



# Análisis Técnico-Económico de un Sistema GESS (Gravity Energy Storage System) en Minería Chilena Contribución a la Sostenibilidad y Descarbonización al 2050

---

VICENTE ANDRÉS SOUMASTRE MOLINA

---

2025

Requisito parcial para obtener el título de:  
Ingeniero Electricista

Profesor Guía:  
Dra. Margarita Norambuena (UTFSM)

Profesor Correferente:  
Danny Espín (UTFSM)

Comisión:  
Dra. Margarita Norambuena (UTFSM)  
Danny Espín (UTFSM)

Valparaíso, julio, 2025.



## 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:** Análisis Técnico-Económico de un Sistema GESS (Gravity Energy Storage System) en Minería Chilena Contribución a la Sostenibilidad y Descarbonización al 2050

**Nombre del candidato(a):** Vicente Andrés Soumastre Molina

**Carrera / Grado:** Ingeniería Eléctrica

**Campus:** Casa Central Valparaíso ; **Departamento:** Ingeniería Eléctrica

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Margarita Norambuena, 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:** 22-07-2025

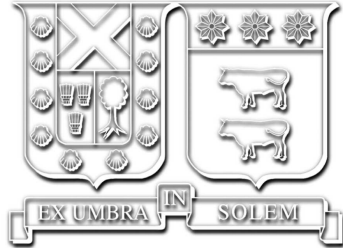
**; Firma:**

**Estudiante o Candidato(a):**

**Fecha:** 22-07-2025

**; 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.*



# Análisis Técnico-Económico de un Sistema GESS (Gravity Energy Storage System) en Minería Chilena Contribución a la Sostenibilidad y Descarbonización al 2050

---

VICENTE ANDRÉS SOUMASTRE MOLINA

---

2025

*“Entre más oscura la noche, más brillan las estrellas”  
— Fiódor Dostoievski*

# Agradecimientos

Agradezco a mi familia por guiarme y fortalecerme durante estos años. A mi padre Andrés, por enseñarme a ser resolutivo, a mi madre Claudia por enseñarme el significado del afecto. A mis hermanas Camila y Catalina, donde la sinceridad en nuestras conversaciones siempre están acompañadas de franqueza y cariño, enseñándome la importancia de la buena comunicación.

A mi pareja, amigos y compañeros, gracias por acompañarme en los triunfos y las derrotas. Por cada instancia académica, recreacional o deportiva. Por cada café compartido después de un almuerzo. Cada conversación profunda o simple. Los atesoraré con cariño.

En el ámbito académico, agradecer a mi profesora guía Margarita Norambuena y a Danny Espín, por permitirme soñar con un proyecto el cual pude materializar en este trabajo.

A todos y todas muchas gracias por cada aporte a través de los años, por siempre hacerme sentir capaz.

# Índice de Contenidos

<b>Índice de Contenidos</b>	<b>I</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>IV</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>VI</b>
<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Generales	3
1.1.2. Específicos	3
1.2. Estructura del documento	4
<b>2. Revisión bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1. Sistemas de almacenamiento de energía	5
2.1.1. Tipos de almacenamiento	6
2.1.1.a. Electroquímico	6
2.1.1.b. Electromagnético	7
2.1.1.c. Mecánico	7
2.1.1.d. Químico	7
2.1.1.e. Térmico	7
2.2. Almacenamiento GESS	8
2.2.1. Gravitricity	10
2.2.2. Energy Vault	11
2.2.3. ARES (Advanced Rail Energy Storage)	12
2.3. Mercado Eléctrico Chileno	13
2.4. Marco Regulatorio	15
2.4.1. Ley N° 20.936	15
2.4.1.a. Artículo 72°-1: Principios de la Coordinación de la Operación	15
2.4.1.b. Artículo 72°-2: Obligación de Sujetarse a la Coordinación del	
Coordinador	15
2.4.1.c. Artículo 72°-3: Coordinación del Mercado Eléctrico	16
2.4.1.d. Artículo 72°-7: Servicios Complementarios	16
2.4.1.e. Artículo 72°-17: Construcción, Interconexión y Puesta en Servicio	16
2.4.2. Decreto Supremo N° 125	17
2.4.2.a. Artículo 90	17
2.4.2.b. Artículo 92	17

2.4.2.c. Artículo 93	17
2.4.2.d. Artículo 94	18
2.4.2.e. Artículo 97	18
2.4.3. Ley N° 21.505	18
2.4.3.a. Artículo 72°-2	19
2.4.3.b. Artículo 149°	19
2.4.3.c. Artículo 149° bis	19
2.4.4. Modificaciones en el reglamento de transferencias de potencia	19
2.4.4.a. Reconocimiento de Sistemas de Almacenamiento de Energía y su componente en régimen transitorio	20
2.4.4.b. Reconocimiento de Sistemas de Almacenamiento de Energía y su componente en régimen permanente	20
2.4.4.c. Modificaciones a la operación de Sistemas de Almacenamiento de Energía y Centrales Renovables con Capacidad de Almacenamiento	20
<b>3. Mina Los Colorados</b>	<b>21</b>
3.1. Capacidad de almacenamiento	23
<b>4. Análisis técnico</b>	<b>25</b>
4.1. Ecuaciones	25
4.1.1. Fuerzas de roce	26
4.1.2. Supuestos del sistema	28
4.2. Sistema de carga	28
4.3. Sistema de descarga	29
4.4. Observaciones de los sistemas	31
4.4.1. Variación de pendiente	31
4.4.2. Variación de velocidad	33
4.4.3. Variación de fricción	33
4.5. Caso Minero	35
4.5.1. Sistema GESS en pendiente	35
4.5.2. Análisis de bloques	36
4.5.3. Elección del cable GESS	38
4.5.3.a. Cálculo del área de los cables	39
4.5.3.b. Uso de múltiples cables	39
4.5.4. Selección del Riel AREMA 115 RE para Soporte de Bloques de 100 Toneladas	40
4.6. Eficiencia del sistema	41
4.7. Conclusiones Análisis Técnico	42
<b>5. Análisis Económico</b>	<b>44</b>
5.1. Costo de inversión y operación	44
5.1.1. CAPEX y OPEX	44
5.2. Costo nivelado de la energía	48
5.2.1. LCOE	49
5.2.2. Consideraciones sobre el LCOE	50
5.3. Índices económicos	52
5.3.1. VAN y TIR	54

---

5.3.1.a. VAN	54
5.3.1.b. TIR	55
5.4. Incentivos para el almacenamiento	57
5.4.0.a. Terrenos Fiscales	57
5.4.0.b. Apoyos CORFO	58
5.4.0.c. Bancos Internacionales	58
5.5. Conclusiones análisis económico	59
<b>6. Conclusiones</b>	<b>61</b>
<b>Apéndices</b>	<b>63</b>
<b>A. Códigos</b>	<b>63</b>
A.0.1. Caso base GESS	63
A.0.2. Aspectos técnicos	64
A.0.3. Cables	65
A.0.4. LCOE	66
A.0.5. VAN, TIR e ingresos	67
<b>Bibliografía</b>	<b>69</b>

# Índice de Figuras

1.1. Proyección de oferta por compuesto de litio y demanda agregada (kt LCE), 2020-2035 [1]. . . . .	3
2.1. Aplicaciones de los sistemas de almacenamiento de energía EESS (del inglés, Electric Energy Storage System) [2]. . . . .	6
2.2. Tipos de sistemas GESS: suspensión y tracción en pendiente [3]. . . . .	9
2.3. Ilustración sistema Gravistore - Gravity Power Storage [4]. . . . .	10
2.4. Primer prototipo torre Energy Vault [5]. . . . .	11
2.5. Etapa de construcción del proyecto EVx™ de Energy Vault en Rudong, China [5]. . . . .	12
2.6. Prototipo Tren eléctrico de ARES [6]. . . . .	12
2.7. Concepto de remuneración en el mercado eléctrico [7]. . . . .	14
2.8. Reconocimiento de Potencia Inicial de un Sistema de Almacenamiento de Energía [8]. . . . .	20
3.1. Vista aérea Mina Los Colorados [9]. . . . .	21
3.2. Vista aérea Mina Los Colorados [9]. . . . .	22
3.3. Retiros físicos y valorizados de la barra S/E Los Colorados de un día al azar [10]. . . . .	23
4.1. Rodadura de un cilindro deformable sobre un pavimento indeformable [11].	26
4.2. Sistema simplificado de carga (elaboración propia). . . . .	28
4.3. Sistema simplificado de descarga (elaboración propia). . . . .	30
4.4. Efecto de la pendiente en el sistema GESS. . . . .	32
4.5. Potencia vs velocidad. . . . .	33
4.6. Efecto del coeficiente de rodadura en el sistema GESS. . . . .	34
4.7. Comparación entre las opciones consideradas para implementar el sistema GESS [12]. . . . .	35
4.8. Comparación entre Peso y Área con respecto a la Longitud del Cable. . .	39
4.9. Área vs. Longitud para varios cables . . . . .	40
4.10. Sistema Unifilar GESS (elaboración propia). . . . .	41
5.1. Análisis de sensibilidad del LCOE en función de distintos parámetros. . .	51
5.2. Retiros físicos y valorizaciones por hora de la barra SE Los Colorados [10].	53
5.3. Relación entre la TIR y la energía objetivo diaria. . . . .	57
A.1. Caption 1 . . . . .	63
A.2. Caption 2 . . . . .	63
A.3. Caption 1 . . . . .	64

---

A.4. Caption 2	64
A.5. Caption 3	64
A.6. Caption 4	64
A.7. Caption 1	65
A.8. Caption 2	65
A.9. Caption 3	65
A.10. Caption 4	65
A.11. Caption 1.	66
A.12. Caption 2.	66
A.13. Caption 3.	66
A.14. Caption 1.	67
A.15. Caption 2.	67
A.16. Caption 3.	67
A.17. Caption 4.	67
A.18. Caption 5.	68

# Índice de Tablas

4.1. Parámetros del Sistema GESS	31
4.2. Resultados del dimensionamiento del sistema GESS.	36
4.3. Densidad media y volumen requerido por material para bloques de 100 toneladas.	37
4.4. Características de bloques para un sistema GESS de 10 MW [A.0.1].	38
4.5. Comparación de Perfiles de Rieles Ferroviarios	40
5.1. Descripción técnica del sistema de almacenamiento – Opción 2 [13].	45
5.2. Ítems considerados en la estimación de costos del proyecto [13].	45
5.3. Resumen de costos estimados del sistema BESS – Opción 2 [13].	46
5.4. Parámetros operacionales del sistema GESS.	47
5.5. Costo estimado de inversión para el sistema GESS.	47
5.6. Parámetros para el cálculo del LCOE del sistema GESS	49
5.7. Parámetros constantes para análisis de LCOE.	50
5.8. Resumen de resultados económicos para el día 2 Febrero 2024.	54
5.9. Resultados anuales considerando costos operativos y de carga.	54
5.10. Parámetros considerados para el cálculo del VAN y resultado del mismo.	55
5.11. TIR calculado para proyecto.	56

# Resumen

El presente trabajo analiza la viabilidad técnica y económica de implementar un sistema de almacenamiento gravitacional de energía GESS (del inglés, Gravity Energy Storage System) en la minería chilena, específicamente en la Mina Los Colorados, propiedad de la Compañía Minera del Pacífico (CMP). Este estudio se aporta en el desafío nacional del Plan de Descarbonización al 2050, que busca reducir la dependencia del carbón mediante la incorporación de fuentes renovables, destacando la necesidad crítica de soluciones de almacenamiento energético.

Ante los retos ambientales y de suministro asociados a los sistemas de almacenamiento electroquímico tales como los sistemas BESS (del inglés, Battery Energy Storage Systems), particularmente aquellos basados en litio, se propone el GESS como alternativa sustentable. Este sistema opera almacenando energía mediante la elevación de masas utilizando excedentes de energía renovable y generando electricidad al descender dichas masas. Su implementación permite aprovechar infraestructuras mineras existentes y reutilizar residuos mineros como elementos de almacenamiento, reduciendo significativamente los costos iniciales y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental.

El análisis técnico realizado comprende la evaluación del sistema mecánico de almacenamiento mediante rieles y bloques, considerando variables como pendiente, velocidad, coeficientes de fricción y la elección óptima de cables y rieles específicos. Se complementa con un análisis económico detallado que incluye estimaciones de costos (CAPEX y OPEX), determinación del costo nivelado de la energía LCOE (del inglés, Levelized Cost of Energy), costo nivelado del almacenamiento LCOS (del inglés, Levelized Cost of Storage), valor actual neto (VAN) y tasa interna de retorno (TIR).

Finalmente, este estudio concluye que el sistema GESS presenta ventajas significativas frente a otras tecnologías, especialmente en términos de vida útil, sostenibilidad ambiental y potencial económico, posicionándolo como una solución viable y estratégica para el almacenamiento energético en el contexto de la transición energética chilena hacia el año 2050.

# Capítulo 1

## Introducción

Chile enfrenta el desafío del Plan de Descarbonización 2050, que implica el retiro de las centrales a carbón y la adopción de nuevas soluciones tecnológicas y políticas para garantizar una transición energética viable. La estrategia nacional ha impulsado el desarrollo de energías renovables, especialmente solar y eólica. Sin embargo, la variabilidad de estas fuentes plantea problemas de estabilidad en el sistema eléctrico [14], tales como la estabilidad de frecuencia, ya que las energías renovables variables (ERV), como la solar fotovoltaica y la eólica, no aportan inercia rotacional al sistema. Esto significa que, ante una perturbación o falla, la frecuencia puede variar rápidamente, dificultando el control y aumentando el riesgo de desconexiones. Por otro lado, la estabilidad de tensión también se ve comprometida, dado que las ERV no responden de manera natural a variaciones de voltaje como lo hacen los generadores síncronos, lo que puede provocar caídas de tensión o inestabilidades locales. Además, la intermitencia inherente a estas tecnologías genera desbalances entre oferta y demanda, especialmente en periodos de rápida variación de generación, lo que complica el despacho óptimo de la energía y obliga a disponer de reservas operativas que permitan mantener tanto el equilibrio del sistema como la estabilidad de precios.

Para mitigar este desafío, se ha promovido la implementación de sistemas de almacenamiento de energía BESS, que permiten almacenar el excedente energético y evitar vertimientos (momentos en los cuales la energía se desperdicia al no poder ser usada) [15], [16]. Entre 2023 y 2024, la capacidad de almacenamiento en el Sistema Eléctrico Nacional creció de 1.031 MW a 2.825 MW, elevando su participación del 3,1 % al 8,1 % en la capacidad total instalada [17]. No obstante, el crecimiento de los BESS ha intensificado la demanda de litio, generando preocupaciones sobre su suministro futuro. Según Cochilco, se proyecta un déficit de litio a partir de 2027, lo que podría afectar la expansión de estos sistemas [18], como se puede observar de la Figura 1.1.

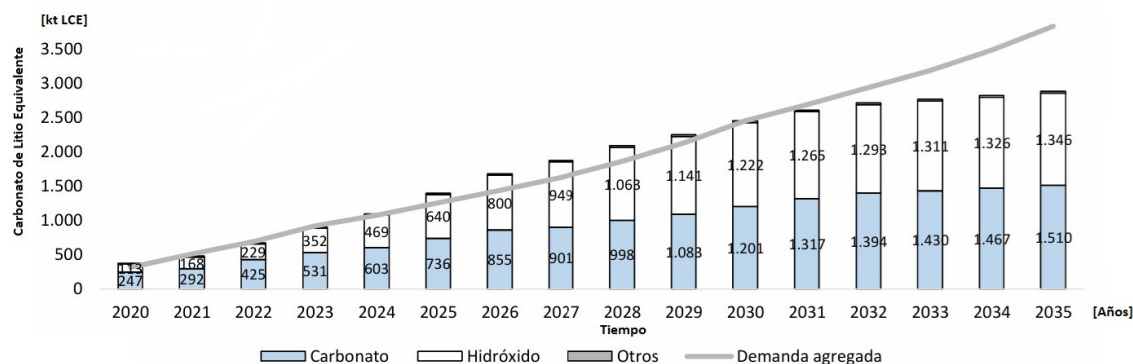


Figura 1.1: Proyección de oferta por compuesto de litio y demanda agregada (kt LCE), 2020-2035 [1].

Además, el reciclaje de baterías sigue siendo un problema crítico. En Chile, solo el 5 % de las baterías de litio en desuso se recicla [19], lo que genera riesgos ambientales como la contaminación de suelos y aguas. Dado que estos desafíos podrían comprometer la sostenibilidad del Plan de Descarbonización, es necesario evaluar alternativas de almacenamiento más sostenibles.

Esta trabajo propone el uso de sistemas de almacenamiento por gravedad GESS, una tecnología no implementada en Chile. Estos sistemas almacenan energía elevando una masa mediante una máquina eléctrica operando como motor, para luego liberarla cuando la masa desciende y la máquina actúa como generador [20].

Los GESS presentan ventajas sobre las baterías de litio en términos de sostenibilidad y rentabilidad, especialmente si se reutilizan desechos mineros como masa de almacenamiento y se emplean minas en desuso como infraestructura base para generar diferencias de alturas. Esto es especialmente relevante, ya que el costo de excavación, para generar la diferencia de altura representa aproximadamente el 50 % del costo inicial de este tipo de proyectos [21].

En este contexto, se evaluará la viabilidad técnica y económica de implementar un sistema GESS en minería, analizando su impacto en la infraestructura existente y su contribución a la sostenibilidad.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. Generales

Analizar un sistema de almacenamiento GESS para operaciones mineras, evaluando el desempeño técnico, económico y operativo.

### 1.1.2. Específicos

- Investigar actuales y futuras necesidades del sector eléctrico chileno en el ámbito de almacenamiento de energía, enfocado en los objetivos del programa de descarbonización al 2050 en Chile.

- Analizar proyectos internacionales de almacenamiento gravitacional, para identificar oportunidades y posibles adaptaciones al contexto chileno.
- Evaluar principios técnicos y operativos del sistema GESS, analizando la capacidad de almacenamiento requerida y los beneficios potenciales que este sistema puede aportar tanto a la red eléctrica como a las operaciones mineras.
- Evaluar la viabilidad económica de implementar un sistema GESS en minería chilena.

