológicamente complejo. Los principales materiales y tecnologías de fortificación utilizados incluyen:

i. Shotcrete (hormigón proyectado)

Uno de los materiales más utilizados para la fortificación de túneles en estas minas. El shotcrete se proyecta sobre las superficies de roca expuesta para crear un revestimiento sólido que estabiliza las paredes y el techo de los túneles.

ii. Pernos de anclaje

Los pernos auto-perforantes son ampliamente utilizados en la fortificación de túneles. Se insertan en perforaciones en las paredes y techos de los túneles para proporcionar un refuerzo estructural adicional, evitando desprendimientos y colapsos. Se utilizan en combinación con shotcrete para formar un sistema de sostenimiento robusto.

iii. Mallas metálicas

Las mallas metálicas refuerzan aún más las áreas recubiertas con shotcrete y contienen los fragmentos más pequeños de roca que podrían desprenderse. Estas mallas son rápidas de instalar y se integran bien en el sistema de fortificación.

iv. Hormigón armado prefabricado

En algunos casos, se utilizan estructuras prefabricadas de hormigón para fortificar zonas críticas de las galerías. Estos marcos ofrecen una resistencia adicional en áreas de alta sismicidad o con condiciones geotécnicas difíciles.

e. Tecnologías y equipos para fortificación

Se explorarán en profundidad los conceptos relacionados con el diseño de maquinaria específicamente adaptada para la industria minera. Se destacarán equipos clave como los especializados para la fortificación, el uso de tecnologías avanzadas, y el papel que juegan estas soluciones en la modernización de los procesos mineros.

i. Máquina perforadora jumbo hidráulica para túneles CYTJ45 (HT81)

Máquina diseñada para perforar túneles y galerías en operaciones mineras y de construcción subterránea. Su función principal es realizar perforaciones precisas en la roca para facilitar procesos como la excavación y fortificación de túneles (Figura 1-1).



Fuente: (Kaishan Global, 2024)

Figura 1-1. KJ211-CYTJ45C Equipo de perforación de túneles hidráulico.

Especificaciones técnicas:

Se destacan aspectos fundamentales de su rendimiento y capacidad operativa.

- Peso: 12500 kg
- Dimensiones generales: 11050×1850×2340 mm
- Potencia del motor: 60 kw
- Velocidad de desplazamiento:
- Diámetro del agujero: 43-102 mm
- Profundidad del agujero: 3300/3900 mm
- Número de pluma: 1

ii. Robot de demolición BROKK 200

Máquina compacta y potente, diseñada para trabajos de demolición en espacios reducidos, permite realizar tareas de demolición en áreas de difícil acceso y en proyectos que requieren precisión y fuerza (Figura 1-2).



Fuente: (Anzeve, 2022)

Figura 1-2. Robot de demolición Brokk 200.

Especificaciones técnicas:

Se destacan aspectos fundamentales de su rendimiento y capacidad operativa.

- Peso: 2100 kg
- Ancho mínimo: 780 mm
- Alto mínimo: 1283 mm

- Largo mínimo: 2083 mm
- Potencia: 27,5 kw
- Peso máximo de herramienta: 350 kg
- Alcance máximo: 5 m

iii. AutoMine® (Sistema de automatización de flotas)

El sistema AutoMine® de Sandvik es una solución avanzada de automatización diseñada para operar cargadores y camiones de forma autónoma en entornos mineros subterráneos. Este sistema proporciona un control completo de las flotas, optimizando la seguridad y eficiencia en el transporte y la carga en áreas peligrosas o de difícil acceso (Figura1-3).



Fuente: (Sandvik, 2023)

Figura 1-3. Sistema AutoMine® para cargadores subterráneos.

Especificaciones técnicas:

Se destacan aspectos fundamentales de su rendimiento y capacidad operativa.

- Capacidad de carga útil de los equipos asociados: Hasta 14 toneladas (con cargadores Toro™ LH514).
- Operación: Totalmente autónoma o controlada de manera remota.
- Escalabilidad: Puede controlar una sola máquina o una flota completa con capacidades de tráfico y misiones automáticas.
- Sistema de control de tráfico: Gestiona de forma avanzada las rutas y el tráfico subterráneo.
- Compatibilidad: Puede integrar cargadores y camiones en la misma área de producción

1.2.3. Tipos de materiales para fortificación

Se examinarán diferentes metodologías de fortificación utilizadas en la industria minera. Se evaluarán las ventajas y desventajas de cada tipología en términos de precisión, seguridad y eficiencia.

- A. Con pernos de anclaje: Se instalan pernos en la roca para estabilizar y reforzar la estructura.
- B. Con pernos de anclaje y malla olímpica: Combina pernos de anclaje con una malla metálica para mayor contención de roca.
- C. Con madera: Utiliza marcos o soportes de madera para estabilizar las galerías.
- D. Con arcos metálicos: Emplea estructuras de acero en forma de arco para soportar la roca.
- E. Con hormigón armado: Utiliza concreto reforzado con varillas de acero para crear una estructura sólida.
- F. Con mampostería de piedra: Construcción con piedras unidas por mortero para estabilizar las paredes y techos.
- G. Con shotcrete: Proyección de concreto sobre las superficies de roca para reforzarlas.
- H. Con cables, mallas y pernos: Combina cables de acero, mallas metálicas y pernos de anclaje para una estabilización integral.

Para evaluar detalladamente las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de fortificación, tecnologías y materiales empleados para garantizar la estabilidad estructural de los túneles y la seguridad de las operaciones mineras subterráneas (Tabla 1-1).

Tabla 1-1. Ventajas y desventajas de sistemas de Fortificación.

FORTIFICACIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Fortificación con Madera	✓ Material económico y fácil de obtener. ✓ Instalación sencilla. ✓ Útil en situaciones temporales.	✓ Baja durabilidad. ✓ Susceptible a la humedad y a ataques de insectos. ✓ No soporta cargas pesadas por largos períodos.
Fortificación con Marcos Metálicos	✓ Alta resistencia y durabilidad. ✓ Soporta cargas pesadas. ✓ Reutilizables en diversas áreas.	✓ Alto costo de adquisición. ✓ Instalación más compleja. ✓ Requiere maquinaria pesada.
Fortificación con Shotcrete	✓ Rápida aplicación. ✓ Estabiliza superficies irregulares. ✓ Proporciona una cobertura continua al macizo rocoso.	✓ Alto costo en materiales y equipos. ✓ La calidad depende de la preparación del terreno. ✓ Requiere personal especializado.
Fortificación con Pernos de Anclaje	✓ Refuerza el macizo rocoso. ✓ Versátil en diferentes condiciones geológicas. ✓ Puede instalarse de manera mecanizada o manual.	✓ Depende de la calidad del macizo y la instalación. ✓ Puede requerir equipos especializados. ✓ Mantenimiento periódico necesario.
Fortificación con Cables de Acero	✓ Soporte adicional en zonas profundas. ✓ Alta capacidad de carga. ✓ Estabiliza áreas con grandes esfuerzos geomecánicos.	✓ Instalación costosa. ✓ Requiere técnicas especializadas. ✓ Susceptible a la corrosión si no se protege adecuadamente.

Fuente: (Gómez, 2018).

Actualmente, desde 2020, la manera de recubrimiento de las faenas mencionadas es un proceso combinado donde se realiza primero una aplicación de shotcrate, luego pernos de anclaje, malla olímpica y por último un recubrimiento con una segunda capa de hormigón proyectado. Aun así, no es suficiente para evitar derrumbes.

1.2.4. Selección de materiales adecuados para maquinaria

El acero de alta resistencia es una opción ampliamente utilizada en la industria minera debido a sus excepcionales características de durabilidad y resistencia. Es capaz de soportar cargas pesadas, así como los impactos y vibraciones que son comunes en los entornos mineros. Además, cuenta con una alta resistencia a la tracción y a la fatiga, lo que lo convierte en una opción ideal para su uso en maquinaria para trabajos subterráneos. Otra ventaja clave es su robustez y estabilidad, lo que asegura que sea un material seguro para el contacto directo del personal que trabaja en condiciones exigentes.

La norma ISO 19296:2018 establece directrices importantes para la seguridad de las máquinas móviles que operan en entornos mineros. Esta normativa subraya que los materiales utilizados en la construcción de maquinaria deben ser capaces de soportar las

condiciones severas de la operación subterránea, asegurando la integridad estructural y la seguridad de los operarios. El uso de acero de alta resistencia es ideal para garantizar la durabilidad, capacidad de carga y seguridad en las operaciones mineras.

Esto refuerza la elección del acero como material primordial en la industria minera, asegurando su fiabilidad en las aplicaciones más exigentes.

1.2.5. Realidad virtual para visualización

La realidad virtual (RV) es una tecnología que permite la creación de entornos tridimensionales interactivos en los que los usuarios pueden visualizar y explorar diferentes escenarios de manera inmersiva. Mediante el uso de dispositivos como cascos de realidad virtual y controladores, es posible simular experiencias que replican condiciones reales en sectores como ingeniería, construcción y minería.

En el ámbito industrial, la RV se utiliza cada vez más para la visualización de proyectos complejos, como el diseño de maquinaria, el análisis de infraestructura subterránea o la simulación de entornos operativos. Esta tecnología ofrece beneficios significativos, como la posibilidad de identificar errores en etapas tempranas del diseño, optimizar procesos y mejorar la toma de decisiones antes de implementar soluciones físicas.

Existen dos tipos de interacción principales con esta tecnología:

- A. 3DoF (Three Degrees of Freedom): Este tipo de interacción permite a los usuarios observar y girar su punto de vista en el entorno virtual. Los tres grados de libertad corresponden a los siguientes movimientos:
 - a. Rotación en el eje X (inclinación): Mover la cabeza hacia arriba o hacia abajo.
 - b. Rotación en el eje Y (yaw): Girar la cabeza hacia la izquierda o derecha.
 - c. Rotación en el eje Z (roll): Inclinar la cabeza hacia un lado (como cuando se ladea).

Esta modalidad es ideal para:

- a. Explorar modelos 3D estáticos: Como diseños de maquinaria o prototipos.
- b. Presentaciones inmersivas: Mostrar un espacio o producto sin necesidad de desplazarse dentro del entorno.

Los dispositivos que soportan 3DoF suelen ser más accesibles y no requieren sensores externos o cámaras adicionales, lo que los hace prácticos para visualización básica.

- B. 6DoF (Six Degrees of Freedom): Además de los tres grados de libertad del formato 3DoF, este tipo de interacción permite al usuario desplazarse físicamente en el espacio

virtual. Los tres grados adicionales corresponden a:

- a. Traslación en el eje X: Moverse hacia la izquierda o la derecha.
- b. Traslación en el eje Y: Moverse hacia arriba o abajo.
- c. Traslación en el eje Z: Moverse hacia adelante o atrás.

Con 6DoF, el usuario puede caminar, agacharse o interactuar directamente con los objetos virtuales, lo que resulta útil para:

- a. Evaluar diseños dinámicos: Como simular cómo funciona una máquina en un entorno real.
- b. Explorar espacios: Como túneles en minería o maquetas arquitectónicas complejas.
- c. Simular interacciones físicas: Probar cómo un usuario manipularía herramientas o equipos dentro del entorno virtual.

Los dispositivos que permiten 6DoF suelen incluir sensores externos (como estaciones base o cámaras de rastreo) para detectar los movimientos físicos del usuario en tiempo real.

1.2.6. Realidad virtual en minería

La realidad virtual se ha ido integrando en la industria minera para mejorar la seguridad, capacitación, y planificación operativa. Los entornos mineros, que son inherentemente peligrosos, presentan desafíos significativos en términos de seguridad. La RV permite simular situaciones de riesgo y capacitar a los operarios sin exponerlos a condiciones peligrosas, lo que reduce significativamente los accidentes.

El Teniente, siendo la mina subterránea más grande del mundo, está en la vanguardia de este tipo de iniciativas, y aunque la integración total de RV aún está en desarrollo, se han reportado algunos programas piloto en los cuales la capacitación de operadores y simulación de escenarios complejos se realiza en entornos virtuales.

El uso de la tecnología está comenzando a tener un impacto, ya que, ha sido pionera en la modernización de sus operaciones mediante la implementación de nuevas técnicas. Se han hecho avances significativos en automatización y digitalización, como el uso de AutoMine® y maquinaria automatizada, el uso de la realidad virtual también se espera que vaya ganando terreno a futuro.

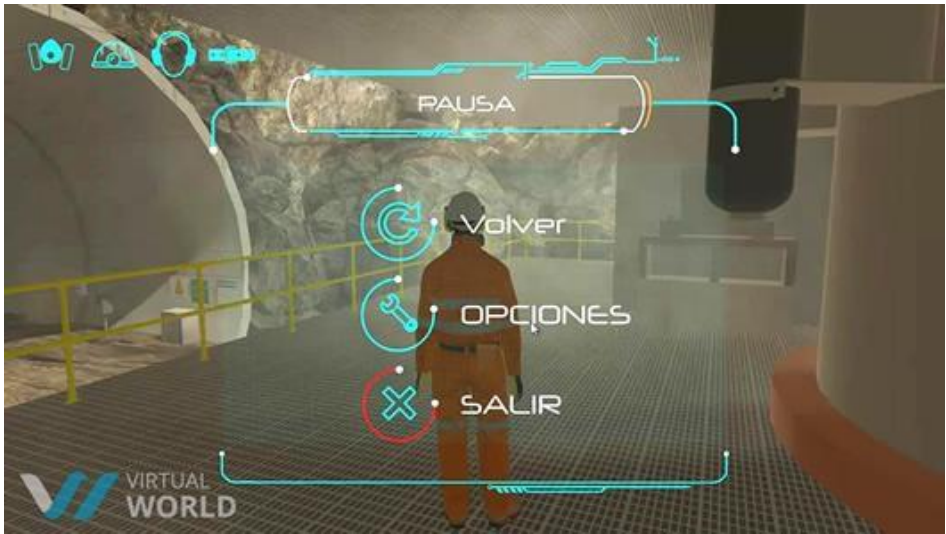
A. División andina - proyecto traspaso

En este proyecto, Codelco emplea la realidad virtual para realizar recorridos inmersivos por las áreas del proyecto, permitiendo a los colaboradores y ciudadanos conocer las operaciones mineras sin necesidad de estar físicamente presentes. Esto también ayuda en la capacitación y en la comprensión de las complejidades del proceso minero (Figura 1-4, 1-5).



Fuente: (VirtualWorld,2019).

Figura 1-4. Casos de éxito: Proyecto Traspaso Codelco. VirtualWorld.



Fuente: (VirtualWorld,2019).

Figura 1-5. Casos de éxito: Proyecto Traspaso Codelco. División Andina.

B. Minverso

Minverso es una plataforma desarrollada por Metaverso Chile que utiliza realidad virtual y el metaverso para la capacitación y operaciones mineras. Su enfoque permite que los trabajadores interactúen de forma segura con simulaciones de entornos mineros, facilitando el entrenamiento en situaciones de riesgo sin exposición real. La plataforma también emplea "gemelos digitales" y tecnologías como BIM e IoT para replicar operaciones en un entorno digital que se actualiza en tiempo real, optimizando así la planificación y la eficiencia (Figura1-6).



Fuente: Minverso (2023).

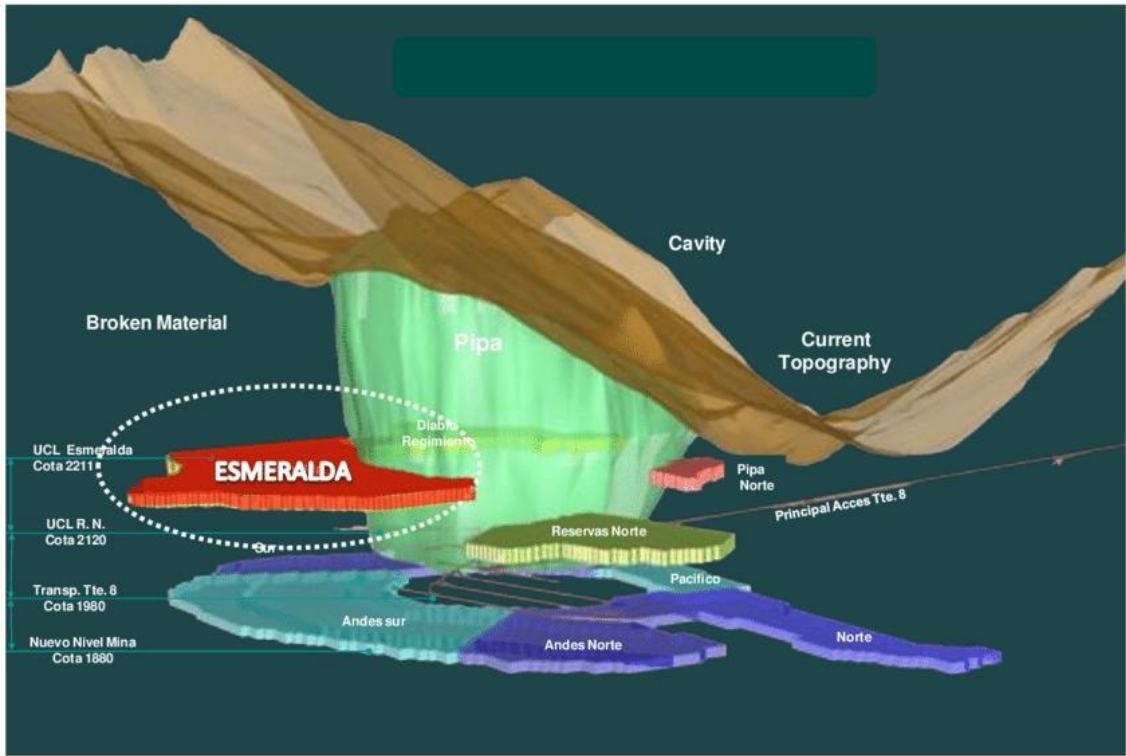
Figura 1-6. Minverso: Metaverso Minero.

1.2.7. Datos técnicos entregados por el mandante

Se presentan los datos esenciales para comprender las características, capacidades y desafíos operativos de la Mina Esmeralda. Estos datos incluyen información sobre su ubicación, extensión, historial de operación, niveles de trabajo y desarrollo de infraestructura.

A. Mina Esmeralda

La mina Esmeralda, está ubicada en el sector sur del yacimiento El Teniente, se extiende sobre una superficie de 629,000 m². Con un depósito de 348 millones de toneladas de mineral y una ley media de 1.014% de cobre total, esta mina representa un recurso clave para la operación minera subterránea. Sus actividades productivas comenzaron en septiembre de 1997, inicialmente con un ritmo de 1,000 toneladas por día (tpd). El nivel de hundimiento se encuentra a una cota de 2,210 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), el nivel de producción a 2,913 m.s.n.m., y el nivel de acarreo a 2,163 m.s.n.m. Hasta la fecha, se han desarrollado 20,912 metros lineales en excavaciones horizontales y 3,733 metros lineales en desarrollos verticales. (Mas Errázuriz, 2024) (Codelco, 2018) (Arce, 2015) (Figura 1-7).



Fuente: (Cuello, P., Escobar, C., & Vargas, R., 2010).

Figura 1-7. Sectores productivos, Mina Esmeralda, El Teniente.

1.3. IMPACTO RELACIONADO CON EL PROYECTO

Se analizarán los efectos en términos de seguridad, eficiencia, estabilidad estructural, mantenimiento, y los beneficios que traerá la implementación de nuevas tecnologías, incluida la visualización en realidad virtual como medio de visualización de prototipo, para mejorar la calidad y reducir costos operativos.

A. Impacto en la empresa

a. Seguridad

El nuevo equipo será visualizado en un entorno virtual simulado, lo que permitirá a los operarios observar su funcionamiento sin exponerse a riesgos reales, disminuyendo la probabilidad de accidentes laborales. Además, al considerar las normativas de seguridad desde el diseño, se fomenta un entorno de trabajo más seguro.

b. Eficiencia operativa

El equipo automatizado mejorará la velocidad de instalación de los marcos, optimizando el proceso de fortificación. La visualización virtual permitirá evaluar su funcionamiento de forma anticipada, facilitando decisiones informadas para su implementación.

c. Consistencia y precisión

La realidad virtual facilitará la comprensión de la mecánica y el funcionamiento del equipo, así como del entorno donde será utilizado. Esto asegura una instalación más uniforme y precisa, mejorando la calidad del soporte estructural.

d. Mantenimiento

El modelo virtual del equipo permitirá anticipar posibles dificultades de mantenimiento y planificar soluciones preventivas antes de su implementación real, reduciendo tiempos de detención y costos asociados.

B. Impacto en la producción

a. Continuidad de la operación

La visualización en realidad virtual permite anticipar el uso del equipo en un entorno seguro, lo que reduce posibles interrupciones en la operación real. Esto disminuye el tiempo de adaptación en terreno, contribuyendo a una mayor continuidad operativa.

b. Mejora en la Eficiencia de Capacitación y Productividad

La simulación virtual apoya la comprensión general del sistema por parte del personal, lo que favorece una mejor preparación operativa y permite reducir errores asociados al desconocimiento técnico.

c. Aumento en la Seguridad y Reducción de Accidentes

La visualización anticipada de escenarios operativos permite prever situaciones críticas que podrían afectar la productividad, fortaleciendo así la planificación de recursos y actividades en la mina.

C. Impacto económico

a. Optimización de costos operativos

El uso de realidad virtual para la visualización de proyectos reduce significativamente los costos asociados al desarrollo y planificación. Al evitar la creación de prototipos físicos y prever errores en etapas tempranas, se minimizan los gastos por correcciones posteriores. Además, esta tecnología optimiza procesos de ingeniería y planificación, acelerando la toma de decisiones y reduciendo el tiempo necesario para implementar soluciones.

D. Impacto en los trabajadores

a. Seguridad

La visualización del equipo y del entorno minero en realidad virtual permite analizar previamente zonas de riesgo, reduciendo la exposición a condiciones peligrosas y mejorando el bienestar físico y mental de los trabajadores.

b. Formación y Desarrollo

Aunque el entorno no es interactivo, la visualización inmersiva permite una mejor comprensión del diseño y uso del equipo, facilitando la asimilación de conocimientos técnicos clave para su futura operación en terreno.

1.4. **ANÁLISIS FODA**

Se identificarán las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del proyecto, para facilitar una visión integral del contexto interno y externo, ayudando a tomar decisiones fundamentadas para maximizar el potencial y minimizar los riesgos.

A. Fortalezas

- a. Innovación tecnológica, al incorporar realidad virtual inmersiva para simular la operación de la maquinaria y su funcionamiento en el entorno minero. Esto permite optimizar el diseño y evaluar su desempeño antes de la implementación física.
- b. Diseño especializado, mediante el desarrollo de una máquina diseñada específicamente para la movilización e instalación de marcos prefabricados de hormigón, mejorando la eficiencia en los procesos de fortificación en el entorno subterráneo de la mina.
- c. Aumento de seguridad operativa, ya que la visualización anticipada del funcionamiento del equipo reduce la exposición del personal a áreas de alto riesgo, minimizando accidentes y mejorando las condiciones laborales en la mina.
- d. Capacidad de simulación en entornos virtuales, el uso de realidad virtual para analizar y perfeccionar el diseño de la máquina permite detectar y corregir errores sin necesidad de realizar pruebas en campo, lo que reduce costos y riesgos.
- e. Compatibilidad con el entorno minero, la máquina está diseñada para operar de manera eficiente en las condiciones geológicas y estructurales del yacimiento, garantizando su funcionalidad en espacios subterráneos complejos.

B. Oportunidades

- a. Incremento en la demanda de tecnologías sostenibles: la creciente necesidad de mejorar la productividad y reducir el impacto ambiental en operaciones mineras

abre oportunidades para introducir una máquina innovadora y eficiente que cumpla con estándares sostenibles.

- b. Ampliación del mercado hacia nuevas industrias: la tecnología desarrollada, junto con el uso de realidad virtual, puede adaptarse a sectores como la construcción, donde la instalación de estructuras prefabricadas también es clave.
- c. Avances en simulación virtual: la disponibilidad de tecnologías de realidad virtual ofrece una oportunidad para validar diseños en entornos controlados antes de su fabricación, reduciendo riesgos y facilitando la adopción de soluciones innovadoras.
- d. Diferenciación competitiva: al integrar tecnologías avanzadas como la realidad virtual inmersiva y la automatización en minería subterránea, la solución puede posicionarse como líder en innovación.

C. Debilidades

- a. Requiere conocimientos técnicos avanzados: el uso de realidad virtual y software de diseño especializado demanda competencias en modelado 3D, simulación y programación, lo cual puede representar una limitación si no se cuenta con personal capacitado en estas herramientas.
- b. Dependencia tecnológica: el desarrollo del proyecto depende del funcionamiento correcto y compatibilidad entre distintas plataformas digitales, como Unity y Fusion 360, lo que puede generar problemas si ocurren fallos técnicos o actualizaciones imprevistas.
- c. Recursos limitados para interacción avanzada: la simulación desarrollada no permite una interacción completamente inmersiva en tiempo real, debido a la complejidad técnica que implica su implementación, lo que restringe la experiencia a una visualización guiada mediante video.

D. Amenazas

- a. Competencia en la industria: otras empresas podrían desarrollar proyectos similares que integren automatización y realidad virtual para aplicaciones mineras, disminuyendo la ventaja competitiva del equipo y limitando su posicionamiento en el mercado.
- b. Impacto social y laboral: la automatización del proceso de fortificación podría ser percibida como una amenaza para los trabajadores, puede generar reducción de empleos en tareas manuales repetitivas, afectando a trabajadores no calificados. Esto podría provocar resistencia sindical, conflictos laborales y necesidad de reconversión laboral. Sin embargo, también exige implementar programas de capacitación para que el personal pueda adaptarse a nuevos roles técnicos, disminuyendo los efectos negativos.

- c. Dependencia de proveedores tecnológicos: el éxito del equipo depende de la disponibilidad de tecnologías avanzadas y servicios de soporte técnico, lo que podría generar vulnerabilidad frente a problemas de suministro, actualizaciones o costos asociados a los proveedores.

1.5. ANÁLISIS ESTRATÉGICO CPC

En el contexto del proyecto, se han identificado dos áreas fundamentales de necesidad: la implementación de un equipo automatizado para optimizar el proceso de instalación de marcos prefabricados de hormigón, y la inclusión de la realidad virtual (RV) como herramienta de visualización para apoyar la evaluación y proyección del sistema.

Por esta razón, se detallan las causas, problemas y consecuencias asociadas con la falta de automatización en la instalación de marcos, destacando cómo esto afecta la eficiencia y la seguridad en las operaciones mineras. A su vez, se plantea el uso de la realidad virtual no como un sistema de entrenamiento directo, sino como una herramienta para visualizar tanto el diseño como el desempeño del equipo dentro de un entorno simulado.

La realidad virtual inmersiva no interactiva permite analizar el comportamiento del equipo en un entorno tridimensional digital antes de su implementación física, reduciendo riesgos operativos y permitiendo detectar fallos o necesidades de ajuste en etapas tempranas del diseño. Asimismo, esta visualización contribuye a la planificación estratégica, facilitando una comprensión más clara de las condiciones operativas del entorno minero, y asegurando que el equipo propuesto cumpla con los estándares técnicos y de seguridad requeridos (Tabla 1-2).

Tabla 1-2. CPC automatización en la instalación de marcos.

CAUSA	PROBLEMA	CONSECUENCIA
✓ Necesidad de un equipo para transportar e instalar marcos prefabricados de hormigón para optimizar el proceso de fortificación minera, y el uso de realidad virtual para visualizar.	✓ El proceso manual actual es ineficiente, peligroso y carece de una etapa previa de visualización. ✓ Los equipos existentes no permiten la instalación automatizada ni múltiple de marcos. ✓ No se dispone de herramientas para visualizar anticipadamente el uso del equipo en un entorno minero. ✓ No se cuenta con una representación virtual clara del diseño del sistema, dificultando la identificación de posibles fallos antes de su implementación. ✓ Falta una herramienta que facilite la planificación operativa y logística en un entorno digital simulado.	✓ Tiempos prolongados de instalación. ✓ Mayor costo operativo por falta de simulación y automatización. ✓ Mayor riesgo de accidentes y baja preparación en escenarios complejos. ✓ Baja productividad y discontinuidad en las labores. ✓ Pérdidas económicas por errores no anticipados. ✓ Dificultades en la planificación por falta de análisis visual previo. ✓ Aumento de costos por correcciones tardías que podrían haberse detectado en una etapa de simulación visual.

Fuente: Elaboración propia

1.6. DIAGNÓSTICO Y METODOLOGÍA

El diagnóstico identifica que la maquinaria actual de Codelco no es adecuada para optimizar el proceso de fortificación. La metodología propondrá el diseño de un equipo automatizado que, además de mejorar la seguridad y eficiencia, incluirá la simulación en realidad virtual. Esto permitirá a los operarios observar de manera segura, reducir tiempos y minimizar los riesgos operativos asociados a la instalación de marcos prefabricados de hormigón.

1.6.1. Definición de situación sin proyecto

La maquinaria actualmente utilizada por la empresa Codelco, División El Teniente, no cumple con los requerimientos necesarios para optimizar el proceso de fortificación minera. Estos equipos no están diseñados para responder a las condiciones actuales de operación, especialmente en zonas de alta sismicidad como las faenas donde se desarrolla este proyecto.

No existe un sistema que permita transportar e instalar varios marcos prefabricados

de hormigón armado de forma automatizada, lo que obliga a realizar estas tareas manualmente, incrementando significativamente los riesgos asociados a deslizamientos, derrumbes y otros eventos geológicos. Esta situación compromete tanto la seguridad como la estabilidad estructural del entorno de trabajo, afectando directamente a los operarios.

La ausencia de un equipo especializado también se traduce en fallos operativos frecuentes, debido a la falta de precisión, mayores tiempos de instalación y elevados niveles de riesgo laboral. Las tecnologías de fortificación actualmente disponibles requieren mejoras sustanciales en eficiencia, precisión y reducción de tiempos de ejecución.

Además, no se cuenta con herramientas tecnológicas que permitan visualizar o analizar anticipadamente el diseño del equipo y su funcionamiento en un entorno simulado. La falta de integración de realidad virtual como medio de apoyo en la validación del diseño impide anticipar fallos, evaluar el desempeño del equipo y comprender su proyección dentro del entorno minero. Esto dificulta la toma de decisiones estratégicas y aumenta la probabilidad de errores en etapas tempranas, afectando directamente la seguridad, la continuidad operativa y la productividad general de las labores subterráneas.

La capacidad de producción:

- A. Capacidad de transporte: 1/3 de marco prefabricado.
- B. Cantidad de producción por minuto: Irregular depende del operador.

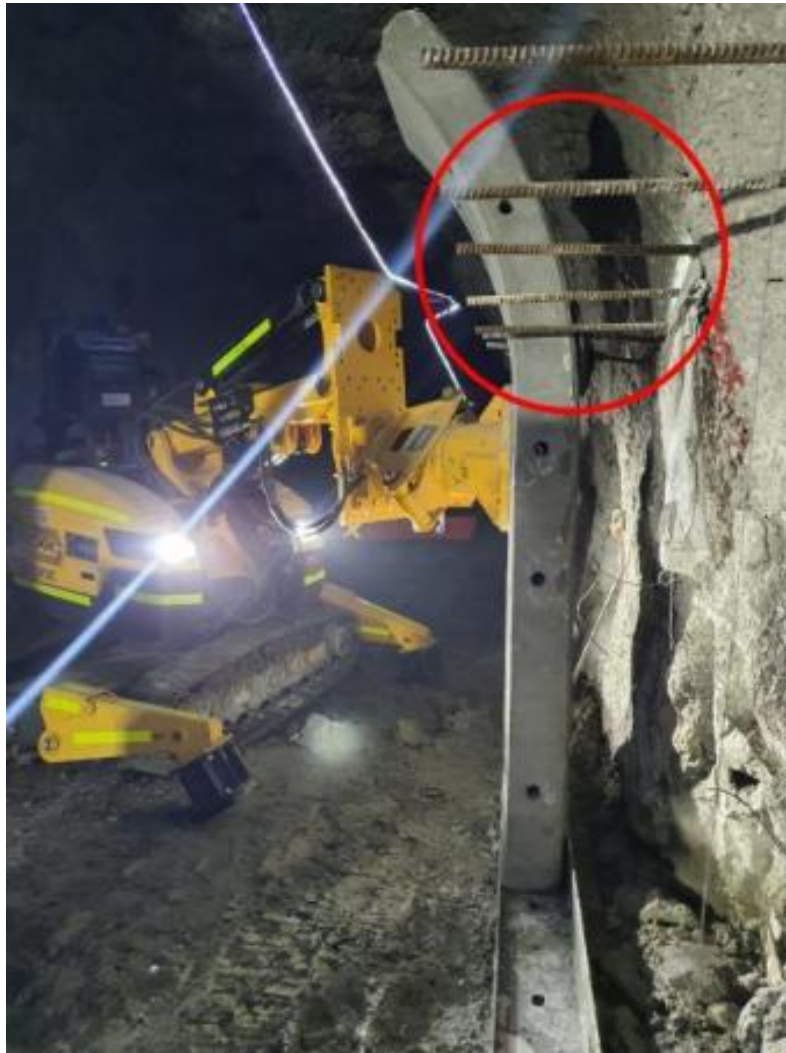
La máquina existente que instala marcos prefabricados de hormigón lo hace en secciones, es decir, en tercios del marco completo. Debido a las limitaciones de tamaño y peso del equipo, este transporta y coloca una parte del marco a la vez. Cada tercio se ajusta de forma precisa para garantizar una instalación correcta y segura (Figura 1-8).



Fuente: (GOBM, 2023)

Figura 1-8. Instalación de marcos prefabricados mediante brokk.

Luego de dejar un tercio del marco, la máquina procede a instalar la barra de acero que posteriormente es reforzada con una planchuela y tuerca. Para que el marco quede completamente instalado, el equipo Brokk debe completar la instalación de tres barras de acero en diferentes ángulos. Por último, se avanza instalando de máximo tres metros, ya que existe un riesgo muy alto para los operarios por las condiciones geológicas. Esto corresponde a las obras en montaje, específicamente al método de fortificación actual de las faenas solicitantes (Figura 1-9).



Fuente: (GOBM, 2023)

Figura 1-9. Instalación de varillas de acero.

Las obras posteriores corresponden al relleno con hormigón proyectado, comúnmente llamado shotcrete, el cual refuerza y rellena espacios para poder sellar completamente las zanjas y calles subterráneas (Figura 1-10).



Fuente: (GOMB, 2023)

Figura 1-10. Relleno de hormigón proyectado.

1.6.2. Definición de situación con proyecto

Con el diseño de la nueva máquina y su representación mediante realidad virtual (RV), el enfoque se centra en la automatización del proceso de instalación de marcos prefabricados de hormigón y en su análisis dentro de un entorno simulado. Esta solución permitirá evaluar previamente el desempeño del equipo en un escenario subterráneo minero, optimizando la eficiencia, versatilidad y productividad de las operaciones.

A. Eficiencia en el proceso de instalación de marcos prefabricados de hormigón

El nuevo equipo permitirá la instalación simultánea de cuatro marcos prefabricados, lo que reducirá considerablemente los tiempos de instalación. Estos marcos serán instalados y armados sin necesidad de ensamblaje en sitio, lo que aumentará la velocidad del proceso. Además, el equipo será controlado remotamente mediante un sistema automatizado, lo que asegura una mayor seguridad y control del proceso. Con la automatización del procedimiento, se minimizará la intervención manual, reduciendo errores humanos y mejorando la precisión general del sistema.

B. Durabilidad del equipo

El diseño del equipo considerará el uso de materiales óptimos para soportar las condiciones extremas del entorno subterráneo. Al estar construido con acero de alta resistencia, será capaz de soportar cargas elevadas y resistir el desgaste provocado por la operación en minas. Esto asegurará una mayor vida útil del equipo, disminuyendo la necesidad de mantenimientos frecuentes.

C. Versatilidad

El equipo será altamente versátil, adaptándose a distintas dimensiones de marcos prefabricados de hormigón, según el área de trabajo. Contará con un diseño que permitirá rotación sobre su propio eje y desplazamientos en diversas direcciones, facilitando su uso en espacios reducidos y geometrías complejas. La representación en RV permitirá visualizar y analizar su desempeño en distintos escenarios subterráneos, asegurando que el diseño responda adecuadamente a las condiciones específicas del entorno, lo que contribuirá a un proceso más eficiente y seguro.

D. Aumento de la producción

La incorporación de la realidad virtual en el proyecto permitirá observar tanto el entorno minero como el diseño del equipo en un ambiente tridimensional controlado. Esta herramienta facilitará la comprensión de las condiciones geológicas, espaciales y estructurales del entorno, ayudando a anticipar desafíos relacionados con la operación del equipo. Además, al visualizar el diseño de forma inmersiva, se podrán realizar evaluaciones tempranas que garanticen su compatibilidad con el entorno subterráneo, reduciendo tiempos y costos por ajustes posteriores.

1.6.3. Metodología Stage-Gate

Esta metodología es un enfoque estructurado que divide el desarrollo de proyectos en etapas secuenciales, separadas por puntos de decisión denominados "gates". Este método permite evaluar y validar cada etapa antes de avanzar, asegurando un control riguroso y reduciendo riesgos. Se abordarán los pasos y cómo se aplican al diseño del equipo en un entorno minero, asegurando que se cumplan los objetivos de eficiencia, seguridad y sostenibilidad.

A. Etapa 1: Descubrimiento e Investigación

- a. Objetivo: Comprender las necesidades del proceso y los problemas a resolver.
- b. Actividades:
 - i. Recopilar información sobre las condiciones del entorno minero (geología, espacio disponible, necesidades operativas).
 - ii. Identificar las limitaciones del proceso manual actual y de los equipos existentes utilizados para instalar marcos prefabricados.
 - iii. Definir cómo la realidad virtual inmersiva puede aportar valor como herramienta de visualización del entorno y del equipo, identificando los requerimientos técnicos asociados.
- c. Herramientas: Análisis documental, benchmarking, análisis de casos similares.
- d. Resultados esperados:
 - i. Documento de requisitos que detalle las funcionalidades necesarias de la máquina.

- ii. Definición clara de los objetivos del uso de realidad virtual como medio de visualización técnica.
- e. Gate: Evaluación del caso de negocio y viabilidad inicial. Decisión de avanzar al desarrollo conceptual.

B. Etapa 2: Generación de Conceptos

- a. Objetivo: Desarrollar un diseño conceptual claro y viable.
- b. Actividades:
 - i. Crear un boceto inicial del diseño basado en los requisitos definidos en la Etapa 1.
 - ii. Desarrollar un modelo preliminar en CAD para representar la máquina y su configuración básica.
 - iii. Visualizar el diseño preliminar mediante realidad virtual inmersiva no interactiva para verificar su integración con el entorno minero y realizar ajustes necesarios.
 - iv. Validar que el concepto cumpla con los objetivos funcionales, operativos y técnicos.
- c. Herramientas: Software de diseño CAD, herramientas de RV para visualizar modelos 3D.
- d. Resultados esperados:
 - i. Propuesta de diseño conceptual.
- e. Gate: Selección del diseño conceptual más viable y alineado con los objetivos del proyecto.

C. Etapa 3: Diseño Detallado

- a. Objetivo: Desarrollar un modelo técnico completo y funcional.
- b. Actividades:
 - i. Crear un modelo detallado en CAD del diseño seleccionado.
 - ii. Visualizar el diseño detallado mediante VR inmersa no interactiva, evaluando cómo interactúa con el entorno minero.
 - iii. Realizar análisis estructurales, dinámicos y de materiales para garantizar la durabilidad y resistencia.
 - iv. Integrar el sistema de teleoperación en el diseño de la máquina.
 - v. Ajustar detalles ergonómicos y operativos basados en los resultados de la visualización.
- c. Herramientas: Simulación en CAD, software unity de realidad virtual para evaluar interacción, análisis FEA (análisis de elementos finitos).
- d. Resultados esperados:
 - i. Modelo técnico.

- ii. Identificación de posibles ajustes antes de la validación.
- e. Gate: Revisión exhaustiva del diseño técnico y validación para prototipado.

D. Etapa 4: Prototipado y Pruebas

- a. Objetivo: Validar el diseño a través de prototipos y pruebas controladas en un entorno virtual.
- b. Actividades:
 - i. Generar un modelo interactivo y visualizar en software CAD para pruebas específicas.
 - ii. Realizar pruebas funcionales del prototipo en un entorno virtual, evaluando maniobrabilidad, dimensiones y ergonomía.
 - iii. Identificar problemas de diseño o funcionamiento y realizar los ajustes necesarios.
- c. Herramientas: Prototipado virtual, simulaciones en realidad virtual.
- d. Resultados esperados:
 - i. Prototipo ajustado y validado.
 - ii. Lista de modificaciones finales.
- e. Gate: Aprobación del prototipo tras las pruebas funcionales y validación del diseño para fabricación.

E. Etapa 5: Implementación

- a. Objetivo: Fabricar e instalar la máquina en el entorno minero real.
- b. Actividades:
 - i. Fabricación del equipo siguiendo el diseño final validado.
 - ii. Instalación y configuración del equipo en la faena minera.
 - iii. Capacitar al equipo de operadores en el uso del equipo mediante el manual de operación y prácticas en el entorno físico.
 - iv. Supervisar las operaciones iniciales y realizar ajustes menores en el campo.
- c. Herramientas: Planificación de fabricación, supervisión en campo.
- d. Resultados esperados:
 - i. Máquina completamente operativa e integrada en las operaciones de la mina.
 - ii. Informe final de desempeño.
- e. Gate: Evaluación final del proyecto y cierre.

1.7. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROYECTO

En esta sección se mostrarán las especificaciones técnicas utilizadas en el diseño del proyecto, para poder realizar de forma correcta el trabajo con los estándares requeridos.

A. Funcionalidad del equipo

- a. Propósito principal
 - i. Transportar e instalar simultáneamente hasta cuatro marcos prefabricados de hormigón armado en túneles, optimizando los tiempos de fortificación minera.
- b. Principales funciones
 - i. Capacidad de transportar marcos prefabricados ya armados hasta su punto de instalación.
 - ii. Instalación automática de marco completo con precisión, reduciendo la intervención manual.
 - iii. Operación controlada de forma remota para garantizar la seguridad de los operadores.
- c. Características técnicas
 - i. Longitud: 6 metros máximo.
 - ii. Ancho: 3.8 metros máximo.
 - iii. Altura: 3.8 metros máximo.
 - iv. Capacidad de carga: Hasta 100 toneladas (considerando cuatro marcos de 25 toneladas cada uno).
- d. Materiales
 - i. Estructura principal: Acero de alta resistencia A36.
 - ii. Revestimientos: Recubrimientos anticorrosivos para operación en ambientes húmedos y corrosivos.
- e. Sistema de movimiento
 - i. Tracción: Ruedas oruga para adaptarse a terrenos irregulares.
 - ii. Motor eléctrico: Alimentación por baterías de litio de alta capacidad.
 - iii. Sistema de dirección: Hidráulico asistido para maniobrabilidad en espacios reducidos.
- f. Sistema de instalación:
 - i. Brazos hidráulicos con sensores de precisión para posicionar los marcos en su lugar.