## 1.2. Estructura del documento

### Capítulo 1: Introducción

Se expone el contexto general y la motivación detrás de esta memoria, con el propósito de justificar su realización. Además, se presentan cifras y datos relevantes que respaldan la importancia del estudio desarrollado en este documento.

### Capítulo 2: Revisión Bibliográfica

Se realizará una recopilación de la información técnica y científica relacionada con los estudios de baterías GESS, con el fin de contextualizar y fundamentar la investigación, otorgándole sustento. Además, se presenta información técnica y económica sobre tecnologías GESS para proponer una de estas tecnologías aplicable al ámbito minero.

### Capítulo 3: Análisis Técnico

A partir de la bibliografía revisada, se establece las bases de los equipos, la geografía y los puntos relevantes a considerar para la implementación de un proyecto GESS.

### Capítulo 4: Aplicación en Minera

En respuesta a la demanda minera a largo plazo, las necesidades nacionales de descarbonización y la futura demanda energética, se buscará proponer un sistema GESS que reutilice zonas mineras en desuso o terrenos disponibles, otorgándoles una segunda vida útil como zonas de almacenamiento. Para ello, se definen los aspectos técnicos mínimos a considerar, tanto en las instalaciones como en la demanda a satisfacer.

### Capítulo 5: Análisis Económico

Aplicando el contexto minero, se realizó un análisis económico considerando costos de inversión tales como: Costo Nivelado de la Energía (LCOE), Costo Nivelado del Almacenamiento (LCOS), Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR). Esto permite evaluar y determinar la viabilidad económica de implementar un sistema GESS.

### Capítulo 6: Análisis de Resultados

Una vez obtenidos los datos económicos, se analizó la viabilidad del proyecto, evaluando primero la factibilidad técnica y económica del sistema en sí. Posteriormente, se compararán estos resultados con los costos existentes de las baterías de litio para establecer un marco comparativo.

# Capítulo 2

## Revisión bibliográfica

Este capítulo aborda los principales aspectos del almacenamiento de energía, con un enfoque específico en el almacenamiento gravitacional GESS. Se exploran las distintas tecnologías basadas en este principio, haciendo énfasis en las baterías GESS y sus diversas aplicaciones.

### 2.1. Sistemas de almacenamiento de energía

El fuerte crecimiento de las energías renovables ha generado la necesidad de garantizar un abastecimiento estable y confiable en la red eléctrica. Para ello, se han implementado baterías como método de almacenamiento de energía, lo que permite no solo la conservación de la electricidad generada, sino también el aporte a la estabilidad del sistema. Entre sus principales funciones, se destacan las siguientes:

- **Almacenamiento de energía a gran escala:** Permite participar en el mercado eléctrico mediante arbitraje energético, que consiste en almacenar energía cuando los precios son bajos y venderla en períodos de mayor demanda, obteniendo así un margen de ganancia. Además, este tipo de almacenamiento es útil para reducir los picos de demanda y optimizar la distribución de la energía en la red.
- **Servicios complementarios:** El almacenamiento de energía puede utilizarse para mejorar la estabilidad y robustez del sistema eléctrico. Algunas de sus aplicaciones incluyen:
  - **Control de tensión:** Evita fluctuaciones de voltaje que podrían dañar equipos eléctricos sensibles [22].
  - **Regulación de frecuencia:** Contribuye a mantener el equilibrio entre la generación y la demanda de energía, previniendo apagones [22].
  - **Arranque en negro:** Permite la recuperación del sistema eléctrico en casos de apagón total, facilitando la reincorporación de las unidades generadoras [20].
- **Integración de energías renovables:** Facilita la incorporación eficiente de fuentes renovables, permitiendo almacenar el exceso de generación cuando la demanda es baja y liberarla cuando sea necesario. Esto ayuda a compensar la intermitencia de

tecnologías como la energía solar y la energía eólica, asegurando un suministro más estable.

### 2.1.1. Tipos de almacenamiento

Dado el impacto y la relevancia del almacenamiento de energía, es posible clasificar los sistemas de almacenamiento en cinco categorías principales. A continuación, se describen brevemente las características y el funcionamiento de cada una de estas tecnologías. Un esquema de las baterías se puede observar en la Figura 2.1.

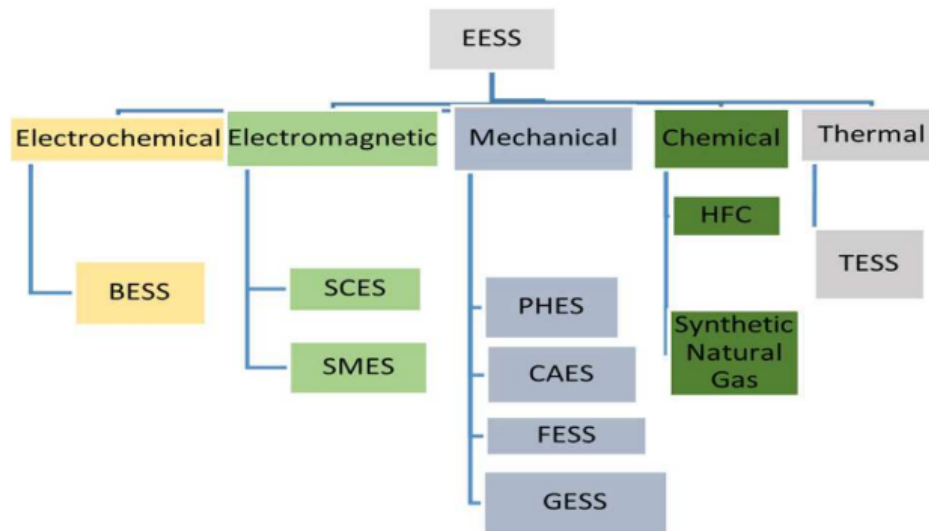


Figura 2.1: Aplicaciones de los sistemas de almacenamiento de energía EESS (del inglés, Electric Energy Storage System) [2].

#### 2.1.1.a. Electroquímico

El almacenamiento electroquímico convierte la energía química en energía eléctrica mediante un proceso de oxidación-reducción, el cual ocurre entre dos electrodos (ánodo y cátodo) a través de un electrolito, que permite la conducción de iones y el flujo de corriente en un circuito externo.

A lo largo del tiempo, han existido múltiples tecnologías de almacenamiento electroquímico, algunas de las cuales han sido eliminadas debido a su toxicidad. Actualmente, las baterías de ion-litio dominan el mercado global gracias a su alta densidad energética y versatilidad.

El método más utilizado en la actualidad para el almacenamiento a gran escala son los sistemas BESS, los cuales consisten en un conjunto de baterías interconectadas dentro de un único sistema, gestionado mediante un sistema de control que permite regular la energía almacenada y suministrarla según la demanda solicitada.

### 2.1.1.b. Electromagnético

Las baterías electromagnéticas almacenan energía a través de campos eléctricos o magnéticos. Los sistemas SMES (“Superconducting Magnetic Energy Storage”) utilizan superconductores, aprovechando sus propiedades magnéticas para almacenar energía, mientras que los sistemas SCES (“Supercapacitor Energy Storage System”) emplean supercapacitores como método de almacenamiento. Estos sistemas suelen tener alta eficiencia, pero presentan una capacidad de almacenamiento limitada en comparación con métodos tradicionales, además de contar con costos elevados.

### 2.1.1.c. Mecánico

Este tipo de almacenamiento convierte la energía mecánica en energía eléctrica mediante el movimiento de masas, como elevaciones de objetos o fluidos. Generalmente, estos sistemas se caracterizan por ser adecuados para almacenamiento a gran escala y de larga duración.

Entre los principales métodos de almacenamiento mecánico se encuentran:

- PHES (del inglés, Pumped Hydro Energy Storage): Usa el bombeo de agua hacia un embalse elevado cuando hay exceso de energía y la libera para generar electricidad cuando se requiere.
- CAES (del inglés, Compressed Air Energy Storage): Comprime aire en depósitos subterráneos y lo libera para accionar turbinas cuando se necesita electricidad.
- FESS (del inglés, Flywheel Energy Storage System): Almacena energía mediante la rotación de un objeto, generando inercia.
- GESS (del inglés, Gravity Energy Storage System): Eleva masas utilizando energía eléctrica y las deja descender para generar electricidad.

### 2.1.1.d. Químico

El almacenamiento químico utiliza energía para generar compuestos o elementos de alta densidad energética y almacenarlos. Posteriormente, mediante la aplicación de calor, se provoca una combustión que permite la generación de electricidad. Un ejemplo común es la generación de celdas de hidrógeno HFC (del inglés, Hydrogen Fuel Cell).

### 2.1.1.e. Térmico

El almacenamiento térmico consiste en el uso de altas o bajas temperaturas para modificar materiales con capacidad de retener y liberar calor, conocidos como TESS (del inglés, Thermal Energy Storage Systems). Según su aplicación, la energía térmica puede ser almacenada para su uso posterior o convertida directamente en electricidad.

Los usos más comunes de estas tecnologías se encuentran en centrales termosolares CSP (“Concentrated Solar Power”) y en sistemas comerciales donde es necesario conservar frío o calor de manera eficiente.

## 2.2. Almacenamiento GESS

Las baterías GESS representan una alternativa viable a los sistemas de almacenamiento convencionales, basándose en el principio del almacenamiento gravitacional de energía. Su funcionamiento es similar al de las centrales hidroeléctricas de bombeo, pero en lugar de utilizar agua, emplean una masa sólida que se eleva para almacenar energía y se libera para generar electricidad mediante un generador eléctrico.

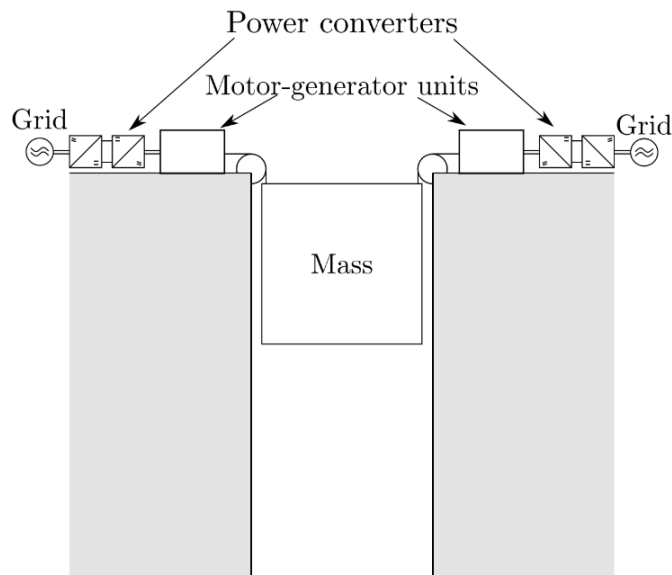
Este sistema permite dos formas principales de almacenamiento de energía: por un lado, genera energía potencial gravitatoria al elevar la masa a una altura  $h$ , determinada por la ecuación:

$$E = mgh \quad (2.1)$$

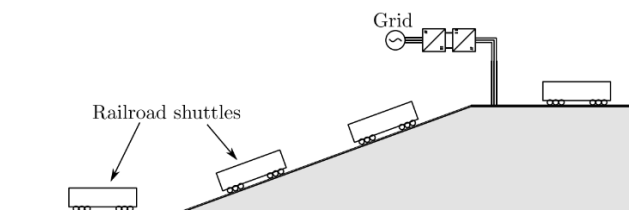
donde  $m$  es la masa del objeto,  $g$  la aceleración de la gravedad y  $h$  la altura alcanzada. Por otro lado, al descender, la masa transforma esta energía potencial en energía cinética, contribuyendo a la estabilidad del sistema eléctrico al proporcionar reserva de inercia y respuesta ante perturbaciones [23].

Los sistemas GESS pueden clasificarse en dos tipos principales (ver Figura 2.2):

- **Por suspensión:** donde una masa se eleva y desciende verticalmente en un eje fijo [24], ilustrada en la Figura 2.2 (a).
- **Por tracción en pendiente:** donde la masa es desplazada en una pendiente mediante un sistema de rieles o cables [25], ilustrada en la Figura 2.2 (b).



(a) Sistema GESS por suspensión.



(b) Sistema GESS por tracción en pendiente.

Figura 2.2: Tipos de sistemas GESS: suspensión y tracción en pendiente [3].

Aunque ambos comparten el mismo principio de almacenamiento, la elección entre una u otra depende de factores como el espacio disponible, la infraestructura existente y los costos asociados. Notar que, independiente del tipo de tecnología a utilizar, los componentes fundamentales en un sistema GESS incluyen la red eléctrica, que actúa como la fuente de alimentación y el punto de conexión con el sistema; el sistema de conversión de energía, encargado de transformar la energía eléctrica de la red en la forma adecuada para el motor y viceversa, permitiendo la regulación de velocidad, eficiencia y estabilidad del sistema eléctrico para garantizar una transferencia óptima de energía en procesos de carga y descarga; el motor-generador, responsable de convertir la energía eléctrica en energía mecánica para elevar la masa y, en sentido inverso, transformar la energía mecánica en eléctrica al descargar el sistema; y finalmente, el sistema mecánico de transmisión de potencia, generalmente un reductor, que adapta la velocidad y el torque entre el sistema de masas y el motor, asegurando una transferencia eficiente de los esfuerzos mecánicos.

En comparación con las baterías de litio, los sistemas GESS presentan varias ventajas significativas:

- **No sufren degradación por ciclos de carga y descarga**, lo que extiende su vida útil y reduce costos de mantenimiento [26].
- **Emisiones de carbono nulas durante su operación**, ya que el sistema es cerrado

y no involucra procesos químicos y/o residuos contaminantes [26].

- **Mayor viabilidad en regiones con escasez de agua**, ya que a diferencia de los sistemas hidroeléctricos de bombeo, los GESS no dependen de un recurso hídrico para su funcionamiento, lo que los hace atractivos en el contexto de creciente sequía a nivel nacional y global [27].

A continuación, se presentarán las principales tecnologías GESS existentes en el mercado global, detallando su principio de funcionamiento y características específicas.

### 2.2.1. Gravitricity

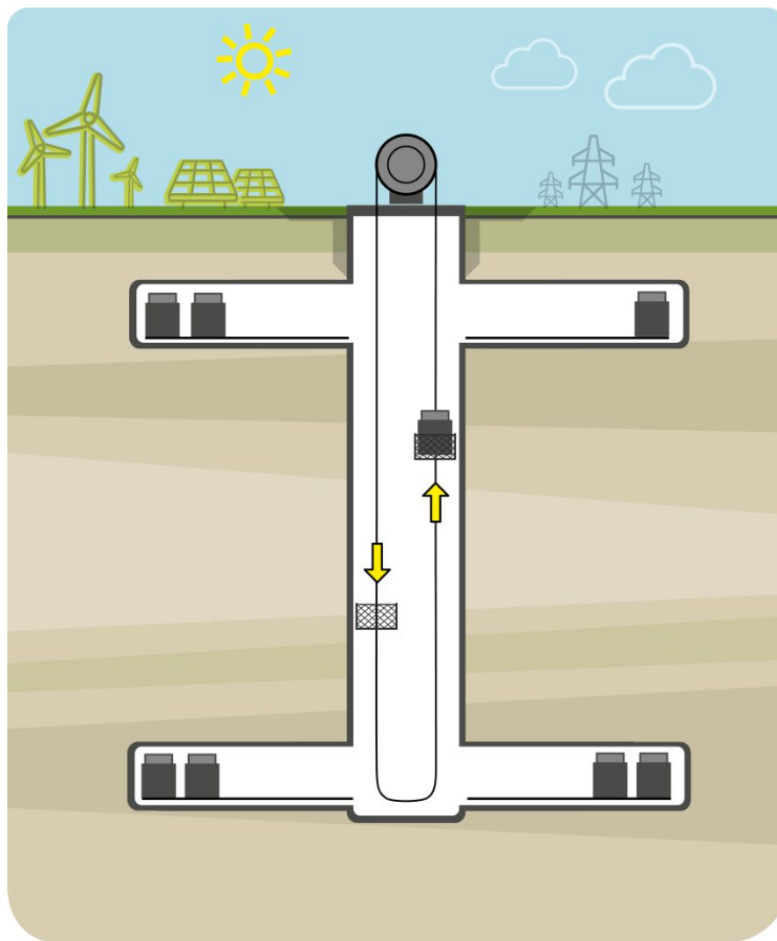


Figura 2.3: Ilustración sistema Gravitricity - Gravity Power Storage [4].

Gravitricity fue fundada en 2011 por Peter Fraenkel y Martin Wright con el objetivo de desarrollar sistemas de almacenamiento de energía basados en gravedad, enfocados en ofrecer una larga vida útil y alta eficiencia para respaldar la integración de energías renovables. En 2021, la empresa construyó su primer prototipo de almacenamiento gravitacional, un sistema de 250 kW con una torre de 15 metros y una masa de 50 toneladas, que logró conectarse exitosamente a la red en Edimburgo.

Actualmente, Gravitricity busca nuevas oportunidades y colaboraciones en el sector minero, aprovechando la reutilización de minas abandonadas e infraestructuras existentes para contribuir a la estabilidad eléctrica y promover la sostenibilidad energética (ilustración en Figura 2.3). La empresa tiene proyectos en fase de análisis y desarrollo en países como India, Finlandia, Alemania y Estados Unidos, entre otros.

Los sistemas de almacenamiento de Gravitricity se caracterizan por su rápida respuesta (inferior a 1 segundo), una eficiencia del 80-90 %, capacidad de despacho de energía de entre 15 minutos y 8 horas, y una vida útil superior a 50 años [4].

### 2.2.2. Energy Vault



Figura 2.4: Primer prototipo torre Energy Vault [5].

Energy Vault es una empresa Suiza fundada en 2017 por Robert Piconi, Bill Gross y Andrea Pedretti, reconocida por desarrollar métodos innovadores de almacenamiento de energía basados en la gravedad. En 2020, la empresa construyó su primer prototipo de almacenamiento gravitacional (Figura 2.4), el cual consistía en una grúa de 70 metros de altura equipada con varios brazos mecánicos capaces de elevar bloques de 35 toneladas fabricados con hormigón y materiales reciclados. La generación de electricidad se produce cuando los bloques se dejan descender, transformando la energía potencial almacenada en energía eléctrica. Este proyecto inicial tuvo un costo estimado de 7-8 millones de dólares, con una capacidad de almacenamiento de 35 MWh y una potencia pico de 4 MW.