1.8. NORMAS NACIONALES

Para garantizar que el diseño y la implementación del equipo cumpla con los estándares técnicos y de seguridad requeridos, se consideran las siguientes normativas nacionales chilenas aplicables.

A. Normas de Seguridad y Salud Ocupacional

- a. Ley N° 16.744 sobre Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales: Regula la prevención de riesgos laborales y establece obligaciones para garantizar la seguridad en las faenas mineras. El diseño de la máquina deberá minimizar los riesgos para los operadores (Gobierno de Chile, 1968).
- b. Decreto Supremo N° 132 del Ministerio de Minería : Establece condiciones de seguridad para operaciones mineras subterráneas, exigiendo que los equipos sean seguros y estables en condiciones extremas (Ministerio de Minería, 2002).

B. Normas Técnicas para el Diseño y Fabricación

- a. NCh204 Of.2006 (Norma Chilena de Diseño Estructural en Acero): Define los requisitos para el diseño estructural en acero, aplicables a los materiales utilizados en la máquina para garantizar su resistencia en condiciones mineras (Instituto Nacional de Normalización [INN], 2006).
- b. NCh429/1:2020 (Norma de Hormigón - Requisitos Generales): Especifica los estándares para marcos de hormigón armado, asegurando su calidad y durabilidad en aplicaciones subterráneas (INN, 2020).

C. Normas Ambientales

- a. Ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente: Exige medidas para reducir los impactos ambientales asociados a la operación de maquinaria, como emisiones y ruido (Ministerio del Medio Ambiente, 1994).
- b. DS N° 40/2013 - Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA): Establece los criterios para evaluar el impacto ambiental de nuevos proyectos en minería, incluyendo el uso de maquinaria automatizada (Ministerio del Medio Ambiente, 2013).

D. Normas Eléctricas y de Automatización

- a. NCh4/2003 (Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión): Regula las instalaciones eléctricas de equipos, asegurando que cumplan con estándares nacionales de seguridad (INN, 2003).

- b. NCh Elec 2000 (Reglamento Eléctrico Chileno): Especifica los requisitos técnicos para instalaciones eléctricas y automatización en entornos industriales (INN, 2000).
- c. DS N° 10 del Ministerio de Minería: Requiere que los sistemas automatizados cuenten con medidas de redundancia y sistemas de emergencia para operar de manera segura en minas subterráneas (Ministerio de Minería, 2012).

E. Normas Relativas a la Realidad Virtual

- a. Ley de Protección de Datos Personales (Ley N° 19.628): Garantiza la protección de los datos personales utilizados en simulaciones o visualizaciones en realidad virtual, aplicables al análisis del entorno minero (Gobierno de Chile, 1999).
- b. Normativa ISO 9241-210: Adoptada en Chile como estándar para la interacción humano-computador, asegura que los sistemas de visualización en realidad virtual sean efectivos y seguros para los operadores (ISO, 2010).

1.9. NORMAS INTERNACIONALES

Para garantizar que el diseño y la implementación del equipo cumpla con los estándares técnicos y de seguridad requeridos, se consideran las siguientes normativas internacionales aplicables.

A. Normas de Seguridad

- a. ISO 12100:2010 (Seguridad de las máquinas: Principios generales de diseño y evaluación de riesgos): Proporciona un marco para identificar y mitigar riesgos asociados con el diseño y uso de maquinaria automatizada, aplicable a las condiciones de operación minera subterránea. (International Organization for Standardization [ISO], 2010)
- b. ISO 45001:2018 (Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo): Establece los requisitos para un sistema de gestión que garantice un entorno seguro, minimizando los riesgos para los operadores de la máquina. (ISO, 2018)

B. Normas Técnicas de Materiales y Fabricación

- a. ISO 20683-1:2019 (Diseño y cálculo estructural de componentes de acero): Aplicable al diseño de componentes de acero para maquinaria pesada, asegurando su resistencia y durabilidad. (ISO, 2019)

- b. ASTM C150/C150M-21 (Especificación estándar para cemento portland): Regula los requisitos de calidad para el cemento utilizado en los marcos prefabricados de hormigón armado. (ASTM International, 2021)
- c. ISO 22965:2021 (Concreto: Requisitos para mezclas de concreto prefabricado): Establece los estándares de calidad y propiedades mecánicas para hormigón prefabricado, adecuado para aplicaciones mineras. (ISO, 2021)

C. Normas de Automatización

- a. IEC 61508 (Seguridad funcional de sistemas eléctricos/electrónicos programables relacionados con la seguridad): Define los requisitos de seguridad funcional para sistemas automatizados, asegurando que los sistemas de teleoperación sean confiables y seguros. (International Electrotechnical Commission [IEC], 2010)
- b. ISO 10218-1:2011 (Robots y dispositivos robóticos): Especifica los requisitos de seguridad para el diseño de sistemas robóticos y automatizados en la industria minera. (ISO, 2011)

D. Normas de Realidad Virtual

- a. ISO 9241-210 (Ergonomía de la interacción humano-sistema): Proporciona directrices para diseñar sistemas de realidad virtual que garanticen una experiencia segura y efectiva para los usuarios. (ISO, 2010)
- b. IEEE 2784-2020 (Guía para la implementación de entornos inmersivos): Define las mejores prácticas para la creación y uso de entornos de realidad virtual, asegurando precisión y seguridad en el diseño. (Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE], 2020)

E. Normas Ambientales

- a. ISO 14001:2015 (Sistemas de gestión ambiental): Establece un marco para gestionar el impacto ambiental asociado con la operación de maquinaria en entornos mineros. (ISO, 2015)
- b. ISO 14040:2006 (Gestión ambiental: Evaluación del ciclo de vida): Proporciona lineamientos para evaluar el impacto ambiental de todo el ciclo de vida de la máquina, desde su fabricación hasta su desecho. (ISO, 2006)

CAPÍTULO 2: INGENIERÍA CONCEPTUAL

2. INGENIERÍA CONCEPTUAL

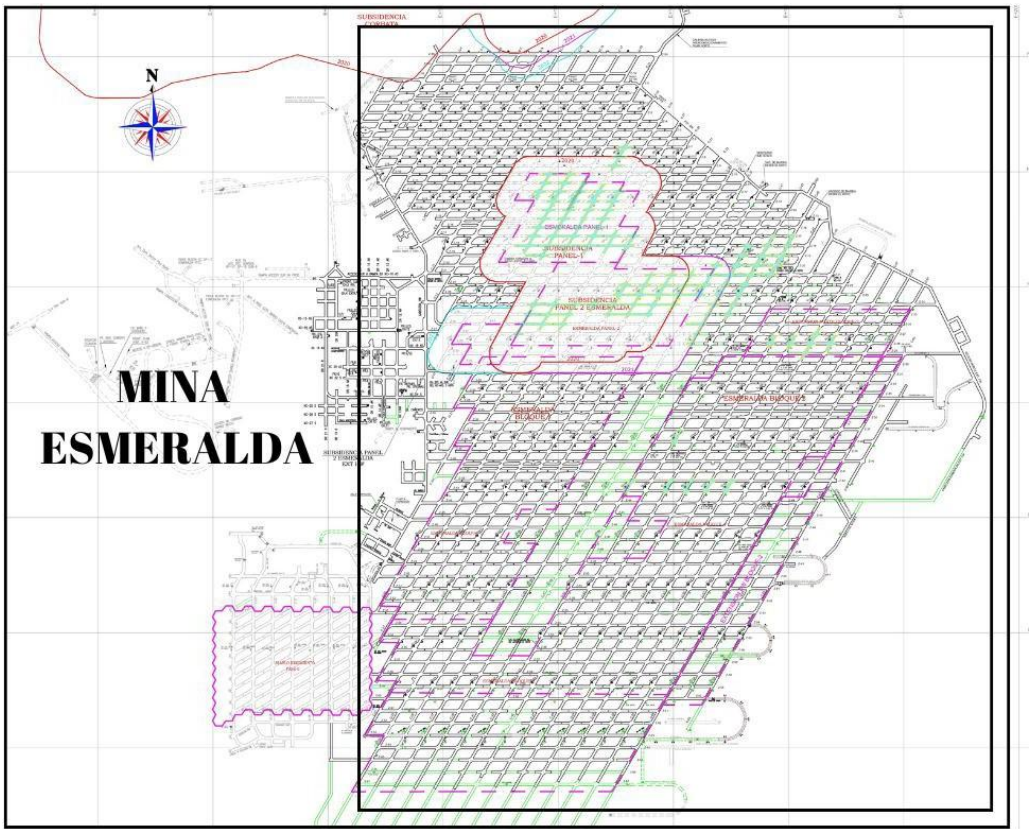
En este capítulo se aborda un enfoque integral para el diseño del equipo, identificando los requisitos y el alcance del proyecto. Se delinea la estructura general, incluyendo los procesos involucrados, los recursos necesarios y los factores clave, proporcionando una base sólida para el desarrollo del equipo y su implementación en el entorno de fortificación minera.

2.1. ESTUDIO TÉCNICO

El estudio técnico relacionado con el diseño del equipo automatizado se centra en el análisis operativo de este proceso. Se evalúa la viabilidad de su implementación, definiendo los recursos necesarios y diseñando los procedimientos de operación. Además, se determinarán las necesidades de materiales, tecnología y equipos virtuales para llevar el modelo a un entorno de realidad virtual, permitiendo su visualización y evaluación en un escenario simulado que asegure su capacidad, eficiencia y calidad antes de su fabricación real.

A. Faena solicitante mina Esmeralda

Al visualizar la distribución espacial de las áreas de trabajo, y los principales elementos involucrados como la disposición de las calles y zanjas la cuales se identifican como desarrollos verticales y horizontales respectivamente, de la mina Esmeralda se obtiene un contexto más claro para el diseño y la planificación de los sistemas automatizados de transporte e instalación de marcos prefabricados de hormigón. Para visualizar e identificar la zona de trabajo se observa el plano de la ubicación de correspondiente a la zona de producción (Figuras 2-1).



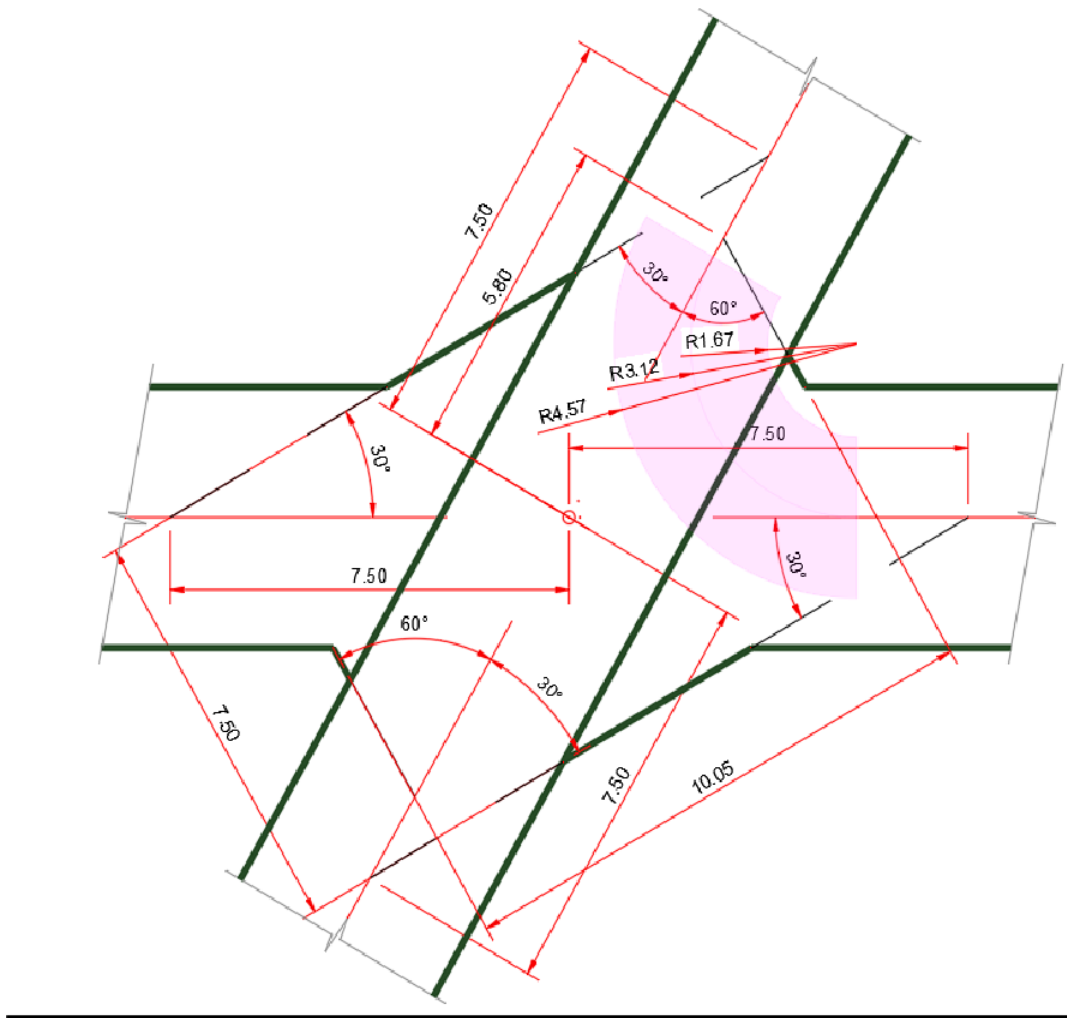
Fuente: (GOBM, 2023).

Figura 2-1. Distribución espacial Mina Esmeralda.

B. Tamaño de la máquina

Según el análisis de los túneles de las faenas se determina el espacio de las rotaciones que se realizan entre desarrollos.

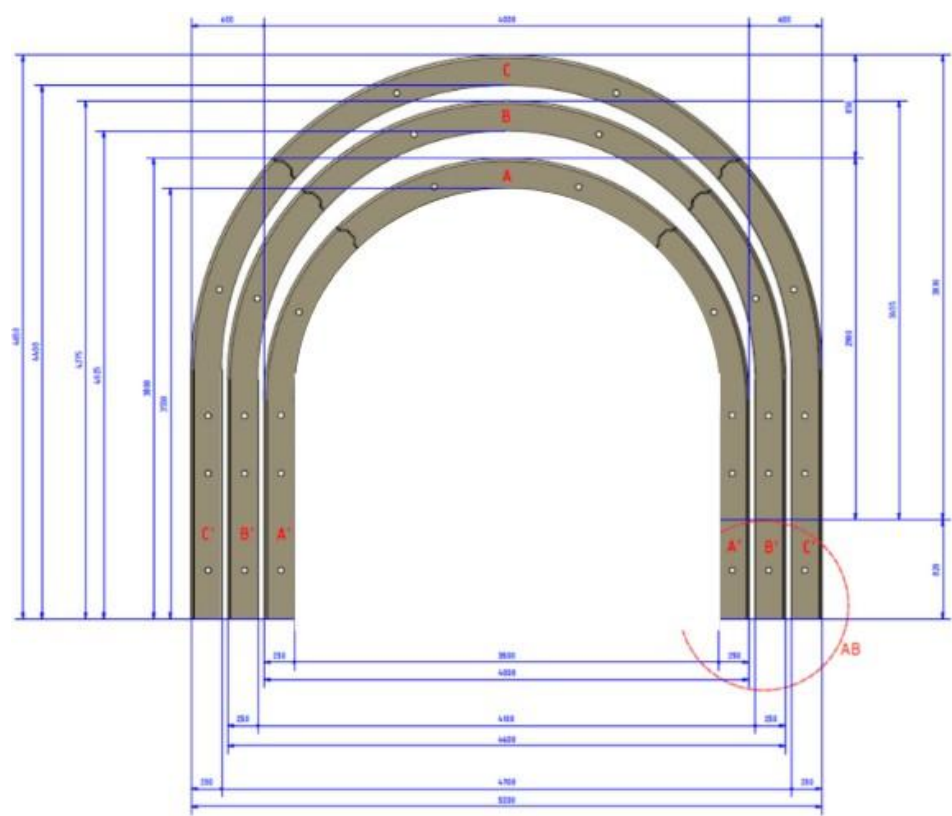
El equipo automatizado debe ser capaz de maniobrar eficientemente en el diseño de curvas mostrado, que incluye radios pequeños y ángulos cerrados. Esta capacidad de giro es crucial para que el equipo se desplace de forma precisa y sin problemas en espacios reducidos, asegurando su rendimiento en entornos subterráneos estrechos (Figura 2-2).



Fuente: (GOBM, 2023).

Figura 2-2. Diseño de curvas.

Existen diferentes medidas de marcos prefabricados de hormigón armado para las distintas faenas, el equipo debe ser capaz de adaptarse a las diversas dimensiones de estos marcos para desplazarlos adecuadamente y utilizarlos en la fortificación de calles y zanjas (Figura 2-3).



Fuente: (GOBM, 2023).
Figura 2-3. Marcos prefabricado de hormigón armado.

Los marcos prefabricados para poder ser instalados en la forma convencional se dividen en 3 fragmentos, de los cuales son instalados uno a uno mediante un equipo brokk.

Se realiza un detalle de las cargas dinámicas según tipo de marco para determinar los kilogramos totales que la máquina debe soportar (Tabla 2-1).

*

Tabla 2-1. Detalle de cargas dinámicas según tipo de marco.

Viga	Pilar	Portal	Marco
A	2A´	2 + 2A´	Total
1466 kg	2 × 1728 kg	4660 kg	18640 kg
B	2B´	2 + 2B´	
1796 kg	2 × 1877 kg	5550 kg	22200 kg
C	2C´	C + 2C´	
2098 kg	2 × 2025 kg	6148 kg	24592 kg

Fuente: (GOBM, 2023).

Se muestra un desglose detallado de las cargas dinámicas que diferentes tipos de marcos prefabricados de hormigón (A, B y C) ejercen sobre la máquina. Cada marco está compuesto por fragmentos de vigas, pilares y portales que suman una carga total específica para cada tipo de marco.

Este análisis es crucial para el diseño de la máquina, ya que permite calcular las cargas máximas que debe soportar al instalar estos marcos. La carga total de cada tipo de marco establece los requerimientos de resistencia y estabilidad de la estructura de la máquina. Por lo tanto, la tabla respalda la selección de materiales robustos y una estructura resistente que permita manejar con seguridad las variaciones en las cargas de los marcos durante la operación.

El marco tipo A ha sido seleccionado como el más adecuado para las condiciones operativas de la Mina Esmeralda debido a sus características estructurales y funcionales. Este marco está diseñado para manejar cargas dinámicas y estáticas en ambientes subterráneos, lo que lo hace ideal para el entorno altamente sísmico y propenso a derrumbes de esta mina.

2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Se identifican y detallan las etapas necesarias para entender el proceso de fortificado con el objetivo es optimizar la operación y asegurar la calidad y eficacia en la visualización del equipo en su contexto minero.

A. Zanjas

Las zanjas en minería tienen como objetivo principal facilitar el acceso inicial al yacimiento y proporcionar un camino para transportar el material extraído a las áreas de procesamiento o acopio. Estas se excavan en la superficie y se utilizan en las primeras etapas del desarrollo de una mina a cielo abierto.

Algunas de sus finalidades específicas son:

- a. Drenaje de agua: Ayudan a controlar el flujo de agua superficial, evitando inundaciones en la mina.
- b. Preparación para el desarrollo minero: Sirven como base para la excavación de galerías subterráneas en caso de minería mixta (superficie y subterránea).
- c. Acceso a la zona de extracción: Permiten el ingreso de maquinaria y vehículos al yacimiento.

B. Calles

Las calles en minería, también conocidas como galerías o niveles de producción, son túneles horizontales construidos dentro del yacimiento. Su finalidad principal es permitir el desarrollo de operaciones mineras subterráneas.

Entre sus propósitos están:

- a. Transporte de material: Facilitan el traslado del material extraído desde el punto de explotación hasta los accesos principales o áreas de acopio.

- b. Seguridad y ventilación: Sirven como rutas de escape en caso de emergencias y ayudan a mantener el flujo de aire dentro de la mina.
- c. Estabilidad estructural: Forman parte del diseño de soporte del yacimiento, manteniendo la seguridad durante la extracción.
- d. Acceso a zonas de extracción: Conectan diferentes áreas del yacimiento para facilitar las operaciones.

C. Método de fortificación en minas a trabajar

- a. Obras Previas
 - i. Desquinche, limpieza y escarpe.
 - ii. Emplantillado con nivelación.
 - iii. Topografía para los puntos de extracción.
- b. Obras de Montaje
 - i. Perforación y lechado de pernos caja.
 - ii. Instalación de tuerca tope y montaje de herrajes en emplantillado.
 - iii. Montaje de pilares y vigas.
 - iv. Instalación de planchuela, tuerca final y pernos banana.
 - v. Instalación de conectores transversales en vigas y pilares.
- c. Obras Posteriores
 - i. Relleno de hormigón.
 - ii. Perforación e instalación de pernos de anclaje.
 - iii. Montaje de muros de confinamiento.

Este método de fortificación se aplica tanto a zanjas como a calles, asegurando la estabilidad de los desarrollos mineros. En ambos casos, se realizan las obras previas, posteriormente, se ejecutan las obras de montaje, y finalmente, se completan las obras posteriores, garantizando la cohesión estructural.

En el caso específico de las zanjas, tras completar el fortificado previo, se realiza la instalación de marcos prefabricados utilizando un equipo Brokk, que permite manejar de manera eficiente la instalación en espacios reducidos. Este proceso se lleva a cabo cada 3 metros, avanzando progresivamente: primero se fortifican 3 metros, luego se instalan los marcos prefabricados, y así sucesivamente. Este método asegura una construcción estable y secuencial, adaptada a las condiciones del entorno minero.

D. Diferencias en características estructurales

Las zanjas y las calles presentan diferencias significativas en términos de características estructurales y geotécnicas, lo que explica por qué los marcos prefabricados se utilizan exclusivamente en las zanjas. Las zanjas son excavaciones más amplias y expuestas a fuerzas externas como presiones de suelo, agua y vibraciones. Además, suelen estar ubicadas en zonas con mayor inestabilidad geológica, como terrenos sueltos o rocas poco consolidadas. Estas condiciones requieren el uso de marcos prefabricados, que ofrecen una capacidad de soporte inmediato y alta resistencia frente a cargas dinámicas y fuerzas externas. Los marcos prefabricados actúan como estructuras robustas que aseguran la estabilidad durante las operaciones iniciales o en etapas críticas del desarrollo.

Por otro lado, las calles, al ser túneles internos y confinados dentro del macizo rocoso, presentan condiciones geológicas más estables en comparación con las zanjas. En estos casos, el macizo rocoso proporciona un soporte natural significativo, reduciendo la necesidad de estructuras voluminosas como los marcos prefabricados. En lugar de ello, se utilizan sistemas de fortificación más ligeros, como pernos de anclaje, mallas metálicas y shotcrete, que son suficientes para evitar desprendimientos menores y garantizar la estabilidad estructural en estas áreas.

2.3. SELECCIÓN DE EQUIPOS

Se presentan los criterios y herramientas seleccionados para asegurar que la simulación virtual y la visualización 3D del equipo automatizado cumplan con los requisitos técnicos, de compatibilidad y calidad necesarios para representar su funcionamiento en el entorno minero.

A. Criterios de selección de equipos

i. Rendimiento

Los equipos seleccionados deben ser capaces de manejar modelados tridimensionales complejos y visualizaciones en alta resolución sin pérdidas de calidad ni fluidez. Esto es especialmente importante en entornos que demandan representaciones precisas, como es el caso del entorno minero simulado en este proyecto. Tanto el hardware de desarrollo como los visores de realidad virtual deben permitir una experiencia inmersiva continua, sin interrupciones ni sobrecarga de procesamiento.

ii. Compatibilidad con Software

Es fundamental que los dispositivos de visualización sean compatibles con los formatos generados en el proceso de diseño y simulación. En este caso, se trabajó con herramientas de modelado tridimensional como lo es Fusión 360 y se generó un recorrido virtual del entorno minero mediante Unity para representar el funcionamiento del equipo

automatizado. Por tanto, el visor seleccionado debe ser capaz de reproducir este tipo de contenido visual de manera clara, inmersiva y sin requerir una infraestructura compleja.

B. Dispositivo seleccionado: OCULUS QUEST 2 para visualización de VR

El Oculus Quest 2 fue seleccionado como dispositivo de realidad virtual para visualizar el entorno minero y el equipo automatizado en un formato inmersivo no interactivo, esto permite comunicar eficazmente el diseño, las funcionalidades y la operación del equipo dentro del entorno minero, garantizando una experiencia inmersiva suficiente para fines de validación y presentación. Por razones técnicas, no se implementó una versión interactiva, priorizando una visualización clara y estable del proyecto. Esta elección responde a sus características técnicas, autonomía y facilidad de uso, lo que lo convierte en una herramienta adecuada para presentar el proyecto de manera clara, inmersiva y accesible. A continuación, se detallan las razones por las cuales se considera una opción conveniente:

i. Autonomía y facilidad de uso

Al tratarse de un visor autónomo, el Oculus Quest 2 no necesita estar conectado a un computador de alto rendimiento para funcionar, lo que permite una mayor flexibilidad en su uso. Esta característica lo hace ideal para visualizar recorridos virtuales preestablecidos, sin depender de cables ni dispositivos adicionales. Su configuración sencilla lo convierte en una opción práctica para presentar proyectos en entornos educativos o industriales.

ii. Compatibilidad con contenido generado

El visor permite reproducir visualizaciones en alta calidad generadas a partir de entornos diseñados en software especializado. Esto asegura que el recorrido virtual desarrollado para representar el diseño y funcionamiento del equipo pueda ser experimentado de forma inmersiva, favoreciendo la comprensión espacial del proyecto.

iii. Resolución y calidad gráfica

Con una resolución de 1832×1920 píxeles por ojo, el Oculus Quest 2 garantiza una excelente calidad de imagen. Esta resolución es clave para observar con claridad los detalles del entorno minero y del equipo diseñado, lo que facilita su evaluación visual y permite identificar posibles mejoras en su configuración.

C. Selección de software

Para la implementación de la visualización virtual, se utilizaron dos herramientas clave: Fusion 360 y Unity.

Fusion 360 fue empleado para el diseño de los componentes mecánicos del equipo. Su capacidad para realizar simulaciones de esfuerzos y validar la resistencia estructural permitió asegurar que los modelos fueran técnicamente viables antes de pasar a la etapa de representación visual. Además, la compatibilidad entre Fusion 360 y Unity facilitó la

exportación de los modelos en formato adecuado para su integración en un entorno tridimensional.

Unity, en tanto, se utilizó para construir la maqueta virtual del entorno minero y representar el funcionamiento del equipo automatizado. A través de esta plataforma se generó un recorrido guiado en el que un avatar transita por el entorno previamente diseñado, simulando el desplazamiento del equipo en condiciones de faena. Esta escena fue luego exportada como un video inmersivo, el cual puede visualizarse mediante un visor de realidad virtual, permitiendo una experiencia envolvente que refleja con precisión la interacción espacial entre la máquina y su contexto operativo.

Además, mediante el uso de scripts en C#, se programó el comportamiento del avatar para asegurar un recorrido fluido, coherente y representativo del uso real del equipo. Esta integración permitió desarrollar una representación visual clara y técnica, útil para comunicar el diseño de forma efectiva.

2.4. DETERMINACION DE INSUMOS

Se identifican los materiales, componentes y recursos necesarios para el diseño 3D del equipo automatizado para movilizar e instalar marcos, para asegurar disponibilidad, compatibilidad, calidad y asegurar la viabilidad técnica y económica del proyecto.

A. Hardware

i. Oculus Quest 2

Este visor de realidad virtual se utiliza para visualizar de manera inmersiva la representación del entorno minero y del equipo automatizado. A través de este dispositivo, es posible experimentar un recorrido virtual previamente desarrollado, lo que permite evaluar espacialmente el diseño y su integración en el contexto operativo sin necesidad de interacción directa (Figura 2-4)



Fuente: (Falabella, 2023).
Figura 2-4. Oculus Quest 2.

Es un dispositivo de realidad virtual (RV) desarrollado por Meta (anteriormente Facebook Technologies). Es un visor independiente, el cual no requiere conexión a una computadora o consola para funcionar, ya que integra su propio sistema operativo y hardware para ejecutar aplicaciones y experiencias de realidad virtual. Se detallan las características clave para justificar su elección como herramienta para simulación inmersa del proyecto, para garantizar una experiencia visual precisa y eficiente (Tabla 2-2).

Tabla 2-2. Especificaciones técnicas Oculus Quest 2.

CARACTERÍSTICAS	DETALLES
Peso	503 gramos.
Tipo de panel	LCD (pantalla tipo "fast-switch").
Resolución	1832 x 1920 píxeles por ojo.
Frecuencia de actualización	90 Hz (en modo predeterminado), 72 Hz en modo standalone.
Procesador	Qualcomm Snapdragon XR2.
Conectividad	Wi-Fi 6, Bluetooth 5.0, USB-C.
Entrada	Oculus Touch Controllers, comandos de voz, tracking manual.
Sonido	Altavoces integrados con sonido espacial, entrada jack 3.5 mm para auriculares.
Tracking	Inside-out (6 grados de libertad, 6DoF) mediante sensores integrados.
Elementos incluidos	Oculus Quest 2 visor, 2 Oculus Touch Controllers, cable de carga, separador para lentes de prescripción.

Fuente: (Meta, 2023).

Estas especificaciones garantizan que el dispositivo sea capaz de ofrecer una experiencia de alta calidad, con una resolución adecuada para observar detalles técnicos del diseño del equipo y una conectividad que facilita su integración con otros sistemas, como el software utilizado para la visualización desarrollado en Unity.Computadora de alto rendimiento

Para desarrollar y ejecutar la visualización del recorrido virtual de manera eficiente, se requiere una computadora con especificaciones de alto rendimiento. Estas deben cumplir o superar los requisitos mínimos recomendados por los dispositivos y software utilizados.

En este proyecto, se utilizará el equipo Notebook ASUS ROG Strix G16 G614JVR-N3107W como estación de trabajo principal. (Tabla 2-3)

Tabla 2-3. Especificaciones técnicas del dispositivo.

DESCRIPCIÓN	RECOMENDADO	MÍNIMO
Tarjeta gráfica	NVIDIA GeForce RTX 4060 (8GB GDDR6)	NVIDIA GTX 1060
Memoria RAM	16GB DDR5-5600 SO-DIMM (ampliable a hasta 32GB DDR5 5600MHz; 2 slots con soporte para 16GB cada uno)	8 GB
Procesador	Intel Core i9 14900HX hasta 5.8 GHz (36MB Caché, 24 núcleos y 32 subprocesos)	Intel i5 / AMD Ryzen 5
Disco duro	1TB M.2 NVMe PCIe 4.0 SSD (ampliable a hasta 2× 2TB SSD PCIe 4.0)	HDD de 512 GB
Sistema operativo	Windows 11 Home	Windows 10
Puertos	1 conector de audio combinado de 3,5 mm 1× HDMI 2.1 FRL 2× USB 3.2 Gen 2 Tipo-A 1× USB 3.2 Gen 2 Tipo-C (compatible con pantallas / entrega de energía) 1 puerto LAN RJ45 1× Thunderbolt™ 4 con soporte para DisplayPort™ (hasta 40Gbps)	USB 2.0
Conexión a internet	Wi-Fi 6E (802.11ax) de banda triple Bluetooth® 5.2 (*La versión puede variar según el sistema operativo)	Wi-Fi 5

Fuente: (ASUS, 2024).

La elección de estos requisitos responde a la necesidad de mantener un rendimiento óptimo al operar el software de simulación en Unity junto con el visor Oculus Quest 2, garantizando una experiencia inmersiva y estable.

B. Software

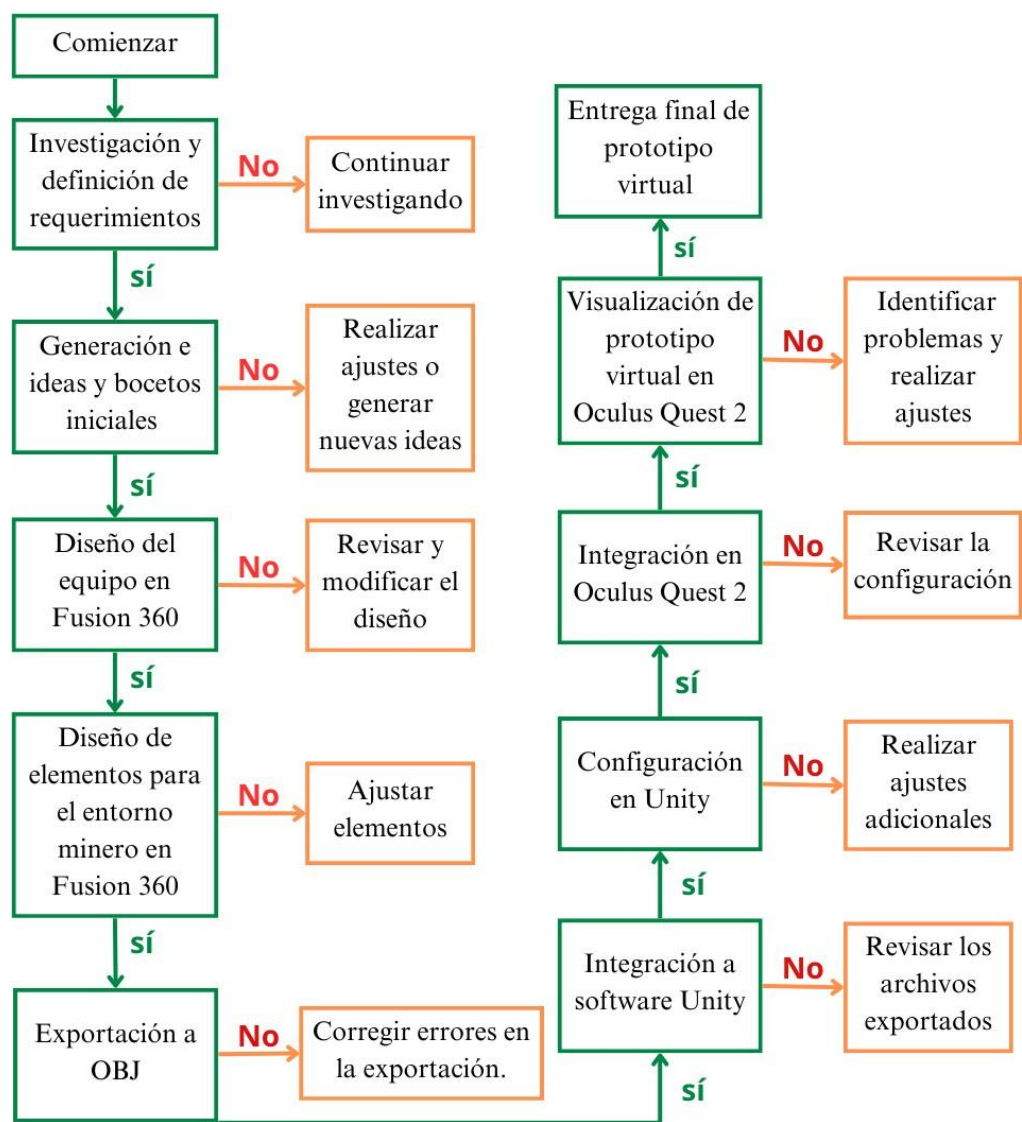
- a. Unity: El motor gráfico principal que se utilizará para desarrollar la simulación virtual.
- b. Fusion 360: Para el diseño de los componentes del equipo y entorno minero y la exportación de los modelos 3D a Unity.

2.5. PROGRAMA DE TRABAJO

En el Programa de Trabajo se organizan las actividades y recursos necesarios para la ejecución del proyecto, proporcionando una visión clara de la estructura del equipo y los procesos involucrados.

A. Diagrama de bloques

Se desarrolla un diagrama de bloque el cual permitirá entender la evolución y diseño final del proyecto (Figura 2-5).



Fuente: Elaboración propia
Figura 2-5. Diagrama de bloques.

2.6. CARGOS, PERFILES Y SUELDOS

La naturaleza del proyecto y su objetivo de visualizar en realidad virtual el funcionamiento de una máquina para la fortificación minera no requiere la participación de un equipo multidisciplinario. En cambio, depende de habilidades técnicas específicas en modelado 3D, diseño y representación digital, todas las cuales son propias del perfil del estudiante de Ingeniería en Fabricación y Diseño Industrial. Por esta razón, se

considera la participación de un solo profesional a cargo del desarrollo integral del proyecto (Tabla 2-4).

Tabla 2-4. Cargos y sueldos.

ítem	Profesional	Cantidad	Sueldo	Valor unitario
1	Alumno	1	\$1.198.800	\$6.660

Fuente: Elaboración propia

El sueldo fue estimado considerando un total de 180 horas de trabajo, distribuidas entre las etapas de investigación, diseño de componentes en Fusion 360, generación del recorrido virtual en Unity, edición del contenido para su visualización y la proyección final en entorno inmersivo mediante el visor Oculus Quest 2. La valoración económica corresponde al tiempo requerido para desarrollar cada fase de forma autónoma, aplicando conocimientos técnicos y herramientas digitales especializadas.

2.7. **CAPITAL DE TRABAJO**

Se presenta el material necesario para la ejecución del proyecto en realidad virtual, detallando cada uno de los elementos requeridos para el desarrollo y simulación de la máquina en un entorno digital.

Esta inversión en equipo asegura que el proyecto cumpla con los estándares de calidad y eficiencia requeridos para la simulación en realidad virtual. El capital de trabajo está alineado con los objetivos de capacitación y visualización de procesos mineros en un entorno digital inmersivo.

- A. Equipos principales
 - a. Computadora de alto rendimiento, Notebook ROG Strix G16 G614JVR-N3107W.
 - b. Dispositivo de Realidad Virtual, Oculus Quest 2.
 - c. Dispositivos de almacenamiento externo (HDD/SSD).
- B. Software especializado
 - a. Fusion 360.
 - b. Unity.
 - c. Plugins y complementos de Unity.
- C. Periféricos y accesorios
 - a. Teclado ergonómico.
 - b. Mouse ergonómico.

- c. Mouse Pad
- d. Cables y adaptadores.

D. Espacios y otros recursos

- a. Escritorio
- b. Silla ergonómica
- c. Conexión a Internet de alta velocidad.

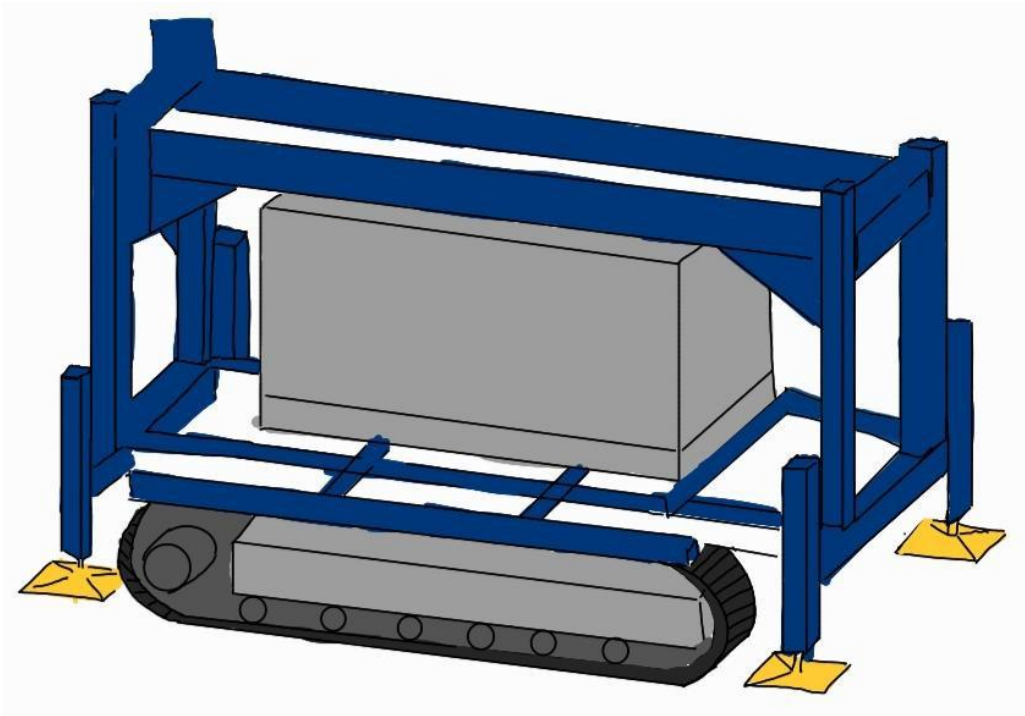
2.8. VISUALIZACIÓN PARA LLEVAR A LA REALIDAD VIRTUAL

En esta sección se detallará el proceso completo, desde el diseño hasta la visualización en renders del equipo automatizado para la movilización e instalación de marcos prefabricados de hormigón. Se abordarán los bocetos iniciales, el desarrollo del modelo 3D necesario para simular su funcionamiento en un entorno virtual.

A. Bocetos

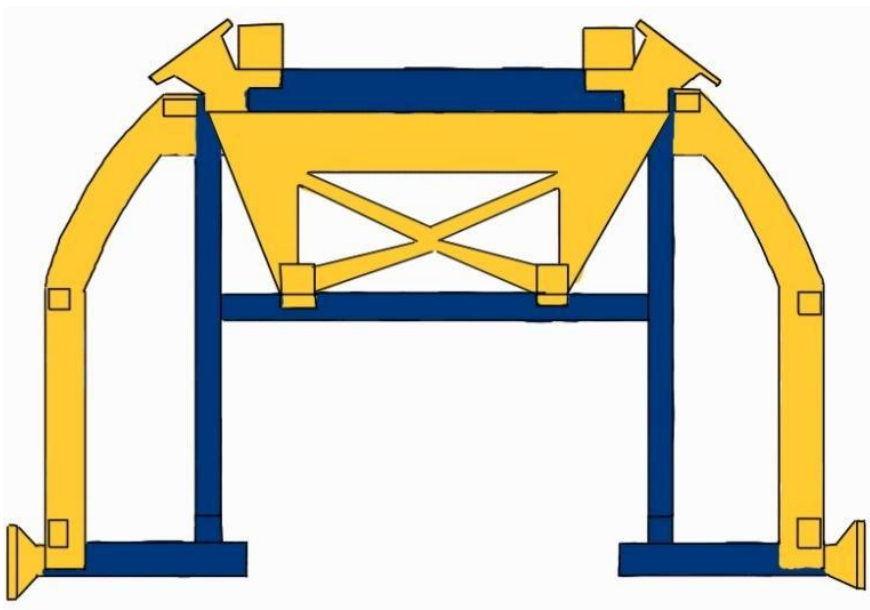
Se elaboraron bocetos del funcionamiento del equipo automatizado, diseñado específicamente para transportar e instalar simultáneamente hasta 4 marcos prefabricados de hormigón, una innovación que no existe actualmente en el mercado. Estos bocetos permiten visualizar los componentes generales y mecanismos necesarios para su correcto funcionamiento. Esta fase de diseño fue clave para planificar de manera efectiva el modelado en 3D y asegurar que cada parte del equipo esté lista para la simulación en realidad virtual y su evaluación operativa.