Si Energy Vault descargara su energía a potencia máxima (4 MW), entonces la duración teórica de la descarga sería:

$$\text{Tiempo de descarga} = \frac{\text{Energía almacenada (MWh)}}{\text{Potencia (MW)}} \quad (2.2)$$

Sustituyendo los valores:

$$\text{Tiempo de descarga} = \frac{35 \text{ MWh}}{4 \text{ MW}} = 8,75 \text{ horas} \quad (2.3)$$

Esto significa que el sistema podría entregar 4 MW durante aproximadamente 8.75 horas antes de agotarse. Actualmente, Energy Vault terminó en uno de sus proyectos más grandes el cual es el proyecto EVx™ de Energy Vault en Rudong, China (Figura 2.5). Este sistema mantiene el mismo principio de elevar bloques y dejarlos descender para almacenar y liberar energía, pero con la diferencia de que los bloques están desplegados dentro de un edificio en lugar de una grúa y mediante IA (Inteligencia artificial), optimiza los despachos de los bloques. Para su funcionamiento, el sistema utiliza carriles internos dentro de la torre para mover los bloques y permitir su descenso controlado. El proyecto inició su construcción en 2022 y finalizó a principios de 2024, logrando una capacidad de 25 MW de potencia y 100 MWh de almacenamiento. Este desarrollo está alineado con los objetivos de China de alcanzar la neutralidad de carbono, además de proporcionar respaldo energético a un parque eólico adyacente al sistema en Rudong.



Figura 2.5: Etapa de construcción del proyecto EVx™ de Energy Vault en Rudong, China [5].

### 2.2.3. ARES (Advanced Rail Energy Storage)



Figura 2.6: Prototipo Tren eléctrico de ARES [6].

ARES es una empresa fundada en 2010, enfocada en el almacenamiento de energía gravitacional mediante el uso de vagones y rieles. Su proyecto piloto se llevó a cabo en Tehachapi, California, con el objetivo de demostrar la viabilidad de esta tecnología.

El funcionamiento se basa en vagones de alta capacidad de carga montados sobre plataformas de trenes eléctricos (Figura 2.6), que se desplazan sobre rieles desde un punto A, ubicado en altura, hasta un punto B, en una posición más baja. Durante la fase de carga (subida), los trenes eléctricos consumen energía de la red para ascender, almacenándola en forma de energía potencial gravitatoria. En la fase de descarga (bajada), los trenes descienden y sus motores regenerativos actúan como generadores, convirtiendo la energía potencial en electricidad e inyectándola nuevamente en la red.

El sistema cuenta con un control inteligente de velocidad, que optimiza la eficiencia del proceso y permite una conversión de energía bidireccional. Entre sus ventajas destaca su alta escalabilidad, ya que la capacidad del sistema puede incrementarse añadiendo más vagones por pista o aumentando el número de pistas y trenes.

En 2016, ARES obtuvo una concesión para un proyecto de almacenamiento de 50 MW, cuya construcción comenzó en 2020 bajo el nombre GravityLine™, en Pahrump, Nevada. Este proyecto está diseñado con un enfoque en el control de frecuencia, regulando el flujo de energía para estabilizar la red eléctrica.

### 2.3. Mercado Eléctrico Chileno

El mercado eléctrico chileno está diseñado de tal forma que la inversión y operación de la infraestructura sean privadas, con el objetivo de generar un mercado competitivo. Sin embargo, este mercado opera bajo una lógica mayorista, pero con una regulación estatal que supervisa su funcionamiento. Dentro de esta estructura, se diferencian tres segmentos principales: generación, transmisión y distribución, cada uno con regulaciones específicas.

El modelo de mercado se basa en un equilibrio marginalista, lo que significa que la electricidad se genera al menor costo posible, siguiendo un orden de despacho basado en costos marginales. En este sistema, el precio de la electricidad se establece en el mercado spot, determinado por el costo marginal (C<sub>mg</sub>) de la última unidad generada y despachada. Los generadores ofrecen su energía a costo marginal, pero el Coordinador Eléctrico Nacional (CEN) es el encargado de asegurar el despacho eficiente y económico de la electricidad, garantizando la seguridad y continuidad del suministro.

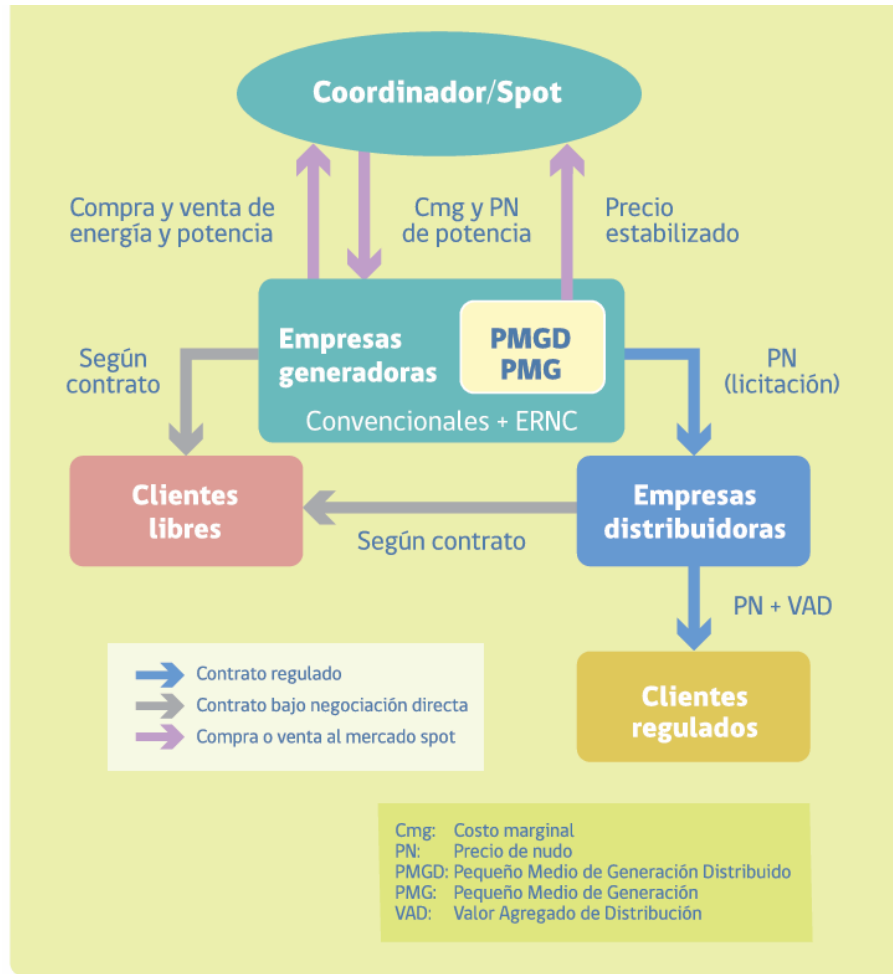


Figura 2.7: Concepto de remuneración en el mercado eléctrico [7].

El modelo de mercado eléctrico se divide en dos principales segmentos de comercialización (véase la Figura 2.7): el mercado spot, donde los generadores venden la energía a precio del sistema, basado en el costo marginal del despacho en tiempo real, y el mercado de contratos, en el cual los generadores pueden negociar acuerdos bilaterales con clientes libres o distribuidores, estableciendo precios y condiciones de suministro. Los valores a pagar por la electricidad se determinan bajo un sistema de precios regulados, compuesto por los precios de nudo (PN) y el valor agregado de distribución (VAD). Los precios de nudo corresponden a los valores que las empresas distribuidoras pagan a los generadores y se calculan cada 6 meses por la Comisión Nacional de Energía (CNE), reflejando los costos de generación y transmisión en distintos puntos del sistema. Por otro lado, el VAD es un costo adicional aplicado sobre la tarifa final de distribución, el cual cubre los costos de la infraestructura de distribución, operación y mantenimiento de la red eléctrica, siendo revisado y aprobado cada 4 años por la CNE. Este modelo busca garantizar un mercado eficiente y competitivo, asegurando que los costos sean transparentes y equitativos tanto para empresas como para consumidores.

## 2.4. Marco Regulatorio

En la actualidad, el Estado de Chile introduce constantes cambios y modificaciones en los reglamentos y leyes para permitir la correcta inserción de nuevos métodos de generación y almacenamiento de energía, garantizando su reconocimiento legal. Por ello, es fundamental comprender ciertos conceptos y regulaciones básicas que deben considerarse para aplicar de manera adecuada la coordinación y operación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) junto con los sistemas de almacenamiento de energía. Esto en perspectiva de la potencial inserción de sistemas de almacenamiento GESS.

### 2.4.1. Ley N° 20.936

En el año 2016, se promulgó la Ley N°20.936 con el objetivo de reformar el sistema de transmisión y crear el Coordinador Eléctrico Nacional, estableciendo medidas necesarias para velar por la seguridad del Sistema Eléctrico Nacional y garantizando el acceso abierto y seguro. A continuación, se detallan algunos de sus artículos más relevantes [28]. La Ley N°20.936 establece un marco regulatorio claro para el SEN, definiendo las responsabilidades del Coordinador Eléctrico Nacional y estableciendo lineamientos para la operación de sistemas de generación, transmisión, almacenamiento y servicios complementarios.

En particular, los artículos 72°-2, 72°-7 y 72°-17 pueden influir en la viabilidad económica y operativa de un sistema de almacenamiento gravitacional (tales como podría ser los GESS), ya que determinan su remuneración y los requisitos para su interconexión al sistema. Estos artículos resaltan la importancia de garantizar la seguridad del sistema, la operación económica eficiente y la integración de tecnologías como los sistemas de almacenamiento de energía.

#### 2.4.1.a. Artículo 72°-1: Principios de la Coordinación de la Operación

La operación de las instalaciones eléctricas que operen interconectadas entre sí deberá coordinarse con el fin de:

1. Preservar la seguridad del servicio en el sistema eléctrico.
2. Garantizar la operación más económica para el conjunto de las instalaciones del sistema eléctrico.
3. Garantizar el acceso abierto a todos los sistemas de transmisión, en conformidad con esta ley.

Esta coordinación deberá efectuarse a través del Coordinador, de acuerdo con las normas técnicas que determine la Comisión, la presente ley y la reglamentación pertinente.

#### 2.4.1.b. Artículo 72°-2: Obligación de Sujetarse a la Coordinación del Coordinador

Todo propietario, arrendatario, usufructuario o quien opere, a cualquier título, centrales generadoras, sistemas de transporte, instalaciones para la prestación de servicios complementarios, sistemas de almacenamiento de energía, instalaciones de distribución e

instalaciones de clientes libres y que se interconecten al sistema, en adelante “los coordinados”, estará obligado a sujetarse a la coordinación del sistema que efectúe el Coordinador de acuerdo con la normativa vigente.

La omisión del deber de información, ya sea por requerimiento o de forma voluntaria, así como la entrega de información falsa, incompleta o errónea, o el incumplimiento de este artículo, serán sancionadas por la Superintendencia.

#### **2.4.1.c. Artículo 72°-3: Coordinación del Mercado Eléctrico**

El Coordinador será responsable de la coordinación y determinación de las transferencias económicas entre empresas sujetas a su coordinación. Para ello, deberá calcular:

- Los costos marginales instantáneos del sistema. Estos representan el costo de generar una unidad adicional de energía eléctrica en un momento específico. Este concepto es fundamental para determinar el precio de la energía en el mercado spot, ya que refleja las condiciones de oferta y demanda en tiempo real.
- Las transferencias resultantes de los balances económicos de energía, potencia, servicios complementarios y uso de los sistemas de transmisión.
- Todos aquellos pagos y obligaciones establecidos en la normativa vigente respecto del mercado eléctrico.

#### **2.4.1.d. Artículo 72°-7: Servicios Complementarios**

Los coordinados deberán poner a disposición del Coordinador los recursos técnicos y/o infraestructura que dispongan para la prestación de servicios complementarios, con el fin de realizar la coordinación de la operación establecida en el artículo 72°-1.

Las inversiones asociadas a nueva infraestructura, junto con sus costos anuales de mantenimiento eficiente, que sean contemplados en el informe de servicios complementarios, serán remuneradas durante un período equivalente a su vida útil identificada en dicho informe y considerando la tasa de descuento señalada en el artículo 118°.

Estas remuneraciones serán financiadas por los usuarios finales a través de un cargo de servicios complementarios, el cual será incorporado en el cargo único definido en el artículo 115°.

#### **2.4.1.e. Artículo 72°-17: Construcción, Interconexión y Puesta en Servicio**

Los propietarios u operadores de nuevas instalaciones de generación y transmisión que se interconecten al sistema eléctrico deberán presentar una solicitud a la Comisión para que estas sean declaradas en construcción.

La Comisión podrá otorgar esta declaración sólo a aquellas instalaciones que cuenten, al menos, con los siguientes requisitos:

- Permisos sectoriales.
- Órdenes de compra.

- Cronograma de obras.
- Demás requisitos establecidos en el reglamento, que permitan acreditar la factibilidad de la construcción de dichas instalaciones.

### 2.4.2. Decreto Supremo N° 125

El Decreto Supremo N° 125/2017, acordado en 2017, estableció por primera vez un marco regulatorio claro respecto a la operación de los sistemas de almacenamiento de energía en el SEN. Dentro de sus pilares clave se encuentran los modos de operación, el concepto de arbitraje de precios para almacenamiento y la definición de un marco tarifario específico. A continuación se presentan algunos artículos relevantes [29](#).

#### 2.4.2.a. Artículo 90

Los Sistemas de Almacenamiento de Energía interconectados al sistema eléctrico podrán destinarse a la prestación de Servicios Complementarios, incorporarse como infraestructura asociada a los sistemas de transmisión o utilizarse para el arbitraje de precios de energía.

A efectos de ser considerados Sistemas de Almacenamiento de Energía, estos no deberán contar con energías afluentes superiores al nivel de pérdidas del proceso de almacenamiento. No se deberá considerar como energía afluente a los retiros efectuados para el proceso de almacenamiento.

#### 2.4.2.b. Artículo 92

En los Sistemas de Almacenamiento de Energía y en las Centrales con Almacenamiento por Bombeo, se distinguirán dos modos de operación:

- **Modo Retiro:** Transformación de la energía eléctrica retirada desde el sistema eléctrico en otro tipo de energía para su almacenamiento.
- **Modo Inyección:** Conversión de la energía previamente almacenada, proveniente de retiros de energía para almacenamiento, en energía eléctrica para su inyección al sistema eléctrico.

Ambos modos deberán efectuarse a través del mismo punto de conexión al sistema eléctrico, de forma tal que no puedan ocurrir simultáneamente.

#### 2.4.2.c. Artículo 93

Los retiros de energía desde el sistema eléctrico efectuados para el proceso de almacenamiento estarán destinados exclusivamente a la operación en Modo Retiro y no podrán ser comercializados con Empresas Distribuidoras o Clientes Libres.

#### 2.4.2.d. Artículo 94

Las inyecciones y retiros de energía realizados para el proceso de almacenamiento y destinados al arbitraje de precios de energía deberán ser asignados al Coordinado del respectivo Sistema de Almacenamiento de Energía o Centrales con Almacenamiento por Bombeo, al costo marginal de las respectivas barras de inyección y retiro, para los efectos del mercado de corto plazo.

#### 2.4.2.e. Artículo 97

Los retiros de energía para el proceso de almacenamiento no estarán sujetos a los cargos asociados a clientes finales. Para tal efecto, los señalados retiros no se considerarán para:

1. La acreditación del cumplimiento de la obligación a que se refiere el artículo 150<sup>o</sup> bis de la Ley.
2. El pago correspondiente a clientes finales por uso de los sistemas de transmisión.
3. La asignación que se origine a partir del mecanismo de estabilización de precios a que puedan optar los Pequeños Medios de Generación y Pequeños Medios de Generación Distribuida, establecidos en la Ley.
4. El cálculo de las prorratas de la asignación de los certificados emitidos producto de la inyección de energía licitada y efectivamente inyectada a que se refiere el inciso tercero del artículo 150<sup>o</sup> ter de la Ley.
5. El pago asociado a clientes finales por concepto de Servicios Complementarios, de acuerdo con la normativa vigente.

#### 2.4.3. Ley N° 21.505

La Ley N° 21.505, promulgada en 2022 [30], tiene como objetivo principal promover el almacenamiento de energía eléctrica y la electromovilidad en Chile. Si bien ya existían algunos decretos y normativas que mencionaban los sistemas de almacenamiento, no había una legislación integral que definiera roles en el mercado eléctrico ni que los reconociera como actores activos en la operación y regulación del sistema.

Uno de los aspectos más relevantes de esta ley es que incorpora el almacenamiento de energía como un elemento clave para equilibrar la oferta y la demanda, en un contexto donde las energías renovables no convencionales (ERNC), como la solar y la eólica que han ganado una participación significativa en la matriz energética del país. A pesar de sus ventajas, estas fuentes son intermitentes, ya que dependen de factores naturales como la radiación solar y la velocidad del viento, lo que introduce variabilidad en la generación eléctrica.

La Ley N° 21.505 busca fomentar el uso de sistemas de almacenamiento como una solución a este desafío, permitiendo almacenar energía en momentos de alta generación y liberarla cuando la demanda lo requiera. De esta forma, el almacenamiento contribuye a la estabilidad del sistema eléctrico, facilitando una integración más eficiente de las ERNC y reduciendo la dependencia de fuentes fósiles en momentos de menor generación renovable.

Además, la ley reconoce que los sistemas de almacenamiento no solo permiten gestionar la intermitencia de las energías renovables, sino que también pueden prestar servicios complementarios para la estabilidad del sistema, como la regulación de frecuencia, el control de tensión y la provisión de reservas operativas. Esto mejora la eficiencia y seguridad del sistema eléctrico, especialmente en un escenario donde la red se vuelve cada vez más compleja.