El equipo cuenta con una oruga para su desplazamiento y soportes retraíbles para contar con una estabilidad máxima en el momento que se requiera. Considerando que lo electrónico y eléctrico debe estar protegido se instala una caja que permite el funcionamiento y seguridad de los dispositivos (Figura 2-6).



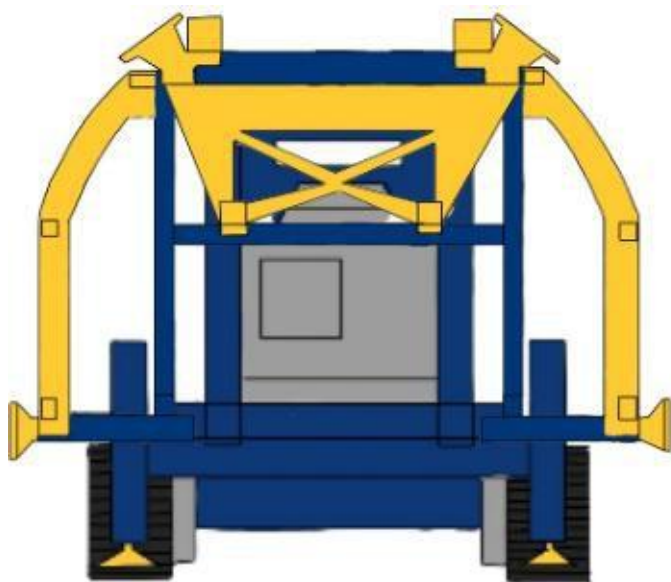
Fuente: Elaboración propia
Figura 2-6. Boceto de cuerpo principal.

La máquina cuenta con arcos que resisten altas cargas dinámicas además de expandirse para adecuarse a las medidas de diferentes marcos, para mayor estabilidad se le añade un soporte de cercha (Figura 2-7).



Fuente: Elaboración propia
Figura 2-7. Boceto soporte de marco con cercha.

Se muestra una vista frontal del equipo automatizado diseñado para la instalación de marcos prefabricados de hormigón en las minas subterráneas. Esta imagen proyecta la estructura general de la máquina, la superposición de ambos cuerpos (Figura 2-8).

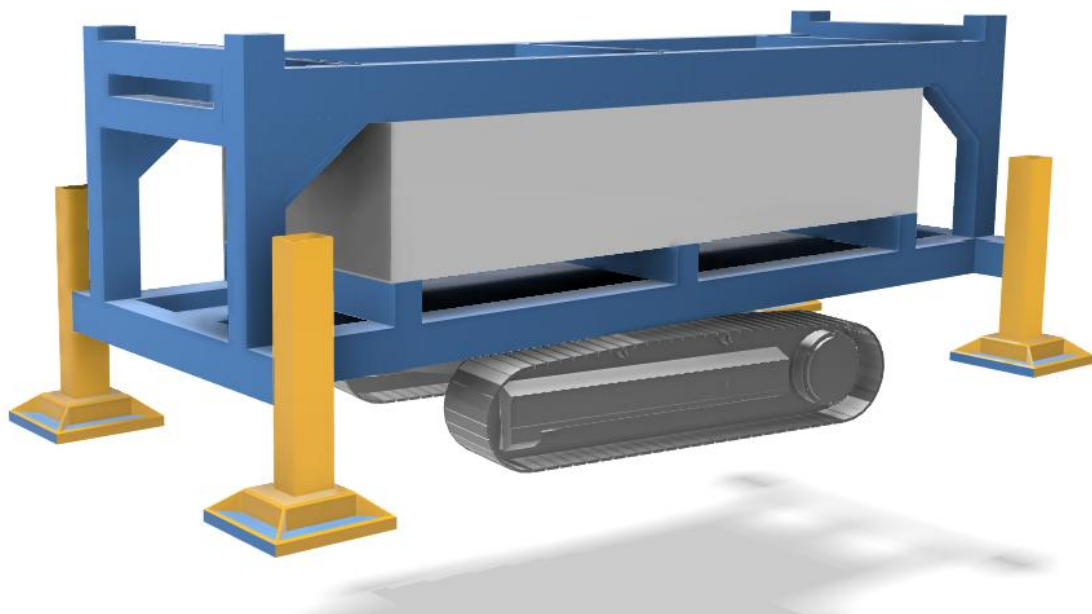


Fuente: Elaboración propia
Figura 2-8. Boceto vista frontal general.

2.9. MODELACIÓN Y PLANIMETRÍA 3D EN FUSION 360

Para realizar la modelación 3D del equipo automatizado que traslada e instala marcos prefabricados de hormigón se utilizara el software fusión 360.

Se observa el cuerpo base de la máquina, donde se visualiza la estructura base que incluye la plataforma de soporte y el sistema de desplazamiento mediante oruga. Esta representación permite comprender la forma en que el equipo se sostiene y deslaza sobre superficies estables (Figura 2-9).



Fuente: Elaboración propia
Figura 2-9. Render diseño 3D estructura base.

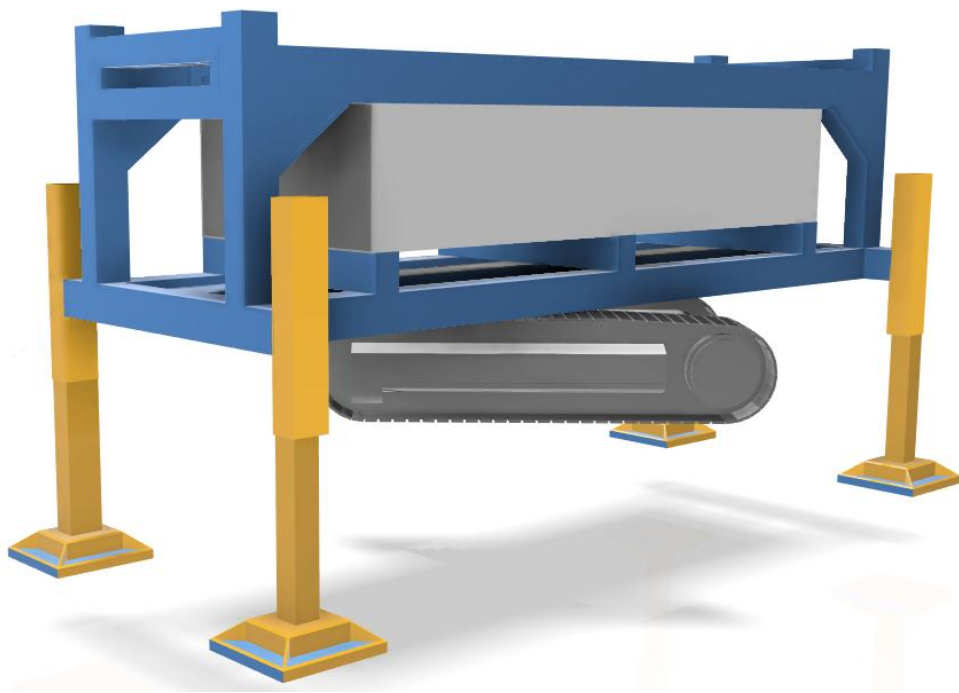
Se adjunta plano de la estructura base, el cual muestra las dimensiones generales y los elementos principales que componen el armazón del equipo, incluyendo los perfiles estructurales y su disposición (Anexo A).

- [PLANO 1 ESTRUCTURA PRINCIPAL.pdf](#)

Se incluye plano del sistema de almacenamiento electrónico, el cual expone la ubicación y disposición de los componentes electrónicos necesarios para el funcionamiento del equipo, asegurando su correcta protección y accesibilidad (Anexo B).

- [PLANO 6 ALMACENAMIENTO ELECTRÓNICO.pdf](#)

Por otro lado, se muestra la simulación del movimiento de rotación de la oruga, evidenciando su capacidad para girar en 360 grados y orientar la estructura de manera eficiente dentro del túnel. Este render facilita la comprensión de su maniobrabilidad durante la operación de instalación (Figura 2-10).



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-10. Render diseño 3D rotación oruga.

Se incorpora plano del soporte inferior, donde se detalla la estructura encargada de otorgar estabilidad al equipo durante su operación. Este plano permite comprender cómo se distribuyen las cargas al momento del desplazamiento y detención (Anexo C).

- [PLANO 2 SOPORTE INFERIOR.pdf](#)

Se observa la incorporación de los marcos estructurales en la base del equipo, los cuales están diseñados para brindar soporte y estabilidad durante la instalación de los marcos prefabricados de hormigón. Este conjunto destaca por su disposición organizada y por la integración de los elementos de sujeción, permitiendo una operación controlada que optimiza la seguridad del proceso (Figura 2-11).



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-11. Render diseño 3D incorporación de marcos estructurales.

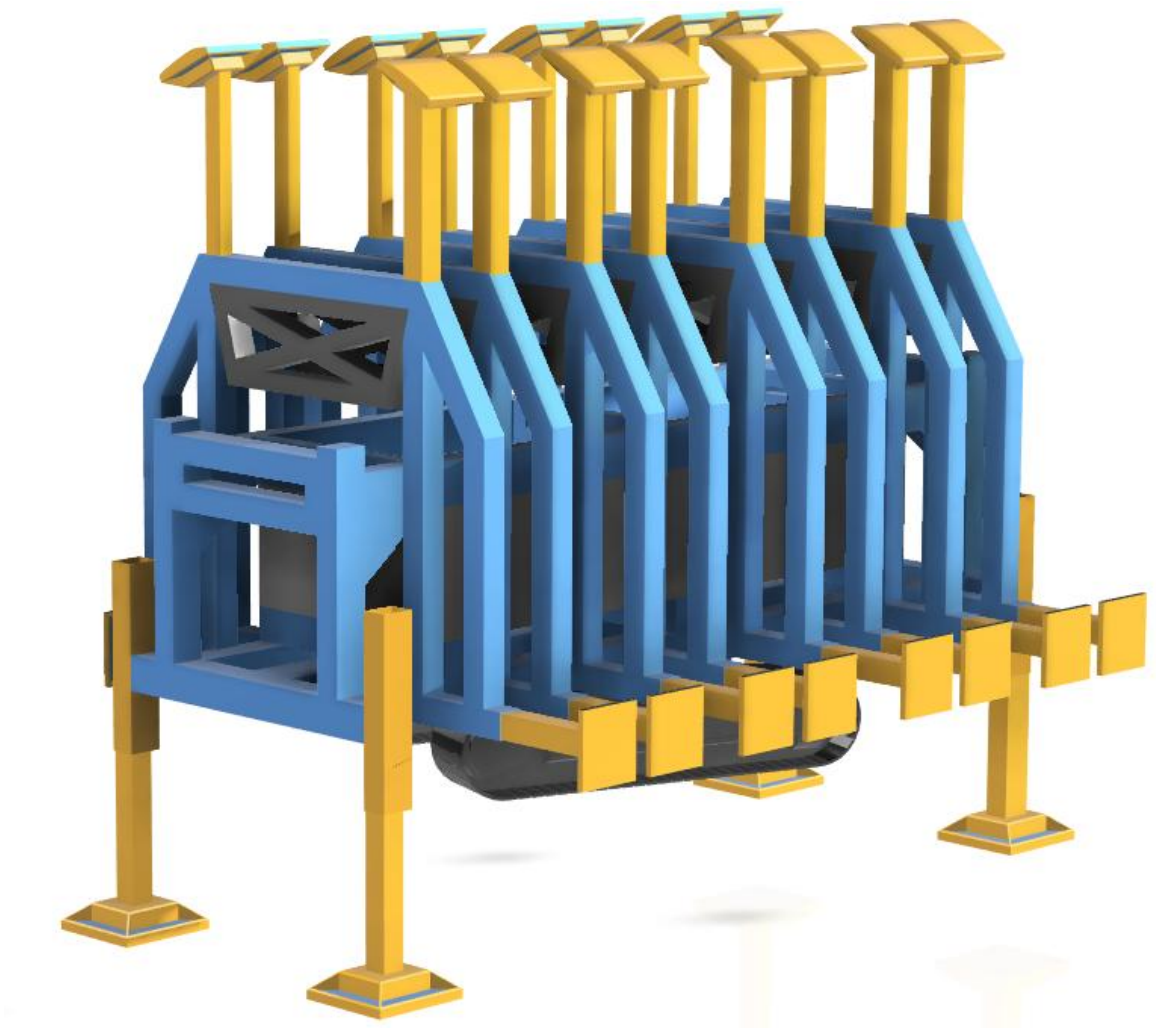
Se presenta plano del arco, el cual detalla la estructura superior encargada de trasladar e instalar los marcos prefabricados. Este plano permite observar la configuración de los elementos móviles y los puntos de unión con la base del equipo (Anexo D).

- [PLANO 5 ARCO.pdf](#)

Se incorpora el plano general del equipo automatizado, donde se visualiza de forma integrada la estructura base, el arco, y los componentes complementarios. Este plano proporciona una visión global del diseño y su funcionamiento conjunto (Anexo E).

- [PLANO 7 EQUIPO PARA TRANSPORTE E INSTALACIÓN DE MARCOS.pdf](#)

Se visualiza la configuración del equipo con marcos adaptables, capaces de ajustarse a diferentes dimensiones y formas de marcos prefabricados. Esta característica facilita su uso en condiciones variables del entorno minero, ofreciendo versatilidad y eficiencia sin necesidad de modificaciones estructurales significativas (Figura 2-12).



Fuente: Elaboración propia
 Figura 2-12. Render diseño 3D marcos adaptables.

Se incluye plano del soporte superior, el cual muestra los elementos estructurales destinados a sostener el arco desde lo alto y permitir su desplazamiento controlado (Anexo F)

- [PLANO 4 SOPORTE SUPERIOR.pdf](#)

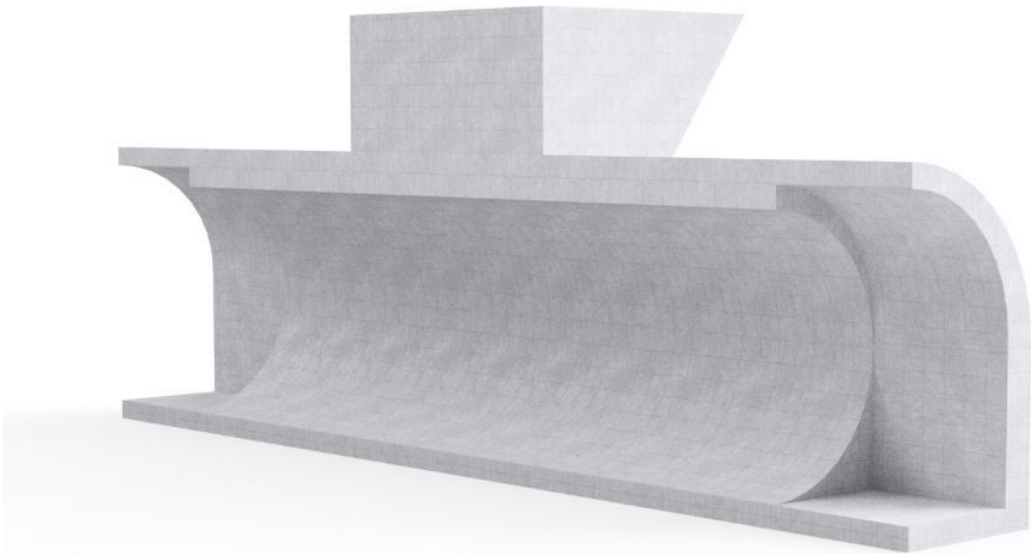
El siguiente plano detalla el soporte lateral del equipo, componente clave para entregar estabilidad estructural frente a fuerzas transversales durante el desplazamiento (Anexo G).

- [PLANO 3 SOPORTE LATERAL.pdf](#)

A continuación, se presenta el plano de conjunto, en el cual se integran todos los componentes del equipo automatizado. Este plano permite visualizar la relación entre las partes, facilitando el entendimiento del funcionamiento general (Anexo H).

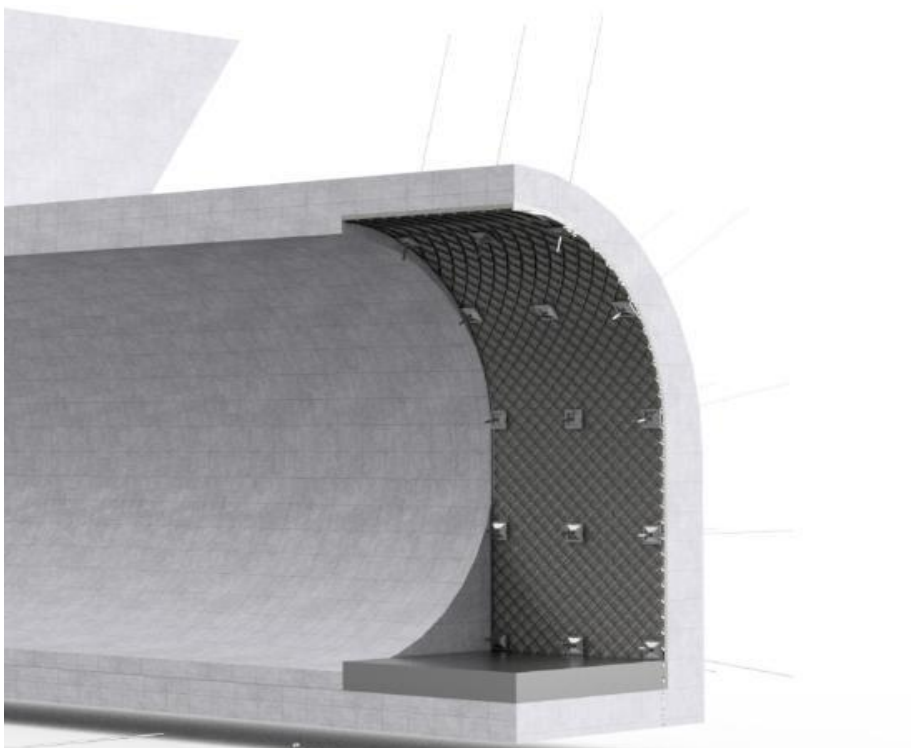
- [PLANO 8 DE CONJUNTO.pdf](#)

Se ilustra un túnel desquinchado mediante el uso de maquinaria convencional, donde se observa el avance de la excavación aproximado de 3 metros por vez. Este modelo permite comprender de manera visual la condición inicial del macizo rocoso antes de la implementación de cualquier método de fortificación, destacando la superficie expuesta y la geometría resultante tras el proceso de desquinche (Figura 2-13).



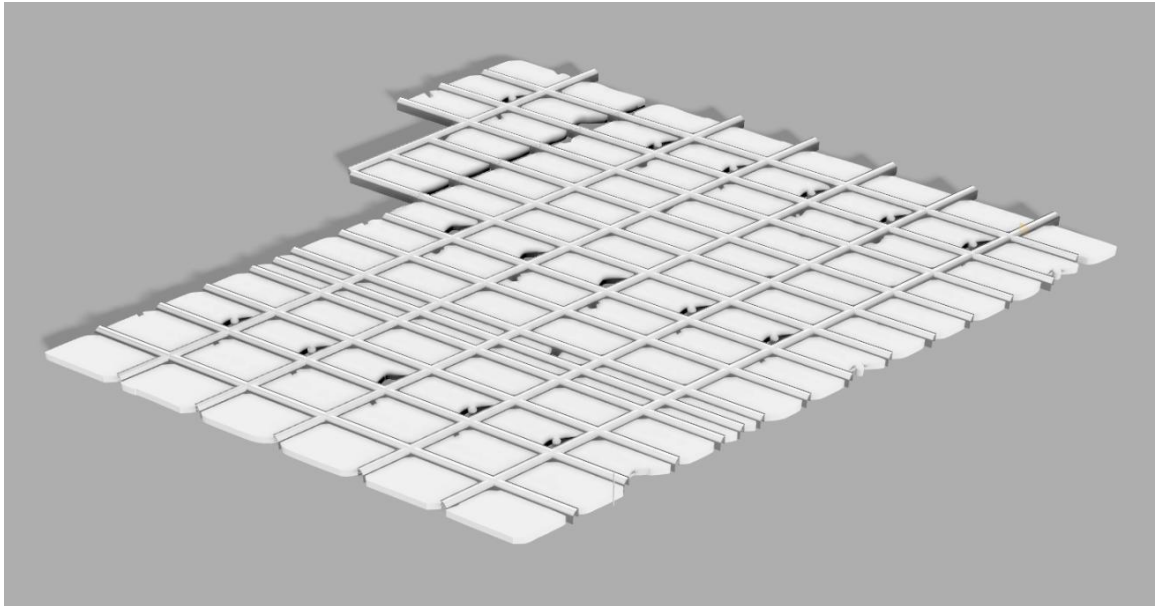
Fuente: Elaboración propia
Figura 2-13. Render diseño 3D túnel desquinchado.