A continuación se nombrarán algunos puntos clave de la Ley N° 21.505, los cuales destacan los siguientes:

#### **2.4.3.a. Artículo 72°-2**

Agrega a los sistemas de almacenamiento a la lista de instalaciones que deben coordinarse con el Coordinador Eléctrico Nacional, asegurando su integración dentro del Sistema Eléctrico Nacional.

#### **2.4.3.b. Artículo 149°**

Permite que los sistemas de almacenamiento participen en el despacho de energía en igualdad de condiciones con las centrales generadoras, lo que les da un rol más activo en el mercado eléctrico.

#### **2.4.3.c. Artículo 149° bis**

Obliga a que los sistemas de almacenamiento sean considerados en la planificación energética nacional, lo que garantiza su incorporación en el desarrollo de la infraestructura eléctrica del país. En conclusión, la Ley N° 21.505 marca un punto de inflexión en la regulación del almacenamiento en Chile, permitiendo que estos sistemas sean parte de la planificación y operación del mercado eléctrico, lo que favorece su desarrollo, financiamiento y participación en el SEN.

#### **2.4.4. Modificaciones en el reglamento de transferencias de potencia**

Reglamento de Transferencias de Potencia, sometido a consulta ciudadana en 2023 [\[8\]](#), surgió de la necesidad de actualizar la normativa relacionada con la integración de los sistemas de almacenamiento de energía. Su objetivo principal es regular y clarificar el mercado de almacenamiento en relación con las transferencias de potencia, incentivando la inversión en este tipo de tecnologías y estableciendo mecanismos de remuneración más transparentes.

Dentro de los aspectos más relevantes, el reglamento aborda el reconocimiento de la potencia almacenada, tanto desde un punto de vista técnico como económico, asegurando una correcta integración de los sistemas de almacenamiento en el Sistema Eléctrico Nacional. A continuación, se destacan algunos puntos clave del documento.

#### 2.4.4.a. Reconocimiento de Sistemas de Almacenamiento de Energía y su componente en régimen transitorio

Se modifica, en el artículo primero transitorio, la tabla de porcentaje de reconocimiento de Potencia Inicial de un Sistema de Almacenamiento de Energía o de la componente de almacenamiento de una Central Renovable con Capacidad de Almacenamiento con el propósito de establecer incentivos para el desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional que se encuentren alineados con los requerimientos técnicos del mismo. Cabe señalar que, los ajustes a esta tabla son obtenidos a partir de la implementación de la metodología de Potencia Inicial de Sistemas de Almacenamiento de Energía establecida en el artículo 37 de la propuesta de modificación reglamentaria.

Capacidad de almacenamiento (horas)	Porcentaje de reconocimiento
<1	0
1	36%
2	65%
3	85%
4	98%
≥5	100%

Figura 2.8: Reconocimiento de Potencia Inicial de un Sistema de Almacenamiento de Energía [8](#).

#### 2.4.4.b. Reconocimiento de Sistemas de Almacenamiento de Energía y su componente en régimen permanente

Se explicita que los retiros realizados por Sistemas de Almacenamiento de Energía para su carga, ya sea en condiciones normales de operación o cuando sean instruidos por el Coordinador Eléctrico Nacional para preservar la seguridad del servicio en el Sistema Eléctrico Nacional, no serán considerados como Retiros de Potencia para efectos del Balance de Transferencias de Potencia.

Este punto es clave para los operadores de almacenamiento, ya que evita penalizaciones económicas innecesarias por los retiros de energía destinados a la carga de los sistemas. De esta manera, se asegura una mayor estabilidad económica para los proyectos de almacenamiento y una mejor integración dentro del mercado eléctrico.

#### 2.4.4.c. Modificaciones a la operación de Sistemas de Almacenamiento de Energía y Centrales Renovables con Capacidad de Almacenamiento

Se ajustan normas relativas a Centrales Renovables con Capacidad de Almacenamiento, con el objetivo de habilitar a la componente de almacenamiento para efectuar retiros de energía del sistema.

Esta modificación permite que las centrales con almacenamiento operen de manera más flexible, optimizando el uso de su capacidad de almacenamiento y facilitando su integración con la red eléctrica. Esto representa un avance e incentivo para agregar puntos de almacenamiento junto a energías renovables.

# Capítulo 3

## Mina Los Colorados

Como caso de estudio se utilizará La Mina Los Colorados (Figura 3.1), una de las operaciones más relevantes de la Compañía Minera del Pacífico (CMP). Esta mina, ubicada en la Región de Atacama, aproximadamente 30 km al noroeste de Vallenar, es una mina a cielo abierto que se dedica principalmente a la extracción de mineral de hierro. Con una capacidad de producción de aproximadamente 9,15 millones de toneladas anuales de preconcentrado, el mineral extraído se transporta a la Planta de Pellets de Huasco para su procesamiento.



Figura 3.1: Vista aérea Mina Los Colorados [9].

Actualmente, CMP está invirtiendo alrededor de US\$343 millones en un proyecto de ampliación y mejoras operacionales, con el objetivo de extender la vida útil de la mina hasta el año 2033 [9]. Esta inversión considera la reconfiguración de instalaciones y la continuidad operacional, sentando las bases para una futura reutilización del sitio. En este contexto, se selecciona a la Mina Los Colorados como caso base para evaluar un escenario hipotético de implementación de un sistema GESS, aprovechando el atractivo económico de prolongar la utilidad de la infraestructura una vez finalizadas las operaciones

extractivas.

La elección se fundamenta en el interés por explorar alternativas que permitan dar una segunda vida útil a la mina, mediante la reutilización de terrenos, instalaciones y equipos, ya sean actualmente operativos o en desuso. Esta propuesta permitiría no solo contribuir con una nueva fuente de energía a la operación minera, sino también introducir un nuevo eje productivo asociado al almacenamiento de energía, posicionando a la mina como un polo tecnológico dentro del proceso de transición energética nacional.



Figura 3.2: Vista aérea Mina Los Colorados [9].

La zona propuesta para la intervención corresponde al sector alto de la mina, como se muestra en la Figura 3.2, en las cercanías del tajo abierto. En esta área se propone la habilitación de un segmento que podría permitir la instalación de rieles inclinados, los cuales actuarían como guía para los bloques durante su movimiento ascendente o descendente, en el contexto del funcionamiento del sistema GESS, ya sea en modo de carga o generación. En particular, la zona A se considera como el punto más bajo del proyecto, mientras que las zonas B y C representan opciones viables para ubicar espacialmente los bloques y los equipos pertinentes (zona alta). El análisis técnico de la propuesta se centrará en el diseño e implementación de un sistema GESS en dicha ubicación, considerando los siguientes aspectos fundamentales:

- **Capacidad de almacenamiento:** Se evaluará cuánta energía puede almacenarse y durante cuánto tiempo.
- **Integración con la infraestructura y equipos existentes:** Se asumirá inicialmente que la infraestructura eléctrica existente será provista por la propia faena minera. Esto incluye la conexión a la red interna de la mina, una subestación de pequeña escala ya instalada, así como el uso del terreno disponible dentro del mismo recinto minero.

- **Requerimientos técnicos:** Se identificarán los equipos mínimos necesarios, como motores, equipos de respaldo, y otros componentes esenciales en una planilla de costos.
- **Espacio y ubicación:** Se asumirá la disponibilidad de espacio para implementar tanto el sistema de almacenamiento gravitacional como líneas de carga-descarga.

### 3.1. Capacidad de almacenamiento

En esta primera etapa del análisis del proyecto, se propone implementar un sistema GESS cuyo diseño estará alineado con la demanda energética de la Mina Los Colorados, ubicada en la Región de Atacama. Esta mina se conecta al SEN principalmente a través de la subestación “Los Colorados”.

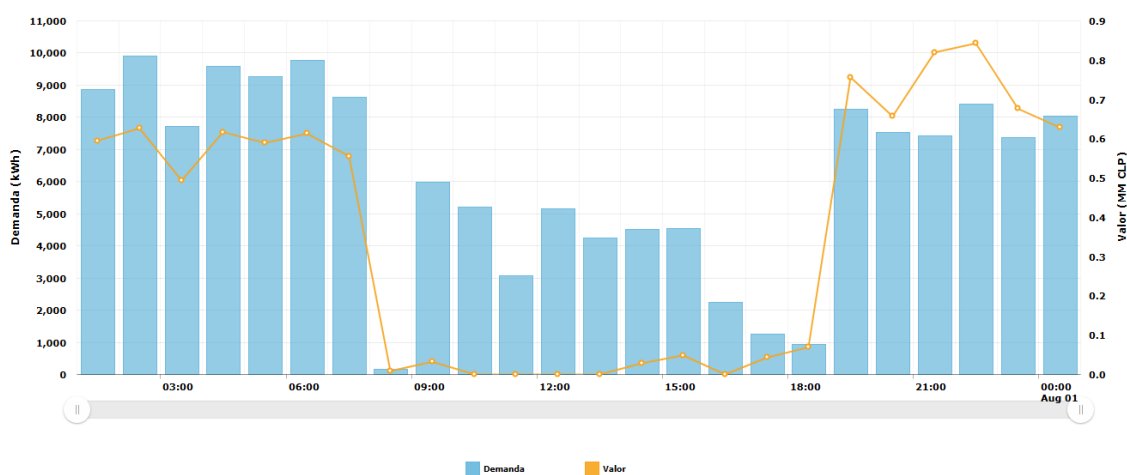


Figura 3.3: Retiros físicos y valorizados de la barra S/E Los Colorados de un día al azar 10.

El sistema de almacenamiento se ajustará específicamente a los retiros físicos y valorizados de la barra correspondiente a la subestación Los Colorados, tal como se aprecia en la Figura 3.3. Dado que esta barra es una de las más cercanas a la mina, se considera que los retiros y demandas solicitados están alineados con los datos presentados en dicha figura.

Al analizar la figura mencionada, se pueden observar claramente los peaks en las valorizaciones y demanda energética. Particularmente, estos peaks son críticos debido a la pronunciada pendiente que presentan alrededor de las 8:00 hrs y las 18:00 hrs. En consecuencia, uno de los principales objetivos del proyecto es obtener beneficios tanto económicos como operacionales, otorgando mayor independencia para operar la planta minera con flexibilidad. Esto puede lograrse mediante la implementación del sistema GESS, aplicando arbitraje energético conforme a las normativas chilenas vigentes, tales como el Decreto Supremo N°125/2021 del Ministerio de Energía y la Resolución Exenta N°71/2018 de la CNE, que establecen criterios para la remuneración de servicios de almacenamiento y servicios complementarios.

Se plantea entonces un esquema operativo de despacho energético de 5 horas, lo que permitiría alcanzar un reconocimiento del 100 % de la capacidad instalada de almacena-

miento, según lo indicado en el inciso 2.4.4.a del documento técnico de la CNE, el cual establece este beneficio para sistemas cuya duración exceda a partir de las 5 horas.

En cuanto a la potencia del sistema, se considera un valor de 10 MW, determinado en base a la evidencia de los retiros físicos y valorizados observados en la Figura 3.3 para la barra S/E Los Colorados, donde se evidencia que la demanda máxima diaria se encuentra en torno a dicho valor. Esta elección permite que el sistema de almacenamiento opere dentro de los márgenes reales de consumo del nodo, facilitando su integración operativa sin sobrepasar la capacidad local de demanda, esto implica una capacidad energética neta total aproximada de 50 MWh. De este modo, se asegura que el dimensionamiento del sistema GESS sea coherente tanto con los criterios normativos vigentes como con las condiciones reales de operación de la red en el nodo analizado.

# Capítulo 4

## Análisis técnico

Para el análisis técnico, se consideran dos posibles modelos, representados en la Figura [2.2](#). En particular, se abordarán distintos escenarios dentro del modelo de tracción, culminando en el caso de inclinación de  $90^\circ$  sin fricción, que representa el comportamiento idealizado de un sistema GESS de suspensión. En esta sección, se analizarán las ecuaciones generales que rigen dichos modelos con el objetivo de evaluar sus ventajas y consideraciones para la implementación de cada tecnología.

Para la conceptualización de los modelos, se asumirá que este consiste en un sistema basado en cuerdas mecánicas, las cuales cumplen la función de arrastrar un bloque a través de rieles o elevarlo verticalmente mediante un motor-generador eléctrico ubicado en la parte superior. Durante los períodos de carga, el sistema opera en modo motor, elevando el bloque y almacenando energía potencial. En los períodos de descarga, el sistema funciona como generador, permitiendo que el bloque descienda y transfiera energía al sistema (en particular los aspectos de calculo se pueden visualizar en [A.0.2](#)).

A continuación, se presentan las ecuaciones y factores clave para el desarrollo del sistema GESS.

### 4.1. Ecuaciones

Para analizar el comportamiento del sistema GESS, es fundamental examinar las ecuaciones y supuestos que se utilizarán en el análisis del sistema. Por ello, se identificará de forma simplificada el sistema de fuerzas que actúan sobre el bloque, y se determinará la fuerza necesaria que el motor debe ejercer para realizar el trabajo requerido.

Se considerará un análisis basado en el movimiento de un carro (masa) cuya función es almacenar energía potencial. En este análisis, se tendrán en cuenta las siguientes fuerzas:

- La fuerza necesaria para subir el bloque.
- El componente del peso de la pendiente, generado por la propia masa del bloque.
- La fuerza de roce asociada al contacto entre las ruedas del carro y los rieles del sistema a lo largo del trayecto de carga y descarga de energía.

Cabe destacar que, en caso de analizar el comportamiento de un sistema GESS en

suspensión, basta con considerar un ángulo de inclinación de  $90^\circ$  y/o un coeficiente de fricción nulo, lo que representaría una caída libre sin fricción durante el despacho de energía.

#### 4.1.1. Fuerzas de roce

Como se mencionó anteriormente, el roce entre las ruedas y los rieles representa un esfuerzo adicional que el motor debe superar para desplazar el bloque. Por esta razón, se busca minimizar la adherencia rueda-rieles con el fin de reducir las fuerzas necesarias para el desplazamiento.

Según la literatura, tanto las condiciones climáticas como la velocidad influyen en el coeficiente de fricción entre las ruedas y los rieles. En este análisis, se asumirá una velocidad aproximada de 10 m/s, lo que permitirá un descenso controlado.

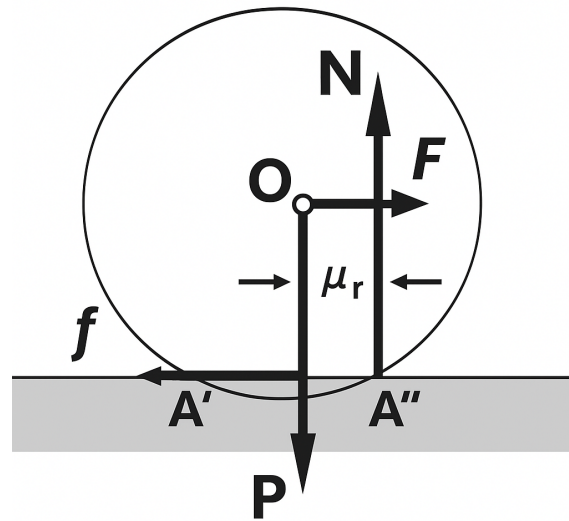


Figura 4.1: Rodadura de un cilindro deformable sobre un pavimento indeformable [11].

El movimiento de la rueda genera una oposición debido al roce, ya que un objeto en rotación que está en contacto y en movimiento con un riel experimenta una fuerza de resistencia. Es por ello que se introduce el concepto de coeficiente de rodadura ( $C_{rr}$ ), el cual se puede visualizar en la Figura 4.1. Este comportamiento depende tanto del coeficiente de roce  $\mu_r$ , como del radio ( $R$ ) de la rueda.

$$C_{rr} = \frac{\mu_r}{R} \quad (4.1)$$

Se establece que los valores típicos del coeficiente de rodadura  $C_{rr}$  para el contacto entre una rueda de acero de vagón y un riel de acero se encuentran generalmente en el rango de 0,001 a 0,005 [11], dependiendo del estado de la vía, el tipo de vehículo y las condiciones de operación. Para este estudio, se adopta un valor promedio representativo de  $C_{rr} = 0,003$ , adecuado para condiciones operativas de carga en rieles en buen estado.

Ahora, lo que se busca comprender es la magnitud de la fuerza necesaria para iniciar

el movimiento del bloque en contacto con la superficie. Para ello, es fundamental considerar que, en la práctica, los cuerpos son deformables, por lo que el contacto no ocurre en una línea ideal, sino a lo largo de una estrecha banda de apoyo entre los puntos  $A'$  y  $A''$ . Esta zona de contacto, conocida como generatriz, genera un conjunto de reacciones que dan lugar a un par resistivo que se opone al movimiento de rodadura. Con esto se puede simplificar el análisis, suponiendo que el cilindro debe rotar sobre la generatriz ubicada en  $A''$  para superar el pequeño obstáculo que impone la resistencia. Este efecto se modela mediante el desplazamiento de la línea de acción de la reacción normal  $N$  una distancia  $\mu_r$ , lo cual da origen al momento resistivo:

$$M_{\text{res}} = \mu_r N \quad (4.2)$$

Frente a este momento resistivo, debe aplicarse un momento de arranque:

$$M_{\text{arranque}} = RF \quad (4.3)$$

donde  $F$  es la fuerza aplicada tangencialmente. El movimiento se inicia cuando el momento de arranque supera al momento resistivo, es decir:

$$M_{\text{arranque}} \geq M_{\text{res}} \quad \Rightarrow \quad RF \geq \mu_r N \quad (4.4)$$

Donde,

- $M_{\text{arranque}}$ : Momento de arranque.
- $M_{\text{res}}$ : Momento resistivo.
- $R$ : Radio de la rueda.
- $F$ : Fuerza de tracción o fuerza aplicada para mover el sistema.
- $\mu_r$ : Coeficiente de fricción por rodadura.
- $N$ : Fuerza normal.

De aquí se deduce que la fuerza mínima necesaria para iniciar la rodadura está dada por:

$$F \geq \frac{\mu_r N}{R} = C_{rr} N \quad (4.5)$$

Esta expresión representa el valor crítico de la fuerza para superar la resistencia a la rodadura y permitir el inicio del desplazamiento del sistema.