Se representa el túnel con las capas de fortificación aplicadas, comenzando con una proyección de shotcrete para estabilizar la superficie y continuar con la colocación de malla de contención y pernos de anclaje. Esta visualización permite identificar cómo cada componente contribuye al refuerzo estructural del túnel y asegura la estabilidad frente a desprendimientos o deformaciones del terreno, favoreciendo la seguridad de la operación (Figura 2-14).



Fuente: Elaboración propia
Figura 2-14. Render diseño 3D túnel fortificado.

Se ilustra la distribución de calles y zanjas de la mina Esmeralda, lo que permite una mejor comprensión de la disposición general del área de trabajo y de las rutas utilizadas para el transporte y acceso dentro del sistema de fortificación (Figura 2-15).



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-15. Render diseño 3D mina Esmeralda

2.10. ANIMACIÓN FUNCIONAL DEL EQUIPO

Con el fin de representar los desplazamientos y movimientos operativos del equipo automatizado, se elaboró una animación técnica utilizando la plataforma Fusion 360. En ella se simulan las acciones mecánicas del sistema, permitiendo observar el comportamiento dinámico de sus componentes durante el proceso de trabajo. Esta representación fue clave para identificar la secuencia de movimientos, verificar la articulación de cada parte del equipo y asegurar la viabilidad mecánica del diseño planteado (Anexo I).

- https://youtu.be/u_NHflkbqwl

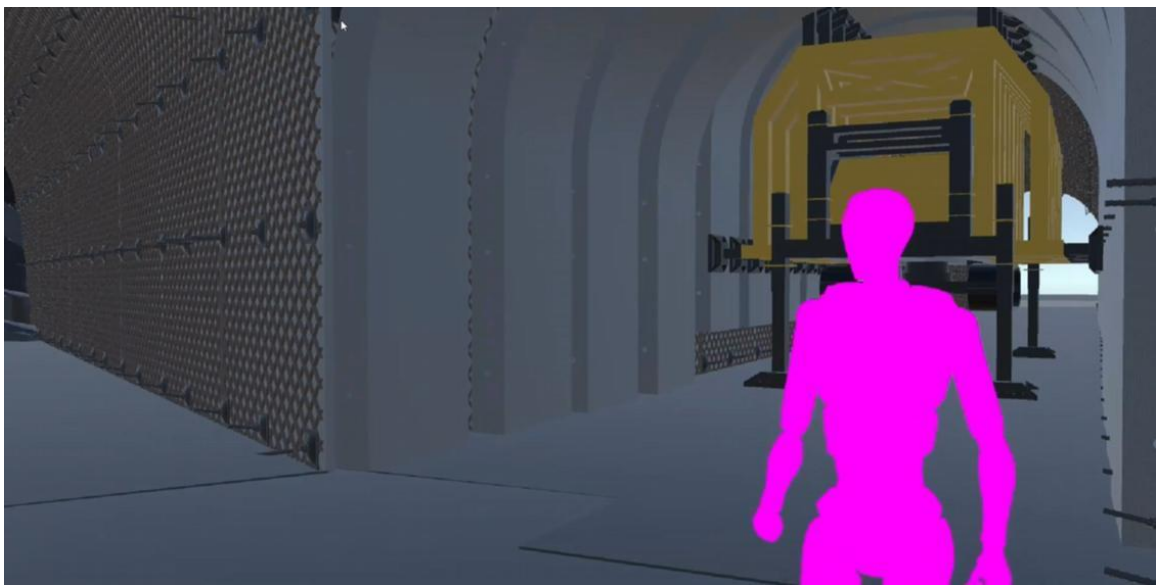
Complementariamente, se generó una segunda animación que muestra el ciclo completo de funcionamiento del sistema dentro de un entorno minero simulado. En esta visualización se integra el proceso de traslado e instalación de los marcos prefabricados de hormigón armado, permitiendo observar de manera continua y ordenada cada una de las etapas operativas. Esta simulación fue empleada como herramienta de apoyo para analizar el comportamiento global del equipo, validando su coherencia funcional y facilitando la comprensión espacial del diseño en condiciones representativas del entorno subterráneo (Anexo J).

- <https://youtu.be/LzXmqjMLFKw>

2.11. INTEGRACIÓN A UNITY

Para la visualización del equipo automatizado y su entorno, se utilizó el motor gráfico Unity, el cual permitió importar y organizar los modelos tridimensionales generados previamente en Fusion 360.

Se configuró una escena virtual que representa el entorno subterráneo donde opera el equipo. Se ajustaron escalas, posiciones y materiales de los modelos para asegurar correspondencia con las condiciones reales de faena. Además, se trabajó en la iluminación de la escena, la colocación de cámaras estáticas y dinámicas, y la creación de un recorrido virtual mediante un avatar que transita por la maqueta. Este recorrido fue posteriormente grabado y editado en formato de video, el cual fue cargado a YouTube para ser visualizado mediante el visor Oculus Quest 2. Esta solución permite una experiencia inmersiva no interactiva, facilitando la comprensión del diseño, su contexto operativo y la funcionalidad general del sistema (Figura 2-16).



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-16. Avatar girando, maqueta virtual Unity

Se presenta una maqueta virtual generada en Unity, en la que se observa un minicargador operando al interior del túnel simulado. Esta representación permite identificar la interacción del equipo de apoyo con el entorno subterráneo y evaluar su disposición espacial respecto a los demás elementos de la faena (Figura 2-17).



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-17. Minicargador, maqueta virtual Unity

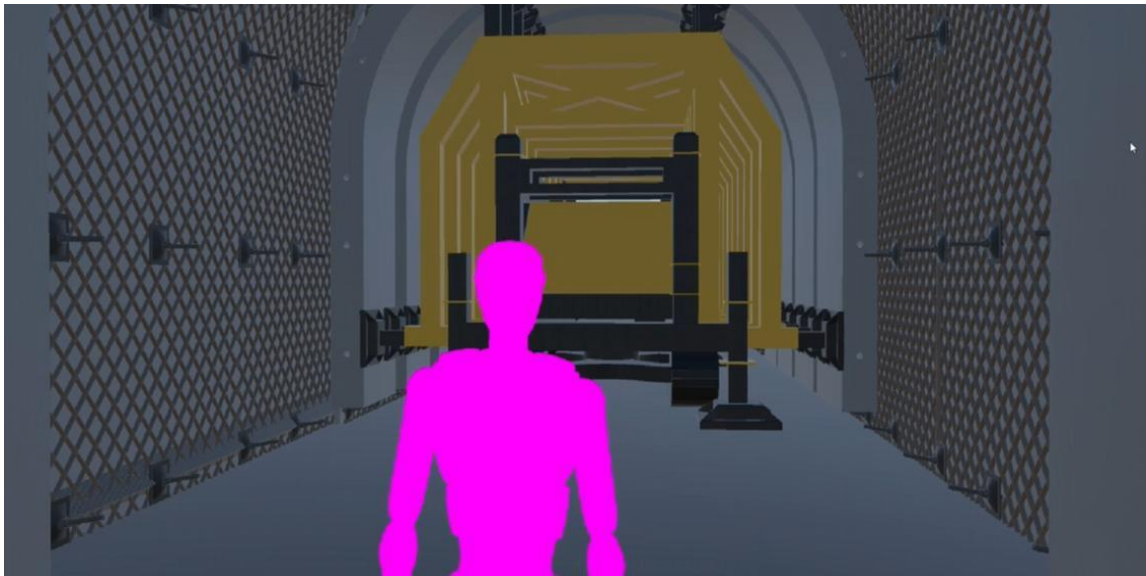
Se muestra la visualización de una camioneta de apoyo ubicada en la galería virtual, permitiendo apreciar la proporción de los vehículos respecto al túnel y el recorrido que realiza el avatar para verificar la accesibilidad y maniobrabilidad dentro de este entorno simulado (Figura 2-18).



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-18. Camioneta, maqueta virtual Unity

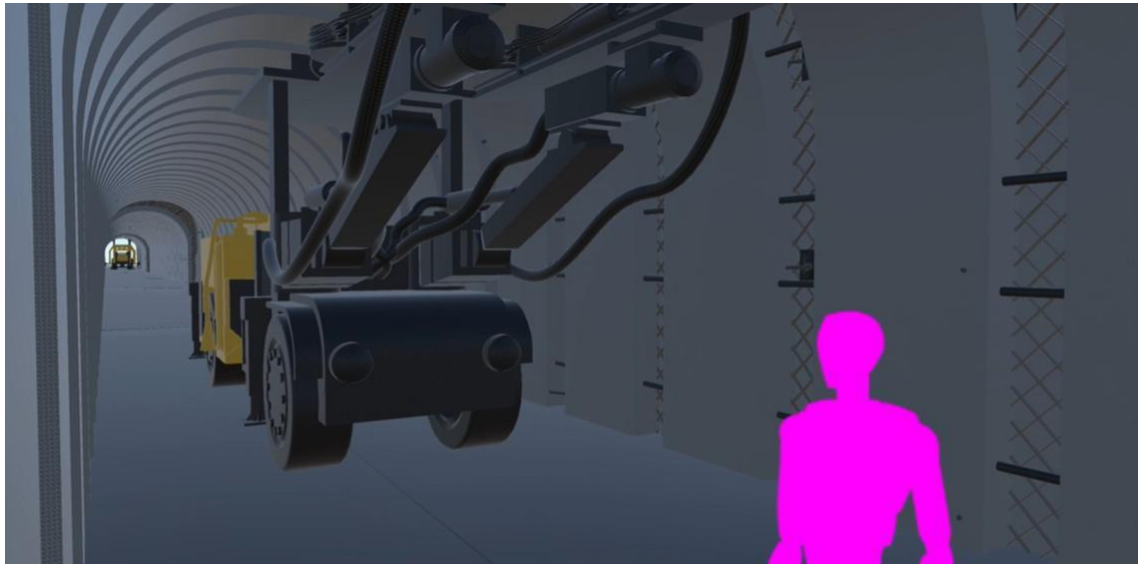
Se observa el equipo automatizado ubicado al interior del túnel, en el que se puede identificar su estructura base y los marcos instalados en la maqueta virtual. Esta imagen facilita comprender la escala del equipo y su posición respecto a las paredes y el piso de la galería minera (Figura 2-19).



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-19. Equipo, maqueta virtual Unity

Se visualiza la disposición de un jumbo minero modelado en la maqueta virtual, cuyo propósito es representar la coexistencia de equipos de gran tamaño en un mismo entorno subterráneo. Esta vista contribuye a evaluar los espacios de tránsito y operación de manera segura y eficiente (Figura 2-20).



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-20. Jumbo, maqueta virtual Unity

2.12. EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD TÉCNICA

Se observa si el diseño, los materiales y los procesos de fabricación cumplen con los requisitos de resistencia, rigidez y estabilidad necesarios para operar en un entorno minero de alta exigencia. Se incluye la interpretación de los resultados obtenidos en simulaciones estáticas y el análisis del factor de seguridad, garantizando que el arco estructural diseñado sea técnicamente viable para soportar condiciones reales.

A. Datos iniciales

- i. Peso de un marco: $P_{\text{marco}} = 18.640 \text{ kg}$
- ii. Cantidad de marcos transportados: $n = 4$
- iii. Peso total de los marcos: $P_{\text{total}} = P_{\text{marco}} \times n = 18.640 \text{ kg} \times 4 = 74.560 \text{ kg}$
- iv. Material de la estructura base:
 - a. Perfiles de acero ASTM A500 (acero al carbono).
 - b. Esfuerzo admisible del material (σ_{adm}): Según ASTM A500 Grado B, el límite de cedencia es de 290 MPa (Tuspipe,2024).
- v. Material de los soportes de arco:
 - a. Acero A36.
 - b. Esfuerzo admisible (σ_{adm}): Según ASTM A36, el límite de cedencia es 250 MPa. (Material Mundial, 2024).

B. Calcular la carga total que soporta la estructura

- i. La carga total en Newtons es:

$$F_{\text{total}} = P_{\text{total}} \times g$$

donde $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ es la gravedad.

$$F_{\text{total}} = 74.560 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = \mathbf{731.313,6 \text{ N}}$$

- ii. La carga por marco en Newtons es:

$$F_{\text{total}} = P_{\text{marco}} \times g,$$

$$F_{\text{total}} = 18.640 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = \mathbf{182.858,4 \text{ N}}$$

C. Distribución de la carga en los soportes

Un marco es sostenido por dos arcos, lo que significa que hay 8 soportes por marco. Sin embargo 4 sostienen el peso del marco, el resto es para estabilidad.

Para los 4 marcos, tendremos un total de:

- i. Total de soportes = 8 soportes por marco $\times$ 4 marcos = 32 soportes.
- ii. Total de soportes con peso = 4 soportes por marco $\times$ 4 marcos = 16 soportes.

Por lo tanto, la carga por soporte será:

i. $F_{\text{soporte}} = (F_{\text{total}}) / (16 \text{ soportes}) = (731.313,6 \text{ N}) / (16) = 45.707,1 \text{ N por soporte.}$

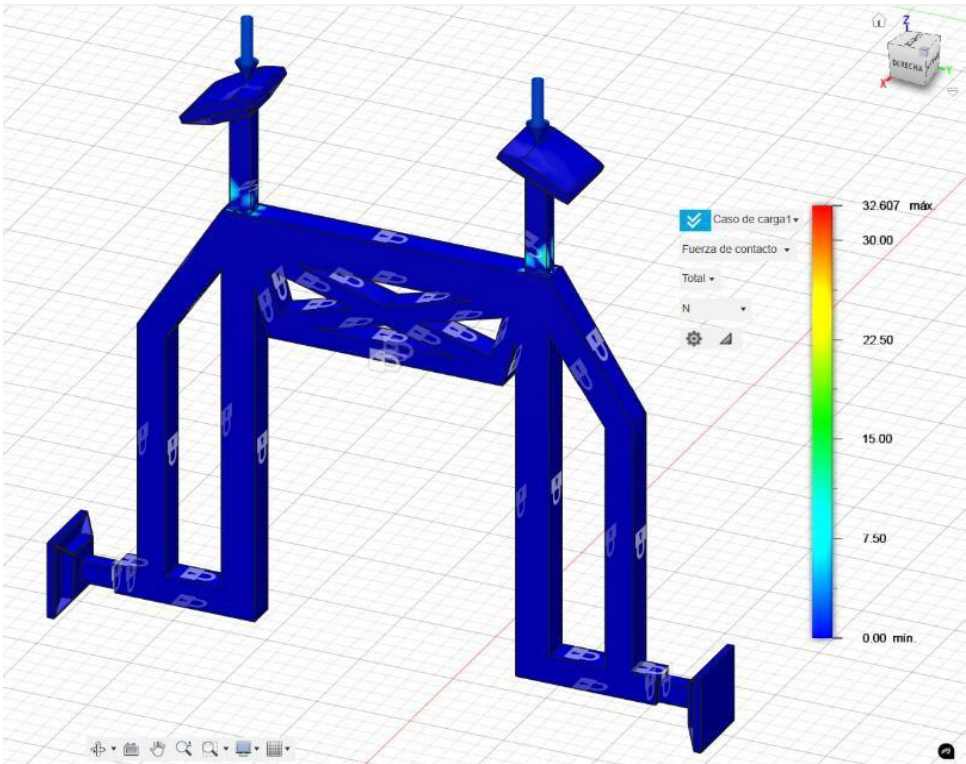
D. Simulación: Estudio tensión estática

Se llevó a cabo un análisis estático detallado de la estructura de la máquina diseñada, utilizando herramientas de simulación asistida por computadora (CAE) para evaluar la distribución de esfuerzos, deformaciones, desplazamientos, fuerzas de contacto y el factor de seguridad bajo las condiciones de carga previstas.

El estudio se realizó sobre un solo arco estructural, el cual forma parte de un sistema diseñado para soportar marcos de concreto en un entorno minero de alta exigencia. Cada marco tiene un peso total de 18.640 kg, lo que requiere el uso de dos arcos para su soporte. Por esta razón, el estudio considera la mitad del peso total, distribuyéndolo entre los dos lados del arco, resultando en una carga de 45.714 N por lado.

i. Fuerza de contacto

El resultado muestra, que la mayor concentración de fuerza de contacto tiene un valor máximo de 32.607 N, se encuentra en las zonas superiores donde las cargas interactúan con los puntos de soporte. Esto refleja que dichas áreas soportan la mayor parte del esfuerzo generado, mientras que las zonas en azul presentan valores mínimos o nulos. La distribución uniforme de las fuerzas indica que el diseño es estable y responde adecuadamente a las cargas aplicadas, validando su desempeño en condiciones estáticas (Figura 2-21).

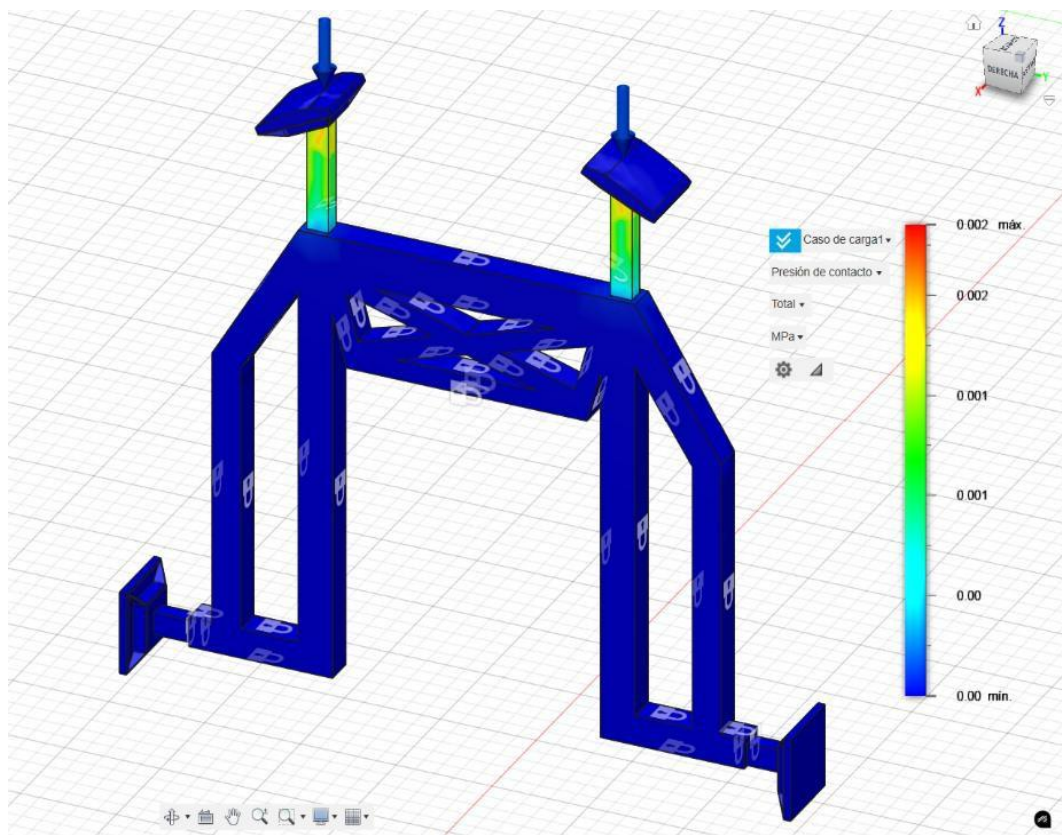


Fuente: Elaboración propia

Figura 2-21. Simulación estática, fuerza de contacto.

ii. Presión de contacto

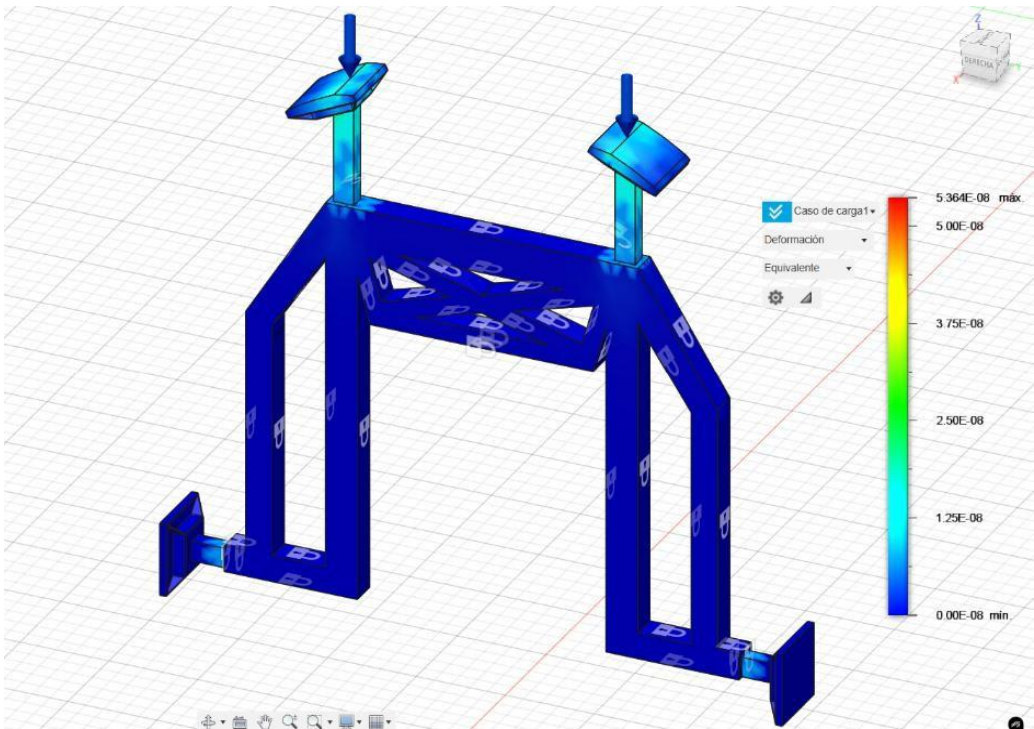
La presión máxima registrada es de 0,002 MPa, concentrándose en las zonas superiores donde el arco interactúa con los soportes y las cargas. Aunque en la figura predominan los tonos verdes y amarillos, lo que refleja que las presiones son muy bajas. Las zonas en azul indican presiones mínimas o nulas. Esto evidencia que las fuerzas están bien distribuidas en las superficies de contacto. La baja magnitud de la presión demuestra que el material del arco puede soportar las cargas aplicadas sin riesgo de deformación permanente o falla local en las áreas de contacto (Figura 2-22).