Finalmente, en un plano inclinado, la fuerza de roce se ve influenciada por el ángulo de inclinación  $\theta$  del plano. Su expresión en el eje horizontal  $x$  se define como:

$$F_r = C_{rr} N \cos \theta \quad (4.6)$$

### 4.1.2. Supuestos del sistema

Dentro de los supuestos a considerar para ambos estados (carga y descarga) se establecen tres condiciones fundamentales:

- **Velocidad constante:** Se considerará que el bloque se mueve con velocidad constante en ambos estados, tanto en la subida como en la bajada por la pendiente.
- **Aceleración nula:** Dado que se asume una velocidad constante durante la subida del bloque, la aceleración será considerada nula. En consecuencia, el análisis del movimiento se realizará bajo esta condición.
- **Suma de fuerzas nula:** Como la suma de fuerzas es igual a la masa por la aceleración, y se ha establecido que la aceleración es nula, se considerará que la suma de fuerzas también es nula en el sistema.

A partir de estos supuestos, se desarrollan las ecuaciones para los procesos de carga y descarga del sistema.

## 4.2. Sistema de carga

Para desarrollar el modelo, se toma como referencia el esquema de la Figura [4.2](#):

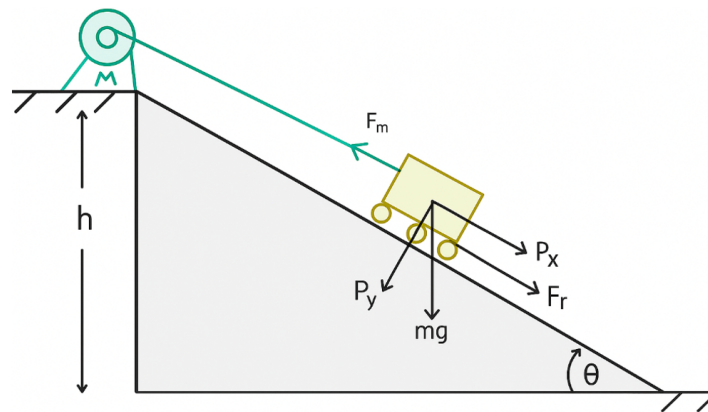


Figura 4.2: Sistema simplificado de carga (elaboración propia).

Donde,

- $M$ : Motor encargado de generar la fuerza necesaria para mover el bloque por el plano inclinado.
- $h$ : Altura vertical del plano inclinado.
- $\theta$ : Ángulo de inclinación del plano respecto a la horizontal.
- $F_m$ : Fuerza ejercida por el motor para desplazar el bloque a lo largo del plano.
- $mg$ : Peso del bloque, producto de la masa  $m$  por la aceleración gravitacional  $g$ .

- $P_x$ : Componente del peso en la dirección paralela al plano.
- $P_y$ : Componente del peso en la dirección perpendicular al plano.
- $F_r$ : Fuerza de resistencia a la rodadura que se opone al movimiento del bloque.

Dado que los supuestos han sido definidos en las secciones anteriores, se procede a expresar las fuerzas involucradas, expresadas en newton (N). A partir de estas, se determina la potencia requerida por el motor, expresada en watt (W), así como la energía que el sistema estaría almacenando o liberando, la cual se expresará en joule (J). Para ello, se plantean las siguientes ecuaciones:

$$\sum F = F_{mc} - F_x - F_r = 0 \quad (4.7)$$

Donde  $F_{mc}$  corresponde a la fuerza requerida por el motor en modo de carga,  $F_x$  es la fuerza generada por el peso del bloque y  $F_r$  representa la fuerza de rodadura. A partir de estas definiciones, se despeja la fuerza del motor considerando las expresiones anteriores:

$$F_{mc} = F_x + F_r \quad (4.8)$$

$$F_{mc} = mg \sin \theta + mg C_{rr} \cos \theta \quad (4.9)$$

Factorizando por  $mg$ :

$$F_{mc} = mg(\sin \theta + C_{rr} \cos \theta) \quad (4.10)$$

Definida la fuerza necesaria para levantar la carga, se puede calcular su potencia como:

$$P_{mc} = mg(\sin \theta + C_{rr} \cos \theta) \cdot v \quad (4.11)$$

donde  $v$  es la velocidad de ascenso del bloque. Finalmente, para analizar la energía de carga del sistema, basta con multiplicar dicha potencia por el tiempo  $t$  asociado al ascenso:

$$E_{mc} = mg(\sin \theta + C_{rr} \cos \theta) \cdot v \cdot t \quad (4.12)$$

### 4.3. Sistema de descarga

De manera similar al sistema de carga, el modelo del sistema de descarga se desarrolla tomando como referencia el esquema de la Figura [4.3](#)

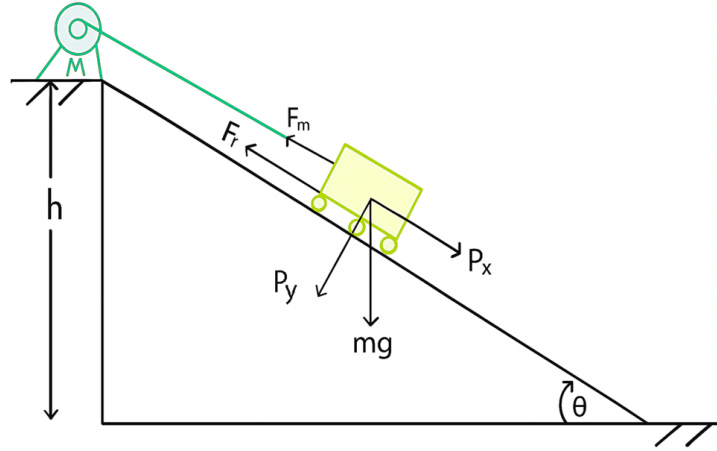


Figura 4.3: Sistema simplificado de descarga (elaboración propia).

Dado que los supuestos han sido definidos en las secciones anteriores, se procede a calcular las fuerzas en el plano inclinado en relación con la potencia necesaria del motor, con la diferencia del sentido de coeficiente de fricción del caso de carga. Para ello, se plantean las siguientes ecuaciones:

$$\sum F = F_{md} + F_r - F_x = 0 \quad (4.13)$$

Donde  $F_{md}$  corresponde a la fuerza requerida por el motor en modo de descarga. Se procede a despejar la fuerza del motor junto con sus expresiones anteriores:

$$F_{md} = F_x - F_r \quad (4.14)$$

$$F_{md} = mg \sin \theta - mg C_{rr} \cos \theta \quad (4.15)$$

Factorizando por  $mg$ :

$$F_{md} = mg(\sin \theta - C_{rr} \cos \theta) \quad (4.16)$$

Definida la fuerza necesaria para el movimiento del sistema en descarga, se puede calcular su potencia como:

$$P_{md} = mg(\sin \theta - C_{rr} \cos \theta) \cdot v \quad (4.17)$$

donde  $v$  es la velocidad de descenso del bloque. Finalmente, para analizar la energía de descarga del sistema, basta con multiplicar dicha potencia por el tiempo  $t$  asociado al descenso:

$$E_{md} = mg(\sin \theta - C_{rr} \cos \theta) \cdot v \cdot t \quad (4.18)$$

## 4.4. Observaciones de los sistemas

Al analizar tanto el sistema de carga como el de descarga, se puede evidenciar, a partir de las ecuaciones descritas previamente, que el desempeño del sistema depende de múltiples factores. En particular, este estudio se centra en tres de ellos: la pendiente del plano inclinado ( $\theta$ ), la velocidad de carga o descarga del bloque ( $v$ ) y la resistencia a la rodadura ( $C_{rr}$ ). Si bien pueden existir otras variables que pueden influir en el comportamiento del sistema, estas tres fueron seleccionadas por su impacto directo en la eficiencia energética, magnitud de fuerza y potencia requeridas. A continuación, se mantendrán las condiciones del estado inicial (Tabla 4.1), pero con la excepción de ir variando uno de dichos parámetros, con el objetivo de visualizar de mejor forma los cambios y mejoras que se podrían obtener al modificar cada una de estas variables.

Tabla 4.1: Parámetros del Sistema GESS

Parámetro	Valor
Masa x bloque ( $m$ )	$100 \times 10^3$ kg (100 toneladas)
Altura ( $h$ )	600 m
Ángulo de inclinación ( $\theta$ )	$30^\circ$
Aceleración gravitacional ( $g$ )	$9,8 \text{ m/s}^2$
Velocidad del bloque ( $v$ )	10 m/s
Coefficiente de rodadura ( $C_{rr}$ )	0,003
Largo de la rampa ( $L$ )	1000 m

Por otro lado, en esta sección se hace referencia a la eficiencia del sistema, la cual está determinada tanto por la potencia necesaria para elevar el bloque (estado de carga) como por la potencia generada en su descenso (estado de descarga), y que se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{P_{md}}{P_{mc}} \quad (4.19)$$

### 4.4.1. Variación de pendiente

A continuación, se analiza el efecto de la pendiente en el sistema GESS. Para ello, se evaluaron diferentes ángulos:  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $90^\circ$ .

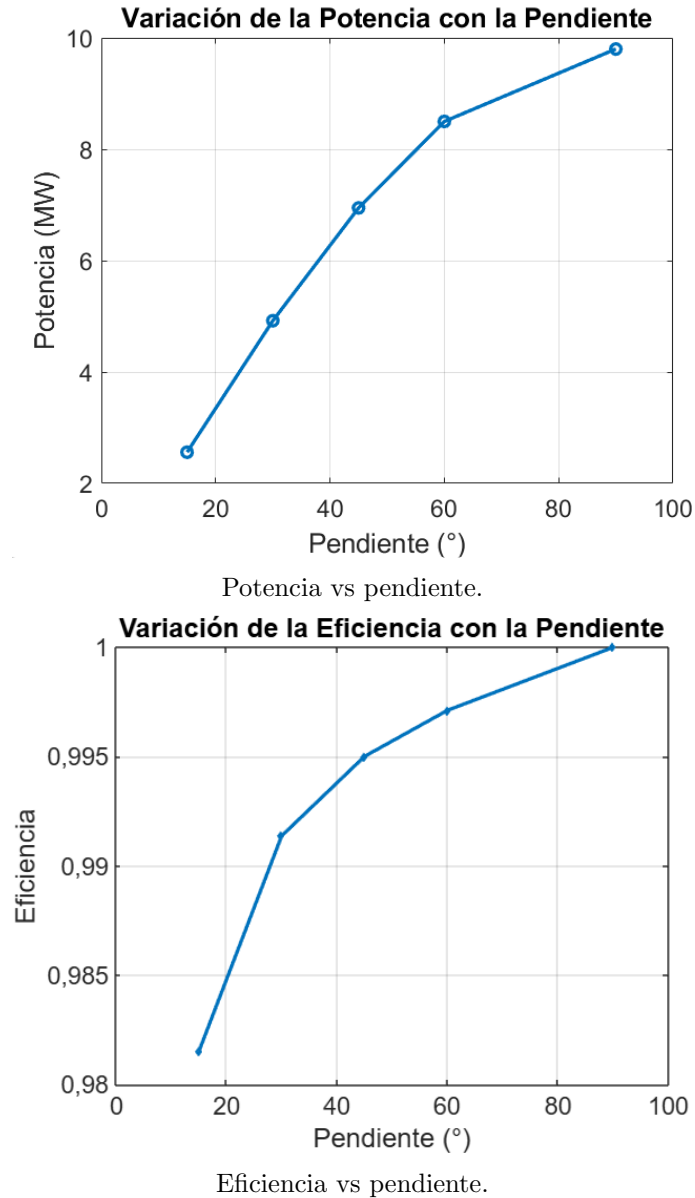


Figura 4.4: Efecto de la pendiente en el sistema GESS.

Se observa que, a medida que el ángulo de inclinación de la pendiente aumenta, también lo hace la exigencia sobre el motor. Esto se debe a que la componente del peso en dirección del plano inclinado se incrementa, lo que requiere una mayor fuerza para realizar la elevación de los bloques. No obstante, este aumento en la pendiente también conlleva una mejora en la eficiencia del sistema, ya que la fricción entre los bloques y los rieles pierde protagonismo en comparación con el efecto gravitacional. En un escenario extremo, con una pendiente de  $90^\circ$  (es decir, una caída vertical), la fricción sería teóricamente nula, lo que permitiría alcanzar el máximo rendimiento posible del sistema.

#### 4.4.2. Variación de velocidad

Ahora se analiza el efecto de la velocidad en el sistema GESS, considerando valores de 5, 10, 15, 20 y 25 m/s.

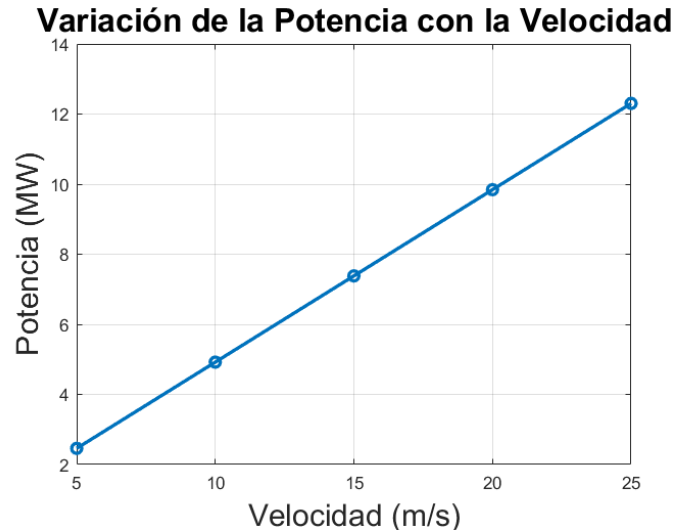


Figura 4.5: Potencia vs velocidad.

La velocidad de los bloques influye directamente en la potencia necesaria para realizar el trabajo. En la literatura, se recomienda utilizar una velocidad de aproximadamente 10 m/s para asegurar descensos y ascensos controlados de los bloques [31].

Es importante destacar que, en este estudio, se consideró una velocidad constante. Sin embargo, en un sistema real, la aceleración debe ser tomada en cuenta, ya que los bloques pasarán de un estado dinámico (movimiento sobre la pendiente) a un estado estático (cuando llegan a la parte superior o inferior del sistema). Durante esta transición, es fundamental regular la velocidad de la masa para asegurar una carga y descarga controladas.

Por otro lado, la eficiencia del sistema permanece constante con la variación de la velocidad, dado que la potencia de carga y descarga dependen linealmente de esta variable. Al mantenerse la misma relación entre ambas, la eficiencia no se ve afectada.

#### 4.4.3. Variación de fricción

A continuación, se analiza el efecto del coeficiente de rodadura en el sistema GESS, considerando valores de 0, 0,001, 0,0025, 0,005 y 0,01.

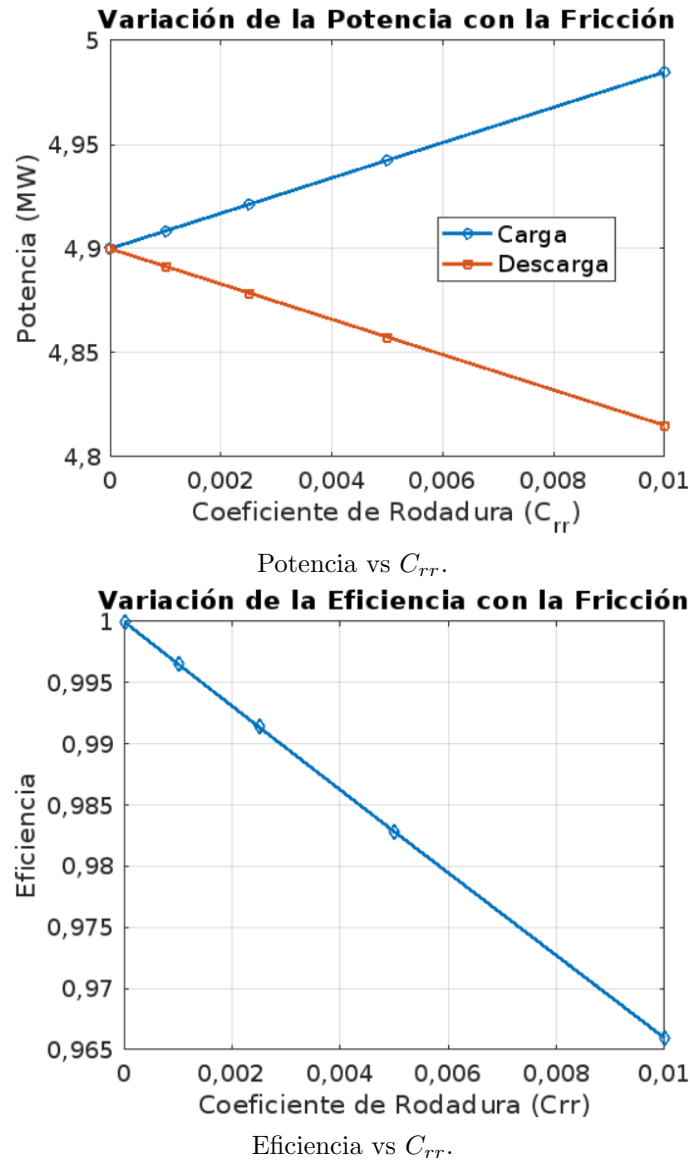


Figura 4.6: Efecto del coeficiente de rodadura en el sistema GESS.

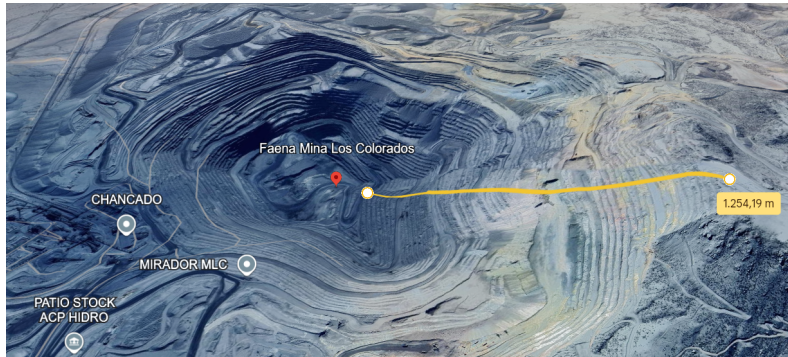
A partir de los resultados obtenidos, se evidencia que, a medida que aumenta el coeficiente de rodadura, la potencia requerida para la carga incrementa. Esto se debe a la mayor resistencia generada por la fricción entre las ruedas y los rieles, lo que implica un mayor esfuerzo del motor para realizar el trabajo. Caso contrario ocurre con la descarga en donde dicha fuerza de fricción favorece la orientación de la fuerza del motor, provocando que tenga que utilizar menos fuerza para realizar el mismo trabajo.