Fuente: Elaboración propia
Figura 2-22. Simulación estática, presión de contacto.

iii. Deformación

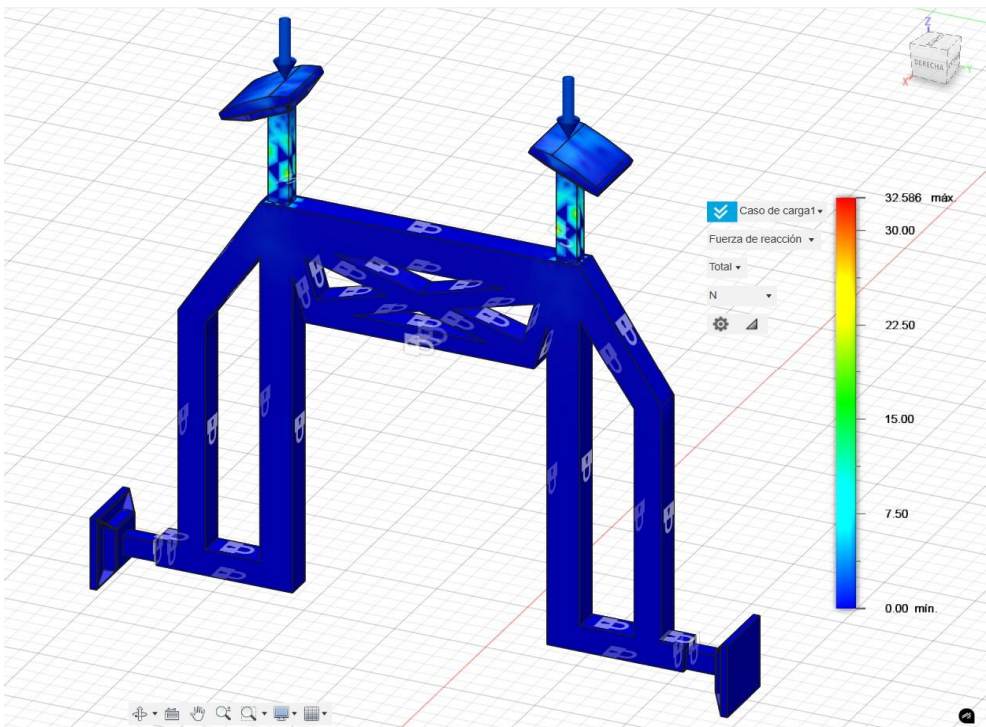
La deformación máxima registrada es de 5.364E-08, representada en las áreas de color rojo, que corresponden a las zonas superiores donde se aplican las cargas y en los puntos de contacto con los soportes. Aunque en esta figura predominan los tonos celestes, reflejando que las deformaciones son muy pequeñas. Las áreas en azul indican deformaciones insignificantes o nulas. Este resultado evidencia que el diseño es extremadamente rígido, asegurando que la estructura mantendrá su integridad y funcionalidad bajo las condiciones estáticas analizadas (Figura 2-23).



Fuente: Elaboración propia
Figura 2-23. Simulación estática, deformación.

iv. Fuerza de reacción

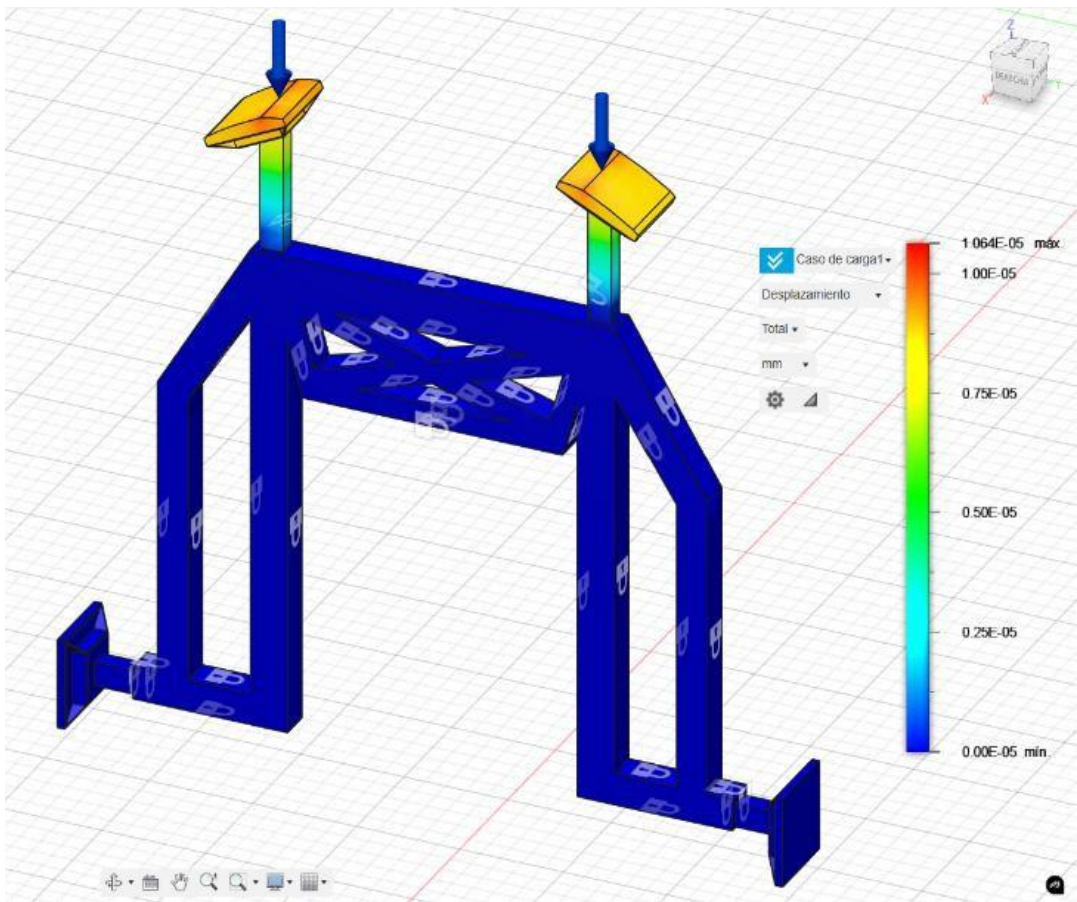
Las fuerzas de reacción alcanzan un valor máximo de 32.586 N, concentrándose en las zonas de contacto superior donde el arco interactúa con los soportes. Aunque en la figura predominan los tonos celestes, lo que indica que las fuerzas de reacción están distribuidas de manera uniforme y sin concentraciones críticas significativas. Las regiones en azul presentan valores mínimos o nulos. Este análisis confirma que las cargas están equilibradas y que las restricciones aplicadas son efectivas, garantizando la estabilidad del diseño en condiciones estáticas (Figura 2-24).



Fuente: Elaboración propia
Figura 2-24. Simulación estática, Fuerza de reacción

v. Desplazamiento

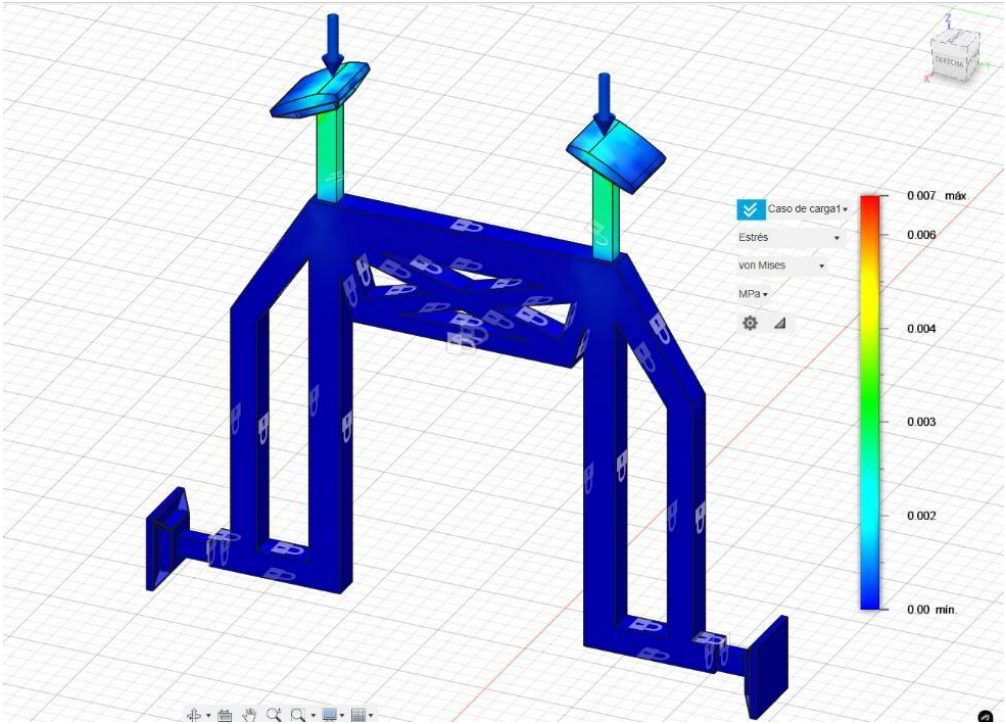
El desplazamiento máximo, indicado en rojo, es de $1.064\text{E-}05$ mm, mientras que las áreas en azul presentan desplazamientos insignificantes o nulos. Aunque en la figura predominan los tonos amarillos y verdes, lo que refleja que los desplazamientos son extremadamente pequeños. Estos valores evidencian la alta rigidez de la estructura, asegurando que el diseño mantendrá su integridad y forma bajo las condiciones de carga estáticas. Esto valida que el desplazamiento no afectará la funcionalidad del arco en el entorno operativo previsto (Figura 2-25).



Fuente: Elaboración propia
Figura 2-25. Simulación estática, desplazamiento.

vi. Von misses

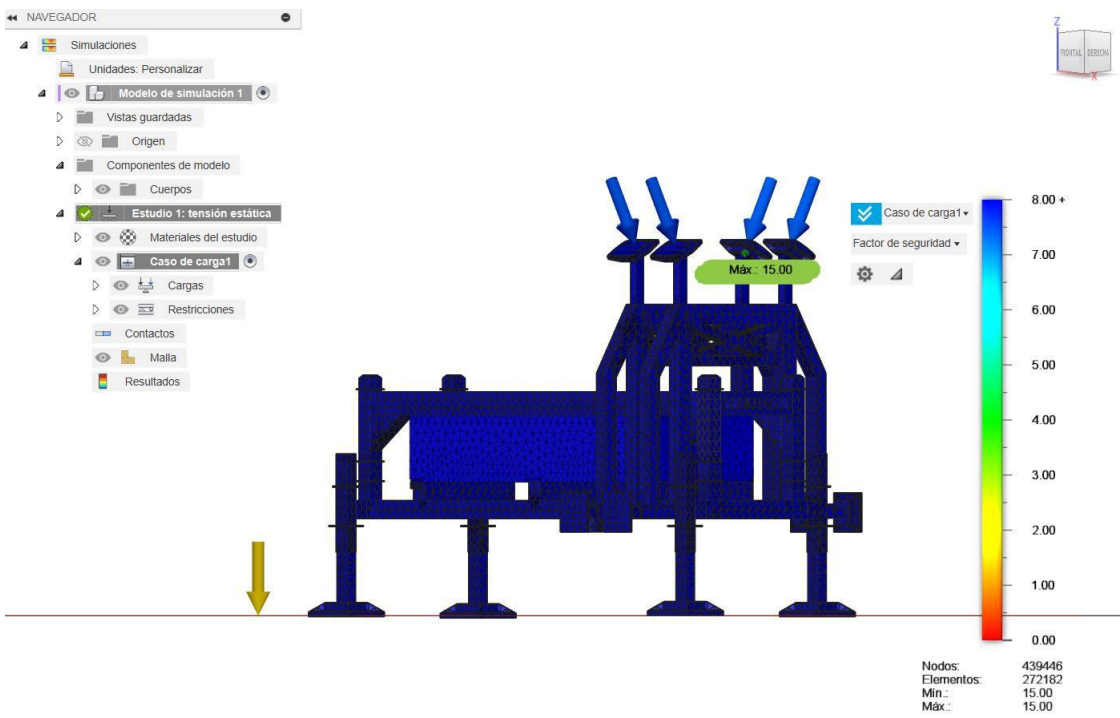
Los valores máximos de esfuerzo, indicados en rojo, alcanzan un máximo de $0,007$ MPa, mientras que las áreas en azul presentan esfuerzos insignificantes. Aunque en la figura predominan tonos celestes y verdes, reflejando que los esfuerzos son muy bajos. Este resultado demuestra que el diseño opera con esfuerzos muy por debajo del límite elástico de materiales típicos empleados en estructuras de este tipo, como el acero. Esto valida que el arco puede soportar las cargas aplicadas sin riesgo de deformación plástica o falla estructural, asegurando un desempeño seguro y eficiente en condiciones estáticas (Figura 2-26).



Fuente: Elaboración propia
Figura 2-26. Simulación estática, estrés de von misses.

vii. Factor de seguridad

Los resultados muestran un factor de seguridad mínimo de 15 en todas las áreas del diseño, lo que indica que la estructura es capaz de soportar hasta 15 veces la carga aplicada antes de alcanzar su límite elástico. Este elevado margen de seguridad valida la robustez del diseño y asegura un desempeño confiable, incluso en entornos de alta exigencia como zonas mineras con posibles cargas adicionales o impactos. El análisis confirma que el diseño está sobredimensionado, ofreciendo la posibilidad de optimización futura sin comprometer la seguridad estructural (Figura 2-27).



Fuente: Elaboración propia
Figura 2-27. Simulación estática, factor de seguridad.

CAPÍTULO 3: CUBICACIÓN Y EVALUACIÓN DE COSTOS

3. CUBICACIÓN Y EVALUACIÓN DE COSTOS

En este capítulo se analizan y detallan los costos asociados al diseño, desarrollo y ejecución del proyecto. Se incluye una evaluación exhaustiva de los recursos necesarios, considerando tanto materiales como equipos, y se presenta un desglose de los costos directos e indirectos involucrados. Este análisis permite establecer un presupuesto preciso, garantizando la viabilidad económica del proyecto y su alineación con los objetivos planteados.

3.1. COSTOS ASOCIADOS AL PROTOTIPO VIRTUAL

En esta sección se detalla el desglose de costos asociados al desarrollo del prototipo virtual de la máquina y su visualización en un entorno inmersivo de realidad virtual. La inversión en estos subsistemas asegura el rendimiento óptimo de las herramientas de diseño y simulación, facilitando la visualización realista del equipo en entornos mineros (Tabla 3-1).

Tabla 3-1. Costos de prototipo virtual

ÍTEM	SUBSISTEMA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO SIN IVA \$	PRECIO UNITARIO CON IVA \$	UNIDAD DE FOMENTO
1	Oculus Quest 2	1	378.143	449.990	11,72
2	Mouse	1	11.378	13.540	0,35
3	Notebook ROG Strix G16 G614JVR-N3107W	1	1.596.630	1.899.990	49,51
4	Cable oculus link	1	18.353	21.840	0,57
5	Base Cooler 6 Ventiladores Enfriador Notebook Lcd Luz Rgb	1	9.244	11.000	0,29
6	TOTAL		2.013.748	2.396.360	62,44

Fuente: Elaboración propia

La selección de estos materiales está orientada a cumplir con los requisitos técnicos del proyecto, asegurando tanto la calidad como la eficiencia en el desarrollo del prototipo virtual, representando así una inversión estratégica para garantizar un rendimiento óptimo en la simulación de la máquina en un entorno inmersivo.

3.2. COSTOS ASOCIADOS AL EQUIPO

En esta sección se presenta el desglose de los materiales necesarios para la fabricación de la estructura de la máquina. El cálculo de costos considera la compra completa del material debido a la disponibilidad estándar en el mercado. Esta metodología asegura que se contemplen todos los recursos necesarios para la construcción, minimizando contratiempos durante el proceso de fabricación y montaje.

Se detalla una lista con los materiales, cantidades, valores unitarios y totales, tanto en pesos chilenos como en Unidades de Fomento (Tabla 3-2).

Tabla 3-2. Costos asociados a los materiales necesarios.

Elemento	Pieza	u.	Valor u. CLP s/iva \$	Valor u. CLP c/iva \$	Valor total CLPs/iva \$	Valor total c/iva \$	Valor tota l UF
Perfil cuadrado 200×200×6 mm× 6 m	Estructura base	4	236.300	281.197	945.200	1.124.788	28,63
Perfil rectangular 200×150× 6 mm × 6 m	Estructura base	4	194.911	231.944	779.644	927.776	23,62
Perfil rectangular 250×150×6 mm × 6 m	Estructura base	2	465.435	553.868	930.870	1.107.736	28,20
Perfil cuadrado 100×100×5 mm × 6 m	Estructura base	2	96.891	115.290	193.782	230.580	5,87
Oruga de goma 400× 72.5×72 K	Estructura base	2	1.390.990	1.655.278	2.781.980	3.310.556	84,27
Plancha de acero10 mm ×1000 mm ×3000 mm	Estructura base	8	193.445	230.290	1.547.560	1.842.320	46,90
Perfil cuadrado 150×150×6 mm × 6 m	Arco	16	191.331	227.683	3.061.296	3.642.928	92,73
Perfil cuadrado 100×150×6 mm × 6 m	Arco	8	157,563	187.500	1.260.504	1.500.000	38,18
Plancha de acero de 10 mm×1000 m m ×3000 mm	Soporte inferior	7	193.445	230.290	1.354.115	1.612.030	41,03
Plancha de acero de 10 mm×1000 m m ×3000 mm	Soporte lateral	8	193.445	230.290	1.547.560	1.842.320	46,90
Plancha de acero de 10 mm×1000 m m ×3000 mm	Soporte superior	15	193.445	230.290	2.901.675	3.454.350	87,93
TOTAL						20.595.384	524,26

Fuente: (Prodalam, 2025).

El desglose de los costos asociados a los materiales necesarios para la fabricación del equipo se divide en cinco partes: la estructura base, el arco, soporte lateral, inferior y superior.

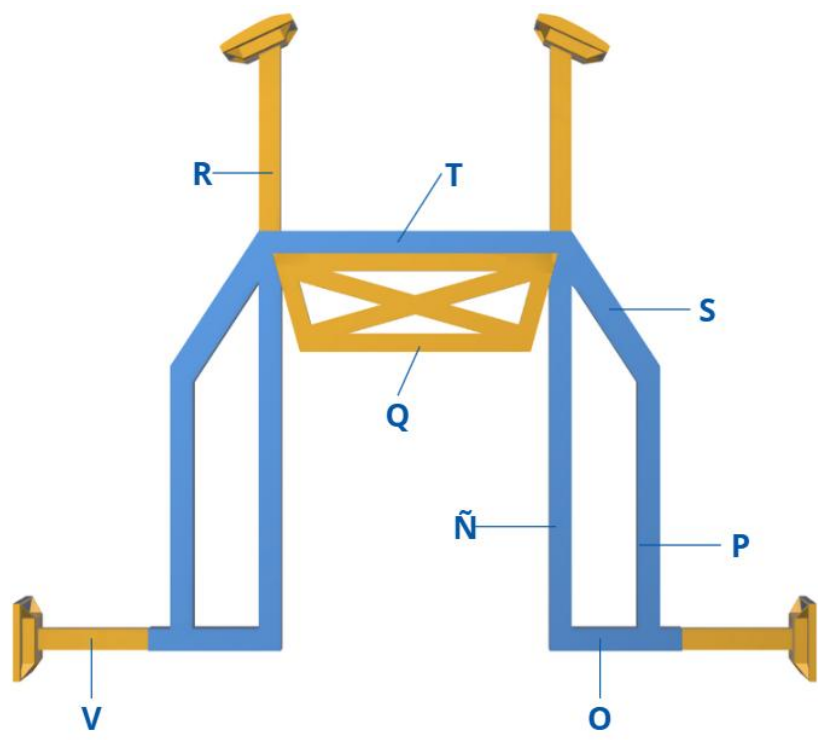
El valor total de los materiales es de \$20.595.384, lo que equivale a 524,26 UF, asegurando que se consideran los costos completos para la adquisición de los materiales, según la disponibilidad estándar del mercado. Esta división permite una mejor organización y seguimiento del presupuesto, garantizando la correcta asignación de recursos en ambas partes fundamentales del diseño.