En un caso ideal, el coeficiente de fricción sería nulo ( $C_{rr} = 0$ ), lo que permitiría minimizar las pérdidas por fricción. Sin embargo, en la realidad, el coeficiente de rodadura varía en función del material de los rieles, las condiciones climáticas y otros factores geográficos. Es fundamental mantener un coeficiente de fricción óptimo para evitar pérdidas significativas de eficiencia en el sistema.

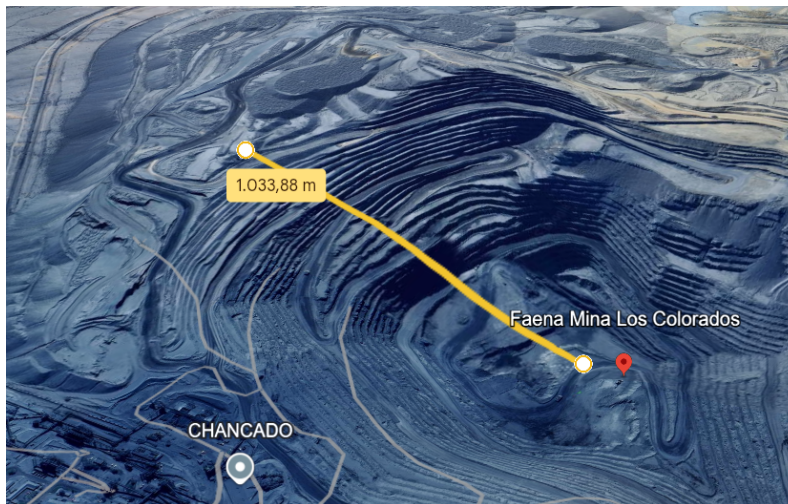
## 4.5. Caso Minero

Uno de los objetivos del estudio es determinar las especificaciones técnicas necesarias para la potencial implementación de un sistema GESS en la Minera Los Colorados. Para ello, se han identificado y analizado posibles zonas de intervención, las cuales se presentan en la Figura 4.7.

### 4.5.1. Sistema GESS en pendiente



Opción 1.



Opción 2.

Figura 4.7: Comparación entre las opciones consideradas para implementar el sistema GESS [12].

En minería, las pendientes entre niveles, conocidas como inclinaciones o taludes, generalmente presentan ángulos entre  $30^\circ$  y  $45^\circ$ . Para este estudio se ha seleccionado un ángulo de inclinación conservador de  $30^\circ$ . Por otro lado, la longitud del tramo disponible depende directamente de la zona de intervención. Según el análisis de imágenes satelitales, se estima una distancia útil aproximada de 1000 metros desde el centro de la mina (como se puede observar de la Figura 4.7), lo cual se considera suficiente para la operación propuesta. En consecuencia, el sistema opera sobre un tramo de 1000 metros, considerando una velocidad constante por bloque de 10m/s. Esta distancia se estima a partir de las

imágenes satelitales, las cuales muestran un trayecto entre la zona más profunda de la mina y una planicie superior, donde sería factible ubicar la plataforma de bloques. Estos bloques permitirían luego la operación del sistema en sus modos de carga y descarga. Por ello, se ha adoptado un escenario conservador (caso negativo), considerando una distancia limitada de 1000 m para el análisis.

Tabla 4.2: Resultados del dimensionamiento del sistema GESS.

Parámetro	Valor
Tiempo de ascenso/descenso	100 s
Fuerza de carga	492546,11 N
Potencia requerida para carga	4925461,15 W (4,93 MW)
Fuerza de descarga	487878,24 N
Potencia generada en descarga	487453,89 W (4,87 MW)
Eficiencia del sistema	0,99
Número de bloques requeridos para despacho de 5 horas	180

Los valores de la Tabla 4.2 se han calculado considerando los supuestos previamente mencionados. Para garantizar una capacidad total de almacenamiento de energía, se definió un tiempo operativo continuo de 5 horas. Para alcanzar un objetivo cercano a 10 MW, se podría aumentar el número de unidades del sistema; por ejemplo, dos unidades con estas especificaciones alcanzarían aproximadamente 9,8 MW. Por consiguiente, la energía total almacenada sería:

$$E = P \cdot t = 9,8 \text{ MW} \times 5 \text{ h} \approx 49 \text{ MWh} \quad (4.20)$$

#### 4.5.2. Análisis de bloques

Una ventaja significativa de desarrollar este tipo de proyecto en el sector minero es la posibilidad de reutilizar materiales residuales propios de la operación minera, tales como escombros, para la fabricación de bloques, disminuyendo costos y promoviendo la sustentabilidad del sistema.

La elección del material está fuertemente influenciada por su densidad, ya que esta determinará directamente las dimensiones y el volumen del bloque, afectando así la eficiencia y costo del sistema. Cabe destacar que el número de bloques necesarios dependerá del tiempo deseado para el despacho de energía, relación que mejora al aumentar la profundidad o longitud del recorrido disponible, incrementando así la energía almacenada por bloque.

En este caso particular, con una capacidad objetivo aproximada de 50 MWh, se requieren aproximadamente 180 bloques, considerando un tiempo operativo deseado ( $T_{de}$ ) definido como:

$$T_{de} = N_{hr} \cdot 3600 = 18000 \text{ s} \quad (4.21)$$

Donde,

- $N_{hr}$ : Número de horas deseadas de operación (por ejemplo, 5 horas)
- 3600: Cantidad de segundos en una hora
- Resultado:  $T_{de}$  en segundos

El número exacto de bloques será función del tiempo deseado respecto del tiempo operativo de carga o descarga del sistema ( $t$ ):

$$t = \frac{L_{trayecto}}{v} = \frac{1000 \text{ m}}{10 \text{ m/s}} = 100 \text{ s} \quad (4.22)$$

Donde,

- $t$ : Tiempo total requerido para completar el trayecto, en segundos (s).
- $L_{trayecto}$ : Longitud total del recorrido del bloque sobre el plano inclinado, en metros (m).
- $v$ : Velocidad constante del desplazamiento del bloque, en metros por segundo (m/s).

Dando un resultado de número de bloques de:

$$N_{bloques} = \frac{T_{de}}{t} = 180 \quad (4.23)$$

La selección del material debe buscar el equilibrio entre una alta densidad, que permita bloques más compactos, y costos reducidos. A continuación, se presentan materiales típicos disponibles en minería, con sus respectivas densidades y volúmenes requeridos:

Tabla 4.3: Densidad media y volumen requerido por material para bloques de 100 toneladas.

Material	Densidad media ( $\text{kg/m}^3$ )	Volumen requerido ( $\text{m}^3$ )
Escombros mineros	2.000	50,0
Hormigón convencional	2.400	41,7
Roca natural	2.650	37,7
Escorias siderúrgicas	2.800	35,7

Considerando el promedio de densidades mostrado en la Tabla 4.3, se obtiene un valor medio de  $2462,5 \text{ kg/m}^3$ . A partir de esta densidad y del peso estimado por bloque, se calcula un volumen de  $41,3 \text{ m}^3$ , lo que permite definir sus dimensiones estándar de transporte ferroviario, correspondientes a un ancho de 2,5 m, altura de 2,5 m y un largo aproximado de 6,6 m. Para almacenar los 180 bloques requeridos, se calcula un área total incluyendo un margen adicional del 20% para circulación, seguridad y operación:

$$A_{Total} = 180 \times (6,6 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}) \times 1,2 = 3.564 \text{ m}^2 \quad (4.24)$$

Finalmente, en la Tabla 4.4 se resumen las principales características consideradas para los bloques en el sistema GESS analizado:

Tabla 4.4: Características de bloques para un sistema GESS de 10 MW [A.0.1].

Parámetro	Valor
Número de bloques requeridos	180
Peso por bloque	100 toneladas
Dimensiones por bloque (Largo × Ancho × Alto)	6,6 m × 2,5 m × 2,5 m
Densidad media del material	2462,5 kg/m <sup>3</sup>
Volumen por bloque	41,3 m <sup>3</sup>
Área total requerida	3.564 m <sup>2</sup>

Es importante señalar que los valores indicados corresponden a condiciones y supuestos específicos, los cuales podrían variar dependiendo de factores prácticos como la disponibilidad real de materiales, maquinaria y otros recursos en un escenario operativo real.

### 4.5.3. Elección del cable GESS

Para el diseño del sistema GESS, la elección del cable es un aspecto fundamental, ya que será el encargado de movilizar los bloques a lo largo de su trayectoria. Se ha optado por utilizar cables de acero debido a su alta resistencia y preferencia industrial. Estos cables deben cumplir con los requisitos mecánicos asociados a la operación del sistema (carga y descarga), en particular considerando la masa del bloque y el ángulo de inclinación de la pendiente, ya que estos factores determinan directamente la fuerza que el cable debe ser capaz de soportar. En este caso, se contempla un plano inclinado de 30°, con una longitud de 1000 metros, y una carga total de 100 toneladas.

Se asume que la velocidad y la fuerza necesarias para subir y bajar el bloque se mantendrán constantes, lo que simplifica el análisis dinámico del sistema. Bajo estas condiciones, la fuerza requerida para elevar el bloque en el plano inclinado se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$F = mg \sin \theta = 100 \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot \sin 30 \quad (4.25)$$

$$F = 490,5 \text{ kN} \quad (4.26)$$

La tensión en los cables puede reducirse si se incrementa el número de cables, lo que permite distribuir mejor la carga y, en muchos casos, reducir costos al permitir el uso de cables de menor resistencia y, por ende, más económicos. La carga soportada por cada cable se define como:

$$F_{\text{cable}} = \frac{490,5 \text{ kN}}{N} \quad (4.27)$$

Donde  $N$  es el número total de cables empleados en el sistema.

### 4.5.3.a. Cálculo del área de los cables

Para dimensionar correctamente los cables, es necesario considerar tanto la fuerza que deben soportar como su peso propio. La sección transversal requerida para cada cable se obtiene mediante:

$$A_r = \frac{F_{\text{cable}} + m_r g}{\sigma_r} \quad (4.28)$$

donde:

- $\sigma_r = 896$  MPa (resistencia a la tracción del cable)
- $\rho_r = 4706$  kg/m<sup>3</sup> (densidad del cable)
- $m_r$  = masa del cable a utilizar

La masa total del cable está determinada por su sección transversal y su longitud:

$$m_r = A_r \cdot l \cdot \rho_r \quad (4.29)$$

El peso del cable se obtiene como:

$$P_r = m_r g \quad (4.30)$$

Por lo tanto, la elección del cable no es trivial y depende de múltiples factores, entre ellos la longitud, el número de cables y la capacidad de carga del sistema. En caso de utilizar un solo cable, la relación entre peso y área vs. longitud se ilustra en los siguientes gráficos:

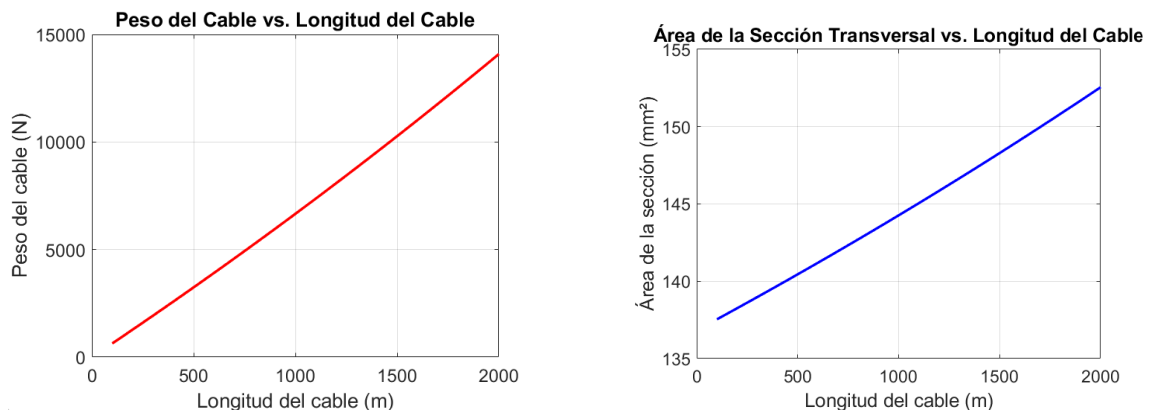


Figura 4.8: Comparación entre Peso y Área con respecto a la Longitud del Cable.

### 4.5.3.b. Uso de múltiples cables

El esfuerzo en cada cable puede reducirse significativamente si se emplea más de un cable, lo que mejora la seguridad del sistema y permite una mejor distribución de cargas.

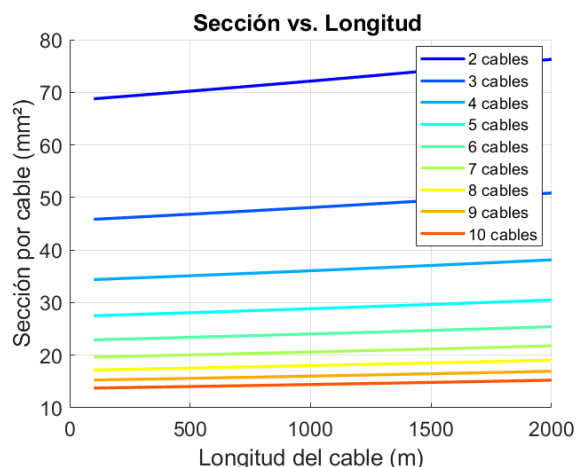


Figura 4.9: Área vs. Longitud para varios cables

Se observa de la Figura 4.9 que aumentar el número de cables ayuda a distribuir la carga y a su vez su sección, distribuyendo de mejor forma el esfuerzo individual en cada uno y mejorando la seguridad del sistema. Al analizar la relación entre la longitud del cable y la sección requerida por cada uno, se observa la existencia de un punto de saturación, a partir del cual incrementar el número de cables no genera una reducción significativa en la sección transversal individual. En particular, dentro del rango de 15 a 30  $mm^2$ , los beneficios de aumentar la cantidad de cables se vuelven marginales.

Cabe destacar que en esta etapa no se definió una cantidad específica de cables ni una sección óptima, ya que dicha elección se deja abierta al criterio técnico del diseñador, considerando variables estructurales, de disponibilidad y manufactura. Sin embargo, sí se incorpora en una sección posterior un análisis económico basado en el costo por metro lineal de cable ( $\$/m$ ), lo cual permitirá evaluar configuraciones bajo un enfoque técnico-económico más completo.

#### 4.5.4. Selección del Riel AREMA 115 RE para Soporte de Bloques de 100 Toneladas

Si bien el perfil AREMA 115 RE fue seleccionado previamente como base para el presente estudio, se estimó adecuado incorporar esta subsección con el fin de presentar algunos criterios generales que influyen en la selección de rieles ferroviarios, especialmente en aplicaciones de carga pesada como la que implica el sistema GESS.

Tabla 4.5: Comparación de Perfiles de Rieles Ferroviarios

Tipo de Riel	Módulo Resistente ( $cm^3$ )	Carga Teórica (Toneladas x riel)	Uso recomendado
TR50	790	50 - 55	Ferrocarriles estándar de carga media
UIC 54	960	55 - 60	Alta capacidad, vías principales
UIC 60	1100	60 - 65	Ferrocarriles de carga pesada
AREMA 115 RE	1155	60 - 70	Uso en minería y transporte industrial
AREMA 136 RE	1360	75 - 80	Vías con tráfico muy pesado

Entre los factores relevantes a considerar se encuentra el número de ejes por vagón, ya que una mayor cantidad permite distribuir mejor la carga total, reduciendo la exigencia

sobre cada riel individual. Esto puede abrir la posibilidad de utilizar perfiles más livianos cuando sea conveniente. Por el contrario, el uso de rieles de mayor capacidad estructural permite emplear configuraciones con menos ejes, sin comprometer la seguridad o vida útil de la infraestructura.

Por lo tanto, aunque no se realizó un análisis comparativo exhaustivo entre perfiles, se considera que el perfil AREMA 115 RE se encuentra dentro del rango técnicamente adecuado para esta aplicación (véase Tabla 4.5), dada su presencia común en contextos industriales y mineros de alta demanda.

## 4.6. Eficiencia del sistema

Por otro lado, resulta necesario analizar la eficiencia con la que la energía será finalmente entregada a la red. Para ello, se analizan los principales conjuntos de eficiencias involucradas en el proceso de conversión, almacenamiento y entrega de energía dentro del sistema GESS.

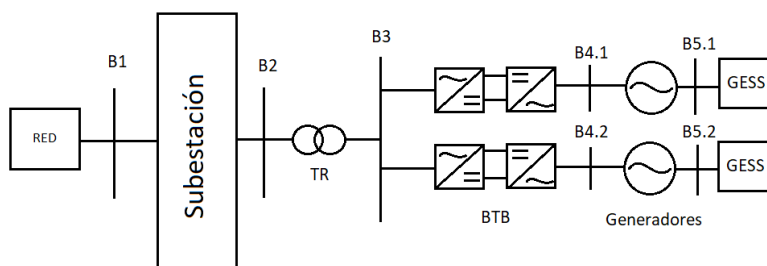


Figura 4.10: Sistema Unifilar GESS (elaboración propia).

Como se puede observar en la Figura 4.10, el sistema está compuesto por el GESS, el cual integra generadores síncronos eléctricos. En modelos superiores a 1 MW, estos generadores pueden alcanzar eficiencias de hasta 97 %.

Además, se sugiere el uso de un convertidor back-to-back (BTB), cuya función principal es regular la potencia activa, mejorar la estabilidad del sistema, reducir armónicos y optimizar los flujos de corriente en ambas direcciones. En el mercado, existen diversos modelos de este tipo con eficiencias superiores al 95 %.