3.3. DETERMINACIÓN DEL USO REAL DE MATERIALES

Se analiza y determina la cantidad real de material utilizado en la fabricación de la estructura base y arco de la máquina. Si bien los materiales, como perfiles estructurales y planchas, se adquieren en dimensiones estándar completas, durante el proceso de construcción puede requerirse únicamente una fracción de estas.

El objetivo es cuantificar de manera precisa el uso efectivo de los componentes comprados, identificando el material sobrante que no se incorpora directamente en la estructura.

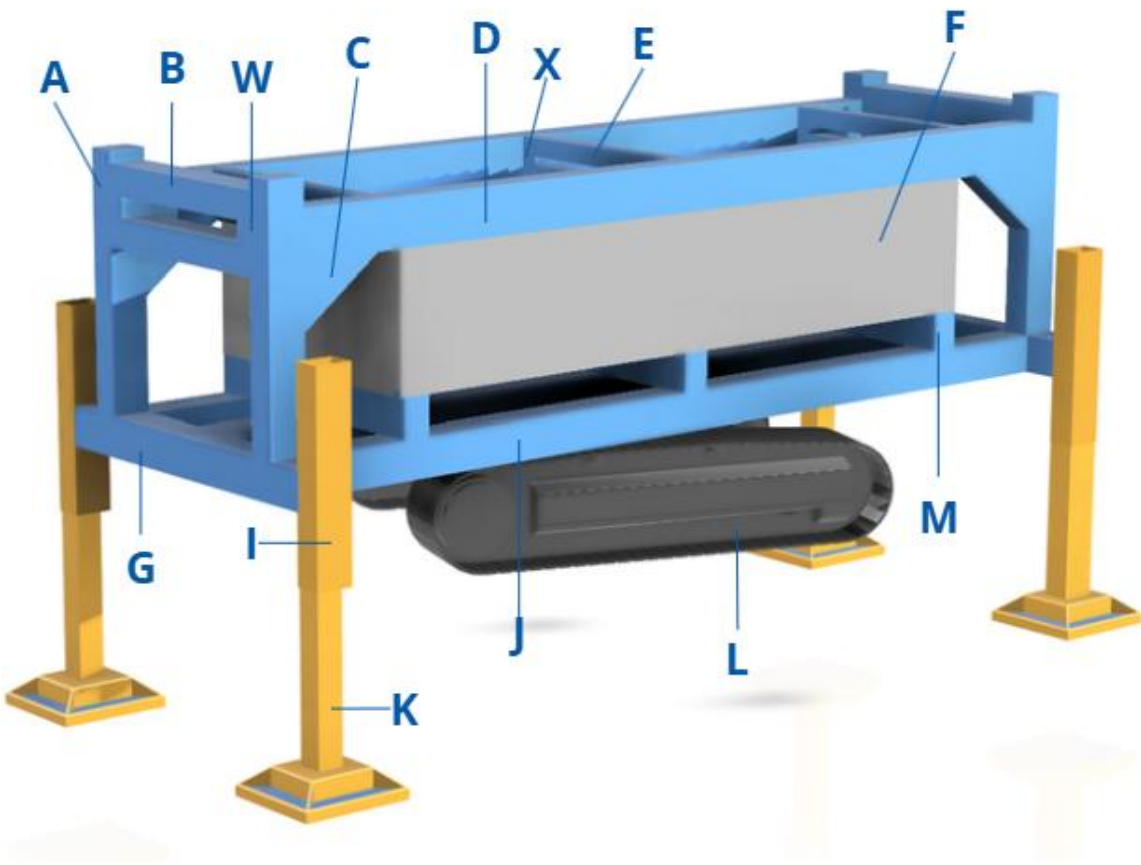
Se presenta la ilustración esquemática del arco estructural del equipo, en la cual se identifican con letras cada uno de los elementos que lo conforman. Esta asignación facilita su reconocimiento y referencia al analizar las dimensiones y el uso de materiales empleados en su fabricación (Figura 3-1).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-1. Identificación de piezas arco.

A continuación, se muestra la representación tridimensional de la estructura base del equipo, donde cada pieza ha sido marcada con una letra distintiva. Esta identificación visual permite relacionar fácilmente cada componente con los datos consignados en la tabla de cuantificación de materiales (Figura 3-2).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-2. Identificación de piezas estructura base.

Se detalla la determinación del uso real de los materiales empleados en la fabricación de la estructura base y el arco del equipo. A través de un análisis específico, se cuantifica el porcentaje de material efectivamente utilizado en cada componente, considerando las dimensiones estándar adquiridas y el material sobrante. Este desglose permite evaluar de manera precisa el rendimiento de la materia prima, optimizando su planificación y minimizando los desperdicios durante el proceso de fabricación. La tabla que se presenta a continuación incluye información detallada de cada pieza identificada previamente en las figuras, relacionando su dimensión, unidades requeridas, porcentaje de aprovechamiento y costo estimado, lo que facilita el control de insumos y la interpretación técnica de los datos (Tabla 3-3).

Tabla 3-3. Uso real de materiales estructura base del equipo.

Elemento	Pieza	Medida (mm)	u. por pieza	Medida total por pieza (mm)	Medida total (mm)	Uso real de insumo	Costo real \$	Costo real UF
4 perfiles cuadrados 200×200×6 mm× 6 m	J G	4.860 1.855	4 2	19.440 3.710	23.150	96,46%	1.084.873	27,62
4 perfiles rectangulares 200×150×6 mm × 6 m	I A M B W	1.050 1.302 1.460 1.135 105	4 4 3 4 4	4.200 5.208 4.380 4.540 420	18.748	78,12%	724.784	18,45
2 perfiles rectangulares 250×150×6 mm × 6 m	D	4.860	2	9.720	9.720	81%	897.265	22,84
2 perfiles cuadrados 100×100×5 mm × 6 m	E X	1.135 45	6 6	6.810 270	7.080	59%	135.042	3,44
Oruga de goma 400×72.5×72 k	L						3.310.556	84,27
8 planchas de acero 10 m m×1000 m m ×3000 mm	F C	3.745×718 1.435×718 3.745×1.435 435×335×150 2	2 2 2 4	53.742.200 20.598.600 107.353.500 43.732.500 (mm³)	225.426.800 (mm³)	93,93%	1.730.263	44,04
16 perfiles cuadrados 150×150×6 mm × 6 m	Ñ O P S T	1.810,6 750 1.398 899,5 1.716,4	16 16 16 16 8	28.969,6 12.000 22.368 14.392 13.731,2	91.460,8	95,27%	3.472.171	88,38
8 perfiles cuadrados 100×150×6 mm × 6 m	Q	1.553,2 1.255,1 291,2 1.071,3	8 8 16 16	12.425,6 10.040,8 4.659,2 17.140,8	44.266,4	92,22 %	1.383.300	35,21
7 planchas de acero de 10 mm×10 00 mm ×3000 mm	K	138×138×850 553×595x51 305×348x92 (144×92×10) /2	4 4 4 16	64.749.600 67.072.350 39.053.210 1.057.536 (mm³)	171.932.696 (mm³)	81,4%	1.312.251	33,40
8 planchas de acero de 10 mm×10 00 mm ×3000 mm	V	138×138×600 390×420×10 216×245×10 (65×102×10) /2	16 16 16 64	182.860.800 26.208.000 8.467.200 2.121.600 (mm³)	219.657.600 (mm³)	91,52%	1.685.583	42,91
15 planchas de acero de 10 mm×10 00 mm ×3000 mm	R	135×135×1016 420×390×36 215.2×245×65 (65×102×10) /2	16 16 16 64	295.718.400 94.348.800 54.991.360 2.121.600 (mm³)	447.180.160 (mm³)	99,37 %	3.432.724	87,38
TOTAL							17.182.558	454,91

Fuente: Elaboración propia

Se presentan detalladamente los materiales utilizados para la construcción de una estructura base y ocho arcos, especificando el uso real de insumos, costos en pesos chilenos y su equivalente en Unidades de Fomento (UF). Los materiales han sido seleccionados y calculados cuidadosamente para optimizar el rendimiento y minimizar desperdicios. El costo total de los materiales es de 20.595.384 pesos, lo que equivale a 524,26 unidades de fomento, garantizando la precisión y robustez necesaria para el proyecto.

Es importante destacar que las letras Ñ, O, P, Q, R, S, T, V corresponden a los componentes necesarios para 8 arcos, las demás letras se destinan exclusivamente a la estructura principal de la máquina, lo que permite separar claramente las necesidades de material entre ambas secciones principales del equipo. Este análisis asegura una distribución precisa de los recursos, optimizando la planificación y los costos generales del proyecto.

La tabla 3-3, mejora el análisis presentado con anterioridad al calcular el costo real de los materiales en función del uso efectivo. Esto permite una gestión más precisa de los recursos, evidenciando los materiales sobrantes y su impacto económico en el proyecto.

3.4. COSTO DE MANO DE OBRA

En este apartado se presenta el costo de mano de obra del equipo con el método de porcentaje de costos de material con el fin de estimar con respaldo técnico y referencias de practica industrial el valor de la fabricación de la máquina.

Para estimar el costo real de fabricación del prototipo de la máquina para fortificación minera, es necesario incluir, además de los materiales, el costo de la mano de obra directa y los costos indirectos de fabricación.

Los costos de fabricación de un producto se componen principalmente de:

- Materiales directos: materias primas y componentes utilizados.
- Mano de obra directa: tiempo y salario del personal involucrado en la fabricación.
- Costos indirectos de fabricación (Overhead): gastos generales relacionados con el proceso productivo, como supervisión, energía y herramientas auxiliares (PUCV, 2018).

Para determinar el porcentaje adecuado de mano de obra, se utilizó un enfoque basado en la complejidad del producto, los productos se pueden clasificar según su nivel de dificultad de fabricación, lo que impacta directamente en el costo de mano de obra (Go Bridgit, 2021) (FasterCapital, 2023) (Tabla 3-4).

Tabla 3-4. Clasificación de complejidad de fabricación.

Nivel de complejidad	Descripción	Mano de obra estimada sobre materiales
Baja	Productos simples, pocas piezas, ensamblaje básico.	10 % – 15%
Media	Productos con múltiples componentes y procesos controlados.	20 % – 30 %
Alta	Sistemas complejos, integración de automatización, soldaduras críticas.	35 % – 50 %

Fuente: (Go Bridgit, 2021)

La máquina propuesta fue clasificada como un proyecto de alta complejidad, ya que su diseño está destinado a operar en entornos mineros con condiciones geológicas exigentes. Este tipo de equipos requiere componentes estructurales de alta resistencia, uniones de precisión y procesos de fabricación especializados que garanticen seguridad y durabilidad.

Para este nivel de complejidad se aplica un rango de 35 %–50 % sobre el costo de materiales para estimar la mano de obra directa. En este caso, se utilizó un valor intermedio de 40 %, lo que permite reflejar de manera realista el esfuerzo requerido para su construcción y se considera un 10% de overhead lo que corresponde a costos indirectos de administración, logística y gestión, se realizan los cálculos para materiales estimados y materiales reales.

I. Materiales estimados:

- Mano de obra (40 %): $24.190.544 \times 0,40 = 9.676.218$
- Subtotal: $24.190.544 + 9.676.218 = 33.866.762$
- Overhead (10 %): $33.866.762 \times 0,10 = 3.386.676$
- Total final: 37.253.438 CLP

II. Materiales reales:

- Mano de obra (40 %): $20.777.718 \times 0,40 = 8.311.087$
- Subtotal: $20.777.718 + 8.311.087 = 29.088.805$
- Overhead (10 %): $29.088.805 \times 0,10 = 2.908.881$
- Total final: 31.997.686 CLP

Estos valores reflejan no solo el gasto en materiales, sino también los recursos humanos y los costos indirectos asociados al desarrollo, garantizando una proyección económica más ajustada a las condiciones reales de fabricación. Con ello, se proporciona una base sólida para la toma de decisiones y la justificación financiera del proyecto.

3.5. COSTO TOTAL

En este apartado se presenta un resumen de los principales costos del proyecto, incluyendo materiales, prototipo virtual y mano de obra, con el fin de estimar la inversión total requerida para su ejecución.

Se presenta un resumen comparativo de los costos involucrados en el desarrollo del proyecto. Se distingue entre los valores asociados al prototipo virtual, la estimación inicial de materiales, el uso real de estos, y los costos de mano de obra, permitiendo visualizar de manera integral los distintos escenarios de inversión requeridos para su ejecución (Tabla 3-5).

Tabla 3-5. Resumen costo total del proyecto.

Ítem	Descripción	Costo total CLP \$	Costo total UF
1	Prototipo virtual (Software y Hardware)	2.396.360	62,44
2	Materiales estimados para fabricación	20.595.384	524,26
3	Materiales realmente utilizados	17.182.558	454,91
4	Cargos y sueldos	1.198.800	31,25
5	Mano de obra y overhead (40% + 10%) con materiales estimados	13.063.094	332,70
6	Mano de obra y overhead (40% + 10%) con materiales reales	11.220.968	297,78
7	TOTAL CONSIDERANDO MATERIALES ESTIMADOS	37.253.638	950,61
8	TOTAL CONSIDERANDO MATERIALES REALES	31.998.686	816,52

Fuente: Elaboración propia

3.6. COSTOS DE IMPREVISTOS

En esta sección se detalla el cálculo de los costos asociados a posibles imprevistos que puedan surgir durante el desarrollo del proyecto. Para mitigar el impacto financiero de situaciones no previstas, se ha considerado un incremento del 5% sobre el costo total estimado del proyecto, que incluye los materiales, el prototipo virtual y los costos de mano de obra.

Costo de imprevistos: $\$37.253.638 \times 0,05 = \$1.862.682$

Por lo tanto, se asigna un monto adicional de \$1.862.682 para cubrir imprevistos, llevando el total estimado de costos a:

Total, con imprevistos = $\$37.253.638 + \$1.209.527 = \$39.116.320$

Este margen de seguridad financiera asegura que el proyecto pueda absorber cualquier eventualidad, manteniendo la continuidad de las actividades planificadas y evitando retrasos significativos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo de este proyecto permitió abordar de manera integral la problemática asociada a los procesos de fortificación minera en entornos de alta sismicidad, mediante el diseño de un equipo automatizado orientado al transporte e instalación de marcos prefabricados de hormigón armado. El uso de tecnologías de modelado tridimensional y visualización mediante realidad virtual inmersiva no interactiva constituyó un recurso clave para validar el diseño, evaluar su viabilidad técnica y comunicar de forma efectiva las características funcionales de la solución propuesta.

Se optó por una simulación no interactiva debido a limitaciones técnicas y de alcance del proyecto, priorizando la creación de un recorrido guiado capaz de comunicar eficazmente el diseño y su funcionalidad, sin comprometer los objetivos de validación.

El trabajo comprendió un análisis detallado de las deficiencias del sistema actual, destacando limitaciones en seguridad, eficiencia operativa y precisión de la instalación. A partir de este diagnóstico, se definieron especificaciones técnicas orientadas a garantizar la adaptabilidad del equipo, su compatibilidad con estándares normativos vigentes y la optimización de los tiempos de operación. La metodología Stage-Gate aplicada facilitó el control riguroso de cada etapa, permitiendo identificar tempranamente riesgos y efectuar ajustes que fortalecieran la propuesta final.

La integración de herramientas como Fusion 360 y Unity fue esencial para crear un modelo virtual del equipo y su entorno, generando un recorrido que aporta valor a la comprensión espacial del proyecto. Esta visualización posibilitó la revisión técnica sin necesidad de fabricar un prototipo físico, reduciendo costos y tiempos de ejecución. Aunque el resultado final no contempló interacción directa en tiempo real, la experiencia inmersiva lograda mediante la reproducción del recorrido en visores Oculus permitió acercar el modelo digital al usuario de manera didáctica y realista.

Desde el punto de vista económico, se realizó una estimación detallada de los costos asociados tanto al desarrollo virtual como a la construcción efectiva del equipo, incluyendo los recursos humanos y los imprevistos. Este análisis contribuye a dimensionar el impacto de la propuesta y facilita la toma de decisiones por parte de la empresa solicitante. En términos generales, se concluye que los objetivos planteados al inicio fueron cumplidos al desarrollar una solución técnica que mejora la seguridad, la continuidad operativa y la eficiencia del proceso de fortificación minera.

Finalmente, Se recomienda que, en futuros desarrollos, se aborden las limitaciones del prototipo actual derivadas del uso de una realidad virtual no interactiva. La incorporación de simulaciones interactivas en tiempo real y la integración de datos provenientes de sensores permitirían una validación más completa de las condiciones operativas, mejorando la precisión del análisis y fortaleciendo la toma de decisiones para su implementación en faenas reales.

BIBLIOGRAFÍA

- A. <http://htdrillingmachines.com/2-1-hydraulic-drilling-jumbo/>
- B. Brzovic Pérez, A. (2015). *Análisis de la densidad de las fallas mayores (P21) en la mina El Teniente* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/134738>
- C. Codelco. (2018). *El Teniente habilita Panel 2 de mina Esmeralda y accede a importantes recursos mineros*. Corporación Nacional del Cobre, Chile. [https://www.codelco.com/el-teniente-habilita-panel-2-de-mina-esmeralda-y-accede-a-importantes-recursos-mineros​;contentReference\[oaicite:0\]{index=0}](https://www.codelco.com/el-teniente-habilita-panel-2-de-mina-esmeralda-y-accede-a-importantes-recursos-mineros​;contentReference[oaicite:0]{index=0})
- D. Sandvik Mining and Rock Solutions. (2023). *Sandvik amplía sus soluciones de automatización en la mina El Teniente*. [https://www.rocktechnology.sandvik/sandvik-amplia-sus-soluciones-de-automatizacion-en-la-mina-el-teniente/​;contentReference\[oaicite:1\]{index=1}](https://www.rocktechnology.sandvik/sandvik-amplia-sus-soluciones-de-automatizacion-en-la-mina-el-teniente/​;contentReference[oaicite:1]{index=1})
- E. Codelco. (2018). *Proyecto Recursos Norte de El Teniente inició oficialmente su etapa productiva*. Guía Minera de Chile. [https://www.guiaminera.cl/proyecto-recursos-norte-de-el-teniente-inicio-oficialmente-su-etapa-productiva/​;contentReference\[oaicite:0\]{index=0}](https://www.guiaminera.cl/proyecto-recursos-norte-de-el-teniente-inicio-oficialmente-su-etapa-productiva/​;contentReference[oaicite:0]{index=0})
- F. Codelco. (2020). *Recursos Norte, El Teniente*. Corporación Nacional del Cobre, Chile. <https://www.codelco.com>
- G. Gobierno de Chile. (1968). Ley N° 16.744 sobre Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales. Recuperado de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=28650>
- H. Ministerio de Minería. (2002). Decreto Supremo N° 132: Reglamento de Seguridad Minera. Recuperado de <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2017/11/Reglamento-seguridad-minera.pdf>
- I. Instituto Nacional de Normalización. (2006). NCh204 Of.2006: Diseño Estructural en Acero. Recuperado de <https://www.inn.cl/nch204>
- J. Instituto Nacional de Normalización. (2020). NCh429/1:2020: Hormigón - Requisitos Generales. Recuperado de <https://www.inn.cl/nch429-1>
- K. Ministerio del Medio Ambiente. (1994). Ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente. Recuperado de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>
- L. Ministerio del Medio Ambiente. (2013). Decreto Supremo N° 40/2013: Reglamento del SEIA. Recuperado de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1042763>
- M. Instituto Nacional de Normalización. (2003). NCh4/2003: Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión. Recuperado de <https://www.inn.cl/nch4>
- N. Instituto Nacional de Normalización. (2000). NCh Elec 2000: Reglamento Eléctrico Chileno. Recuperado de <https://www.inn.cl/nchelec2000>

BIBLIOGRAFÍA

- Ñ. Ministerio de Minería. (2012). Decreto Supremo N° 10: Normativa para Automatización en Minería. Recuperado de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1037048>
- O. Gobierno de Chile. (1999). Ley N° 19.628 sobre Protección de la Vida Privada. Recuperado de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=141599>
- P. International Organization for Standardization. (2010). ISO 9241-210: Ergonomía de la Interacción Humano-Sistema. Recuperado de <https://www.iso.org/standard/52075.html>
- Q. ASUS. (2024). *Notebook ROG Strix G16 2024, i9, 16GB, 1TB SSD, RTX4060, 16", 165 Hz (G614JVR-N3107W)*. Recuperado de <https://cl.store.asus.com/90nr0ii6-m00470-notebook-rog-strix-g16-2024-i9-16gb-1tb-ssd-rtx4060-16-165-hz-g614jvr-n3107w.html>
- R. Prodalam. (s.f.). *Perfil cuadrado 200mm x 200mm x 6mm espesor de 6m largo*. <https://www.prodalam.cl/productos/41399-UN/perfil-cuadrado-200mm-x-200mm-x-6mm-espesor-de-6m-largo?grupo=WA000068>
- A. Prodalam. (s.f.). *Plancha de acero laminada en caliente de 10 mm x 1000 mm x 3000 mm*. Prodalam. <https://www.prodalam.cl/productos/32144-UN/plancha-de-acero-laminada-en-caliente-de-10mm-x-1000mm-x-3000mm?grupo=WA000042>