Cabe destacar que otros tipos de convertidores no siempre resultan adecuados para esta aplicación, ya que no todos permiten una operación bidireccional con control de carga y descarga. En cambio, el convertidor BTB permite gestionar ambos modos de operación desde un mismo dispositivo, ofreciendo mayor control sobre la potencia activa, mejor respuesta ante variaciones en la red y una significativa reducción de armónicos, lo cual no está garantizado por convertidores convencionales.

Por estas razones, se recomienda el uso de esta topología. No obstante, en caso de considerar alternativas distintas, se deberá revisar cuidadosamente sus especificaciones técnicas y capacidades operacionales para asegurar que cumplan con los requerimientos del sistema.

Por otro lado, la eficiencia de contacto rueda-riel ha sido estimada en aproximadamente 99 %, considerando únicamente las pérdidas por fricción mecánica durante la rodadura.

Este valor se justifica por los coeficientes de rodadura típicos del orden de 0,001 a 0,005 ( $\eta = 1 - C_{rr}$ ).

Para estimar estas pérdidas, se toma como referencia el rendimiento promedio de cabrestantes eléctricos de alta potencia, los cuales pueden alcanzar eficiencias superiores al 90 %. Dado que el sistema GESS combina la eficiencia del generador y del cabrestante, se considerará el promedio de ambas eficiencias como el valor representativo para el desempeño global del sistema.

Finalmente, se asume que el punto de entrada del sistema GESS es la barra B3, y que el transformador (TR) está incluido dentro de las subestaciones de la minera o ha sido reacondicionado para su conexión al sistema. Para este análisis, se considerará un caso optimista en el que la eficiencia combinada de la subestación y el transformador sea del 99 %.

Dado esto, para calcular la eficiencia total del sistema GESS, es necesario evaluar la eficiencia de cada uno de sus componentes. La eficiencia total se obtiene multiplicando las eficiencias individuales de cada etapa del sistema:

$$\eta_{\text{total}} = \frac{\eta_{\text{generador}} + \eta_{\text{mecánica}}}{2} \cdot \eta_{\text{convertidor}} \cdot \eta_{\text{transmisión}} \quad (4.31)$$

Donde:

- $\eta_{\text{generador}}$  = Eficiencia del generador síncrono ( $\sim 97\%$ )
- $\eta_{\text{convertidor}}$  = Eficiencia del convertidor back-to-back ( $\sim 95\%$ )
- $\eta_{\text{contacto}}$  = Eficiencia de transmisión (cables y transformadores) ( $\sim 99\%$ )
- $\eta_{\text{mecánica}}$  = Eficiencia del sistema de poleas, cabrestante y fricción ( $\sim 90\%$ )

La eficiencia total estimada del sistema GESS es aproximadamente 87,93 %:

$$\eta_{\text{total}} \approx 88\% \quad (4.32)$$

Esto significa que, considerando las pérdidas en los diferentes componentes del sistema, alrededor del 88 % de la energía utilizada se entrega de manera efectiva a la red, mientras que el resto se disipa en forma de calor, fricción y pérdidas eléctricas. Volver a reiterar que esto es un modelo aproximado bajo supuestos específicos.

## 4.7. Conclusiones Análisis Técnico

Para el desarrollo del análisis técnico se establecieron supuestos simples pero representativos, los cuales permitieron construir una base sólida para proyectar un modelo aplicable en la práctica. Durante este proceso, se evidenció que la viabilidad de un sistema GESS no depende de una sola disciplina, sino de la integración de múltiples áreas de la ingeniería: mecánica, eléctrica, construcción civil, metalurgia, entre otras. Todas ellas son fundamentales para llevar adelante un proyecto de esta envergadura de manera correcta y coherente.

Aunque la tecnología GESS no es completamente nueva (basándose en el principio de operación de máquinas eléctricas síncronas y asíncronas) su implementación requiere resolver múltiples desafíos técnicos. Factores como la elección del sitio, la geometría del terreno y los costos asociados a los materiales disponibles influyen directamente en el diseño del sistema y abren distintas posibilidades de enfoque para su desarrollo. En este sentido, el diseño de ingeniería y la flexibilidad en la planificación son elementos clave para asegurar el éxito del proyecto.

Los resultados obtenidos en los distintos gráficos permitieron identificar que el sitio donde se instale el sistema será uno de los pilares fundamentales del diseño. De este depende directamente la pendiente disponible para el trayecto de los carros GESS, así como la altura útil para la generación de energía. En particular, se observó que la mina Los Colorados, si bien de menor escala comparada con otras a nivel nacional, puede servir como referencia para una primera implementación. No obstante, minas con mayor altura accesible podrían ofrecer mejoras sustanciales en términos de eficiencia energética y reducción de costos.

Desde un punto de vista técnico, cabe destacar que se logró una eficiencia global cercana al 88 %. Se evidenció que pendientes más pronunciadas favorecen la eficiencia del sistema, aunque será necesario evaluar la viabilidad topográfica y estructural del terreno para confirmar su aplicabilidad. Del mismo modo, se observó que velocidades elevadas podrían dañar los rieles y componentes del sistema, por lo que se recomienda operar a velocidades moderadas y constantes para garantizar un funcionamiento seguro.

En resumen, bajo las condiciones mínimas consideradas, se logró una potencia de carga cercana a los 5 MW durante un periodo de 5 horas, requiriendo un total de 180 bloques. Elegir un terreno con mayor altura natural permitiría reducir significativamente los costos de inversión, aumentando aún más la competitividad del proyecto. Esto confirma que la flexibilidad del diseño es alta y su potencial es considerable, posicionando a los sistemas GESS como una tecnología confiable, adaptable y con capacidad de ofrecer una segunda vida útil a faenas mineras, abriendo incluso nuevas oportunidades dentro del mercado energético-minero.

# Capítulo 5

## Análisis Económico

En este capítulo se analizará el costo de producción general necesario para el funcionamiento de un sistema GESS, con el objetivo de evaluar su escalabilidad y determinar la viabilidad del proyecto. Para ello, se establecerán los costos de inversión asociados, junto con indicadores que permitan evaluar su viabilidad económica.

Dentro de las propuestas actuales y considerando el alcance de este proyecto, se ha identificado como una de las principales ventajas de implementar un sistema GESS en una operación minera la posibilidad de reutilizar infraestructura existente, especialmente en lo que respecta a instalaciones eléctricas.

Por esta razón, no se incluyen los costos ni el diseño de una subestación dedicada para la carga y descarga de energía, dado que se asume que la infraestructura eléctrica ya se encuentra integrada en la operación minera, reduciendo así la inversión inicial requerida.

### 5.1. Costo de inversión y operación

Los costos de inversión dependen directamente de los proveedores y de la obtención de equipos y materiales. A continuación, se presentan estimaciones aproximadas de los principales componentes requeridos para el desarrollo del proyecto.

#### 5.1.1. CAPEX y OPEX

Dentro de los costos iniciales de inversión (CAPEX) existen múltiples factores a considerar. La CNE ofrece un desglose detallado para proyectos tipo BESS en modalidad standalone, el cual se utilizará como referencia para este análisis (el cual se puede observar en la Tabla [5.1](#)).

Tabla 5.1: Descripción técnica del sistema de almacenamiento – Opción 2 [13].

Parámetro	Unidad	Valor
Capacidad	MW	10
Tiempo de almacenamiento	Hrs.	5
Energía	MWh	50
C-Rate (tasa de descarga)	–	C/2
Eficiencia de ciclaje AC–AC	%	83 – 85
Voltaje de conexión	kV	66

Si bien existen versiones más recientes de este informe (2023 y 2024), se ha optado por utilizar la versión 2019 [13] (en adelante, el informe de la CNE), ya que presenta un mejor nivel de detalle respecto de los componentes de inversión, lo que facilita una comparación más precisa. En el informe de la CNE se presenta un desglose detallado de los ítems considerados en las estimaciones de inversión. En particular, la Opción 2 del informe, que contempla un sistema con una potencia de 10 MW y una capacidad de almacenamiento de 5 horas, coincide con las características del proyecto desarrollado en este estudio. Los costos y descripciones asociadas a esta opción se resumen en la Tabla 5.2 y la Tabla 5.3.

Tabla 5.2: Ítems considerados en la estimación de costos del proyecto [13].

Ítem	Descripción
Baterías	Sistema de almacenamiento de energía
Inversor	Conversión de energía DC a AC
Balance de Planta	Componentes eléctricos y mecánicos auxiliares
Costo EPC	Ingeniería, Procura y Construcción
Costo Equipamiento & EPC	Equipamiento más implementación completa
Interconexión	Conexión al sistema eléctrico existente
Adquisición de Terreno	Compra o arriendo de terreno para el proyecto
Permisos	Costos administrativos y regulatorios
Contingencias	Fondos para imprevistos técnicos o financieros
Overhead del Desarrollador	Costos indirectos del desarrollador
Utilidades del Desarrollador	Margen de ganancia del desarrollador

Tabla 5.3: Resumen de costos estimados del sistema BESS – Opción 2 [13].

Ítem	Costo Total (kUSD)	USD/MWh	USD/kW
Baterías	10.675	214	1.068
Inversor	622	12	62
Balance de Planta	2.920	58	292
Costo EPC	2.595	52	259
Costo Equipamiento & EPC	16.812	336	1.681
Interconexión	1.781	36	178
Adquisición de Terreno	1.775	36	178
Permisos	100	2	10
Contingencias	504	10	50
Overhead del Desarrollador	504	10	50
Utilidades del Desarrollador	1.049	21	105
<b>Costo Desarrollo</b>	<b>5.714</b>	<b>114</b>	<b>571</b>
<b>Costo Total</b>	<b>22.525</b>	<b>451</b>	<b>2.253</b>

Cabe destacar algunas consideraciones específicas respecto a estos ítems. Para el sistema de almacenamiento propuesto, se hará la inclusión del motor-generador junto con un sistema de engranajes (gearbox) que permitirá la transmisión mecánica hacia el sistema físico.

Respecto al inversor, se utilizará un convertidor tipo back-to-back, lo que facilitará un traspaso eficiente de energía en ambas direcciones (carga y descarga).

La adquisición de terreno se omitirá del análisis, ya que se proyecta que el sistema será instalado dentro del mismo recinto industrial de la faena minera existente. Además, se espera evitar excavaciones significativas, lo que podría reducir los costos en un 50% del CAPEX total, al aprovechar la infraestructura ya disponible. No obstante, sí se considera la construcción de las estructuras necesarias para la operación adecuada del sistema.

Los costos por overhead se incluirán dentro del ítem de imprevistos. En cuanto a las utilidades del desarrollador, serán abordadas en la siguiente sección mediante un análisis de flujo de caja que considera ingresos por inyección y retiro de energía en la subestación Los Colorados.

Finalmente, el costo de operación y mantenimiento (O&M o OPEX) se estimará como un 5% del costo total del proyecto, de acuerdo con lo propuesto en [32].

Para el sistema GESS, se resumen a continuación los principales parámetros operacionales considerados:

Tabla 5.4: Parámetros operacionales del sistema GESS.

Parámetro	Unidad	Valor
Duración de despacho	hr	5
Velocidad del bloque	m/s	10
Largo total de vía	km	1
Potencia	MW	10
Dimensión por bloque	m <sup>3</sup>	24
Total de bloques	Nº	180
Eficiencia sistema	$\eta_{total}$	$\approx 88\%$

La eficiencia del sistema se aplicará directamente sobre la energía tanto de carga como de descarga resultantes del proyecto, ya que estos dependen de manera directa de la cantidad de energía efectivamente inyectada. Con base en los parámetros mencionados anteriormente, a continuación se presenta la estimación final de los costos CAPEX y OPEX asociados al proyecto GESS en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Costo estimado de inversión para el sistema GESS.

Ítem	Precio por unidad	Costo (USD)
Motor Eléctrico + Gear Box (\$/kW)	120	1.200.000
Back-to-Back (\$/kW)	100	1.000.000
Cable (\$/m)	15	30.000
Vías férreas (\$/km)	4.000	4.000
Costo EPC (\$/kW) [13]	259	2.590.000
Interconexión (\$/kW) [13]	178	1.780.000
Balance de Planta (BOP) (\$/kW) [13]	292	2.920.000
Construcción de bloques (\$/m <sup>3</sup> ) (prom. [20], [33])	30	129.600
Estudios y Permisos (\$/kW) [13]	10	100.000
Imprevistos (\$/kW) [13]	50	500.000
<b>Total Inversión</b>		<b>9.653.600</b>
O&M		482.680
<b>Costo Total</b>		<b>10.136.280</b>

Cabe destacar que los valores no referenciados en la Tabla 5.5 corresponden a estimaciones obtenidas a partir de consultas de mercado realizadas durante la redacción de este documento. En particular, el costo del conjunto Motor Eléctrico + Gear Box se estimó en aproximadamente 100 USD/kW, basándose en un promedio entre valores reportados en la literatura, como en [33], y precios comerciales disponibles en el mercado actual.

Por otro lado, los valores utilizados para el convertidor back-to-back, los cables eléctricos y la infraestructura de vías férreas también corresponden a promedios de mercado, ajustados a las condiciones típicas de un entorno minero-industrial.

En cuanto a los costos asociados al Balance of Plant (BOP) y al EPC, si bien no habían sido mencionados previamente de forma detallada, se incluyen siguiendo el desglose entregado en informes de la CNE. En dichos documentos, el BOP se refiere a los equipos eléctricos auxiliares como transformadores, protecciones, cables y sistemas de control,

mientras que el ítem EPC engloba los costos asociados a ingeniería, procura y construcción del sistema.

Cabe señalar que se utilizó como base de comparación la Opción 2 del informe CNE sobre sistemas BESS, ya que comparte características similares con este proyecto —específicamente en cuanto a la potencia nominal y duración de almacenamiento—. Adicionalmente, considerando que en este caso se plantea la reutilización de infraestructura minera existente (como el terreno y parte de las instalaciones eléctricas), dicha referencia resulta pertinente y representativa para efectos de evaluación económica.

## 5.2. Costo nivelado de la energía

El nivel de competitividad de esta tecnología en el mercado eléctrico, y en particular en el contexto chileno, está condicionado por el mecanismo de despacho basado en costos marginales. En este esquema, las tecnologías con menores costos de despacho de potencia se priorizan, lo que implica que cualquier sistema que desee participar activamente del mercado debe ser capaz de ofrecer energía a un precio competitivo en relación con otras fuentes.

En este contexto, cobran relevancia las métricas del Levelized Cost of Energy (LCOE) y el Levelized Cost of Storage (LCOS), ya que permiten estimar el costo promedio de la energía entregada (USD/MWh), considerando la inversión inicial, los gastos operacionales y la vida útil del sistema. Mientras que el LCOE se utiliza tradicionalmente para evaluar tecnologías generadoras, el LCOS permite aplicar el mismo enfoque económico a tecnologías de almacenamiento de energía.

Estas métricas no solo permiten calcular el precio mínimo al cual se debe vender la energía para recuperar los costos del proyecto, sino que también proporcionan una base común de comparación entre diferentes tecnologías. Por lo tanto, se propone calcular ambos indicadores para este proyecto con el objetivo de evaluar su competitividad relativa dentro del mercado eléctrico chileno. En particular, el LCOS obtenido podrá compararse con los LCOE de otras tecnologías de generación o almacenamiento, permitiendo determinar si el sistema GESS podría despacharse con prioridad dentro del sistema, en función de sus costos y de la estructura de precios vigente. Estas se pueden expresar en las siguientes fórmulas simplificadas:

$$\text{LCOS} = \frac{\text{CAPEX} + \text{OPEX} + \text{Costo de carga}}{\text{MWh descargados}} \quad (5.1)$$

$$\text{LCOE} = \frac{\text{CAPEX} + \text{OPEX}}{\text{MWh entregados}} \quad (5.2)$$

A partir de las Ecs. (5.1) y (5.2), se observa que la principal diferencia entre ambas métricas radica en la incorporación del costo de carga en el caso del LCOS. No obstante, en un mercado como el chileno donde se ha observado un crecimiento significativo en fuentes de generación solares y eólicas, el costo de carga puede verse reducido considerablemente, llegando en casos a ser cero. Esto es especialmente cierto en proyectos que integran generación y almacenamiento o que aprovechan directamente el vertimiento energético por parte de la fuente generadora. Esta condición tiende a cerrar la brecha entre el LCOE y el LCOS. Para este proyecto en particular, se analiza el proyecto bajo la métrica LCOE,

asumiendo que un sistema de generación solar o eólico provee la energía de carga sin costo asociado.

Tabla 5.6: Parámetros para el cálculo del LCOE del sistema GESS

Parámetro	Unidad	Valor
Inversión inicial (CAPEX)	USD	\$9.653.600
Costo anual de O&M	USD	\$482.680
Tasa de descuento	%	8
Vida útil	años	30
Energía entregada anual	MWh	18.250
PVA (30 años, 8%)	-	$\approx 11,26$
Energía entregada total descontada	MWh	$18,250 \times 11,26 \approx 205,045$

Cabe destacar que tanto los valores de O&M como los de energía entregada corresponden a proyecciones a futuro. Por esta razón, y debido a que se consideran constantes a lo largo de los años, se utiliza el concepto de valor presente de anualidades (PVA) al momento de calcular el LCOE y LCOS. Este valor depende de la tasa de descuento y del horizonte temporal evaluado, y se calcula como:

$$\text{PVA} = \sum_{t=1}^{30} \frac{1}{(1 + 0,08)^t} \approx 11,26 \quad (5.3)$$

Esto implica que cualquier flujo futuro —exceptuando la inversión inicial (CAPEX)— debe ser ponderado mediante este factor de descuento para calcular su valor presente. En base a estos supuestos, se construyó la Tabla 5.6, cuyos parámetros serán utilizados en los cálculos que se presentan en las secciones posteriores. Cabe destacar que el valor de vida útil indicado en dicha tabla corresponde al mínimo encontrado en la literatura revisada, con el fin de adoptar un enfoque conservador en la proyección económica. Si bien algunos autores afirman que esta tecnología puede superar los 40 años de operación [2], se optó por utilizar un valor intermedio y prudente, calculado como un promedio aproximado entre las distintas referencias disponibles sobre sistemas GESS [2].

### 5.2.1. LCOE

La fórmula considerada para el cálculo del LCOE se presenta a continuación:

$$\text{LCOE} = \frac{\text{CAPEX} + \sum_{t=1}^{30} \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{30} \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (5.4)$$

Donde,

- $C_t$ : Costos operacionales en el año  $t$  (OPEX).
- $E_t$ : Energía generada en el año  $t$ .

- $r$ : Tasa de descuento.
- $t$ : Año de operación, variando desde 1 hasta 30 (vida útil del proyecto).

En este caso, el costo  $C_t$  corresponde a los gastos de operación y mantenimiento durante la vida útil del proyecto. Sustituyendo los valores respectivos:

$$LCOE = \frac{9653600 + 5433907}{205045} \quad (5.5)$$

$$LCOE \approx 73,5 \frac{\text{USD}}{\text{MWh}} \quad (5.6)$$

### 5.2.2. Consideraciones sobre el LCOE

Los valores calculados son referenciales y dependen significativamente de variables como la vida útil del proyecto, las condiciones geográficas, la escala de implementación, entre otras. En la Tabla 5.7, se presentan los parámetros que se mantendrán constantes, y posteriormente se analiza la sensibilidad del LCOE frente a variaciones individuales (los cálculos realizados se pueden ver en A.0.4).

Tabla 5.7: Parámetros constantes para análisis de LCOE.

Parámetro	Unidad	Valor
Inversión inicial	USD	9.653.600
Ingreso anual	USD/año	1.578.668
Costo O&M anual	USD/año	482.680
Energía entregada anual	MWh/año	18.250
Tasa de descuento anual	%	8
Horizonte de evaluación	años	30

Las siguientes figuras ilustran la sensibilidad del LCOE frente a variaciones en tres parámetros clave: vida útil del proyecto, tasa de descuento y energía entregada, dados por la Tabla 5.7.

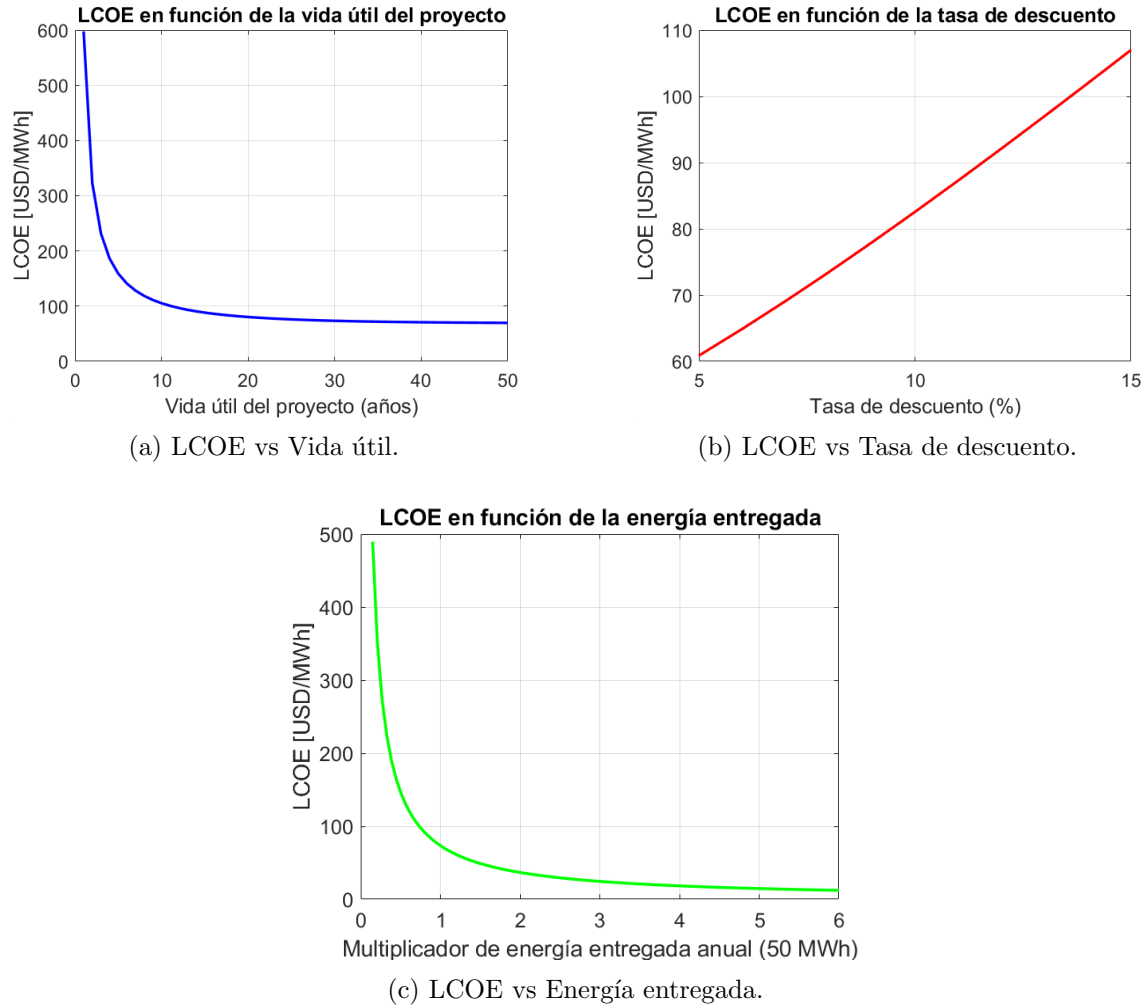


Figura 5.1: Análisis de sensibilidad del LCOE en función de distintos parámetros.

Como se observa en la Figura 5.1(a), extender la vida útil del proyecto permite disminuir el LCOE, ya que los costos se reparten en un mayor volumen de energía. Estos sistemas suelen ser robustos, utilizando motores asíncronos de alta confiabilidad, lo que permite proyectar vidas útiles superiores a 40 años, por la información otorgada de fabricantes de sistemas GESS.

En la Figura 5.1(b) se observa la influencia directa de la tasa de descuento. Esta refleja el costo de capital y el riesgo del proyecto. Proyectos con apoyo estatal tienden a tener tasas entre 6% y 8%, mientras que iniciativas privadas sin subsidios suelen utilizar tasas del 10% al 15%.

Finalmente, la Figura 5.1(c) muestra que aumentar la energía entregada, ya sea a través de mayor potencia o más horas de despacho, impacta positivamente en la rentabilidad del proyecto. Esto se explica porque al aumentar la energía total entregada, el LCOE de la energía disminuye, ya que los costos fijos de inversión se distribuyen sobre una mayor cantidad de MWh. Una reducción en el LCOE permite que el sistema GESS sea más competitivo dentro del mercado eléctrico chileno, en el cual el despacho se realiza priorizando las tecnologías con menores costos marginales. Por lo tanto, un LCOE más bajo incrementa las probabilidades de ser despachado con mayor frecuencia, desplazando

a tecnologías más costosas y generando mayores ingresos, lo que repercute positivamente en la rentabilidad del proyecto.

En este contexto, reutilizar infraestructura existente en faenas mineras —como pozos verticales o pendientes favorables— puede aumentar las inyecciones de energía, siempre que exista el espacio suficiente para almacenar bloques y/o se disponga de una mayor altura útil. Esto permite prolongar el despacho de potencia, aumentar la energía entregada y, consecuentemente, mejorar la competitividad económica del sistema.

### 5.3. Índices económicos

Para analizar los posibles retornos y beneficios asociados a un sistema GESS, es fundamental considerar su forma de remuneración. En Chile, la Ley N°21.505 de 2022 incorporó a los sistemas de almacenamiento como actores del sistema eléctrico, permitiéndoles participar en el despacho de energía en igualdad de condiciones que las centrales generadoras. Además, se les reconoce un rol en la planificación energética nacional.

El Reglamento de Coordinación del SEN (DS N°125/2017) establece modos de operación específicos para estos sistemas, retiro e inyección, y permite su uso en servicios complementarios, transmisión o arbitraje energético. Este mismo reglamento introdujo el concepto de autodespacho, habilitando que unidades de almacenamiento como un GESS se programen de forma autónoma, especialmente si operan en sistemas de autogeneración como podría ser el caso de energía renovables. En este contexto, un GESS podría almacenar excedentes y descargarlos según las necesidades del usuario, sin depender del despacho centralizado. Bajo el supuesto de que se tiene acceso completo y libre a este mercado donde las compras y ventas se realizan de forma directa, y los retiros e inyecciones por parte del sistema de almacenamiento están exentos de tarifas adicionales más allá de las ya señaladas, se analiza el caso particular de la barra de la Subestación Eléctrica (SE) Mina Los Colorados. En este contexto, se asume que uno de los principales consumidores será la propia Mina Los Colorados, la cual se encontrará ubicada y conectada directamente a la barra de dicha subestación.

Para ello, se calcularon (A.0.4) los retiros físicos y valorizados por barra horaria durante un día representativo del año 2025 [10]. El día seleccionado es el 1 de febrero, cuyos resultados se observan en la Figura 5.2.

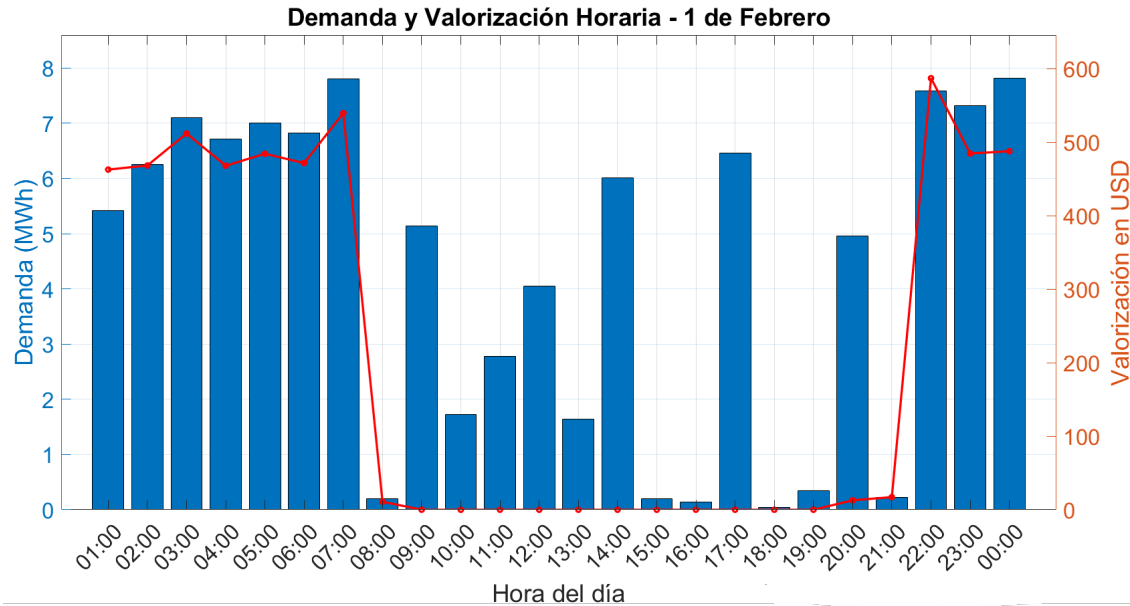


Figura 5.2: Retiros físicos y valorizaciones por hora de la barra SE Los Colorados [10].

A partir de la Figura 5.2 se realiza un análisis de las valorizaciones horarias en USD/MWh, con el objetivo de identificar los mejores momentos teóricos para realizar inyecciones de energía. El beneficio radica en que conociendo el valor horario de la energía, es posible despachar aplicando de mejor manera el arbitraje.

Los ingresos y costos fueron calculados bajo las siguientes consideraciones:

$$\text{Ingreso}_{\text{hora}} = \text{Precio}_{\text{mercado}} \cdot E \quad \text{USD} \quad (5.7)$$

Mientras que el costo referencial por hora, considerando un LCOE de 74 USD/MWh, será:

$$\text{Costo}_{\text{hora}} = 74 \frac{\text{USD}}{\text{MWh}} \cdot 50 \text{ MWh} = 3700 \quad \text{USD} \quad (5.8)$$

La legislación chilena permite (Decreto Supremo N° 125) que, si se dispone de un sistema de almacenamiento con acceso a energía a costo cero, este pueda conectarse y aprovechar dicha energía. No obstante, esto no exime al sistema de sus propios costos operativos por entregar energía. De esta manera, es posible estimar los ingresos diarios, el costo operativo y, bajo el supuesto de que el escenario se repita a lo largo del año (aunque de forma sesgada, ya que los ingresos y costos se asumieron constantes para los 365 días del año), se puede proyectar un ingreso neto anual multiplicando por 365. Los resultados se resumen en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8: Resumen de resultados económicos para el día 2 Febrero 2024.

Parámetro	Unidad	Valor
Eficiencia sistema	$\eta_{total}$	$\approx 88\%$
Energía total despachada	MWh	44.000
Ingreso bruto	USD	3103,82
Costo	USD	3700
Ingreso neto 2 Feb.	USD	-596

No obstante, este día corresponde a un caso particular y no es representativo del comportamiento anual. Para abordar esta limitación, se utilizó la base de datos del Coordinador Eléctrico Nacional, la cual contiene un registro casi completo del año 2024 (debido a que faltaban datos de Marzo, los cuales directamente no se utilizaron para el cálculo de Ingreso neto anual) para la Subestación Los Colorados. Aplicando la misma lógica mediante un código computacional desarrollado en MATLAB, se calcularon los ingresos netos anuales utilizando datos reales del sistema. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla [5.9](#).

Tabla 5.9: Resultados anuales considerando costos operativos y de carga.

Parámetro	Unidad	Valor
Eficiencia sistema	$\eta_{total}$	$\approx 88\%$
Energía total despachada	MWh/año	13.376,08
Ingreso bruto	USD	1.188.629,39
Costo operativo anual	USD	1.009.800,00
Ingreso neto anual	USD	178.829,39

A partir de los ingresos estimados, tanto diarios como anuales, se observa que el resultado final es proyecto variable y depende directamente de las decisiones operativas que se adopten, tales como el orden de despacho y el comportamiento de la demanda del sistema. A su vez, la estrategia de operación diaria influye de manera significativa en los ingresos totales obtenidos por el sistema. Si bien en la Tabla [5.8](#) se evaluó un caso ilustrativo arbitrario, es importante recalcar que la definición de una estrategia de operación adecuada debe ser uno de los principales objetivos del proyecto, ya que permite maximizar los ingresos al identificar y aprovechar las horas óptimas de carga y descarga de energía.

### 5.3.1. VAN y TIR

#### 5.3.1.a. VAN

Dentro de los indicadores económicos que otorgan confiabilidad al proyecto, es importante considerar el Valor Actual Neto (VAN). Este valor representa las proyecciones futuras en ganancias o pérdidas que podría tener el proyecto, ya que compara el dinero invertido con el esperado en el futuro, considerando el valor del tiempo. En particular, se toma como referencia un proyecto base con tasas de descuento que en Chile varían entre

el 6 % y el 10 %. Para este caso, se utilizará una tasa promedio del 8 %, considerando que esta tasa se encarga de traer a valor presente los flujos futuros de dinero.

En general, se pueden dar tres interpretaciones del VAN:

- $VAN \geq 0$ : el proyecto genera valor y es rentable.
- $VAN = 0$ : el proyecto no genera ganancias ni pérdidas.
- $VAN \leq 0$ : el proyecto pierde valor, siendo no rentable.

La fórmula del VAN se define como:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+d)^t} - I_0, \quad (5.9)$$

donde:

- $F_t$ : Flujo de caja en el año  $t$ .
- $d$ : Tasa de descuento.
- $n$ : Número total de períodos (puede expresarse en años, meses, trimestres, etc.).
- $I_0$ : Inversión inicial.

Dado los detalles previamente explicados del proyecto, se procede a calcular el VAN (A.0.5), este y sus parámetros se resumen en la siguiente Tabla 5.10.

Tabla 5.10: Parámetros considerados para el cálculo del VAN y resultado del mismo.

Parámetro	Estimado
Vida útil [años]	30
Inversión inicial [USD]	10.136.280
Ingreso Anual [USD]	1.188.629,39
VAN [USD]	3.245.052,16

### 5.3.1.b. TIR

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es otro de los indicadores relevantes para evaluar la rentabilidad del proyecto. Esta tasa permite analizar la rentabilidad de una forma diferente al VAN. En teoría, la TIR corresponde a la tasa de descuento a la cual el VAN es igual a cero. Como referencia, se utiliza la misma tasa de descuento del 8 %. La interpretación de la TIR se realiza según los siguientes criterios:

- $TIR \geq$  tasa de descuento: el proyecto es rentable.
- $TIR =$  tasa de descuento: el proyecto no es atractivo.

- $TIR \leq$  tasa de descuento: el proyecto no es rentable.

Una de las ventajas más notorias de la TIR es que permite una comparación directa entre distintos tipos de inversiones, ya que expresa los resultados en forma porcentual, a diferencia del VAN que lo hace en términos monetarios. Esta propiedad facilita la estandarización y el análisis de distintos proyectos bajo un mismo criterio. En general, mientras más alejada esté la TIR de la tasa de descuento, mayor será el atractivo del proyecto. No obstante, a diferencia del VAN, la TIR se relaciona directamente con un punto de comparación (la tasa de descuento), lo que permite prever situaciones atípicas cuando dicho valor se aleja excesivamente.

La TIR se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\sum_{t=0}^n \frac{F_t}{(1+r)^t} = 0 \quad (5.10)$$

donde  $r$  es la Tasa Interna de Retorno. Reemplazando los parámetros:

Este ejercicio no puede resolverse de forma algebraica, por lo que se utilizó el comando `irr()` en el software `MATLAB` para obtener la solución. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5.11: TIR calculado para proyecto.

Parámetro	Estimado
TIR	11,25 %

De forma análoga al análisis del VAN, una proyección adecuada de los ingresos futuros, combinada con un despacho estratégico y una correcta interpretación del comportamiento del mercado, resulta fundamental para asegurar la viabilidad de un proyecto de este tipo. Tal como se observa en la Tabla 5.11, en este caso el proyecto se considera viable, dado que la TIR supera la tasa de descuento establecida. Asimismo, es importante destacar que la probabilidad de éxito del proyecto aumenta en la medida que se maximiza la energía despachada, lo que contribuye a reforzar su rentabilidad. Esta relación puede visualizarse claramente en la Figura 5.3.

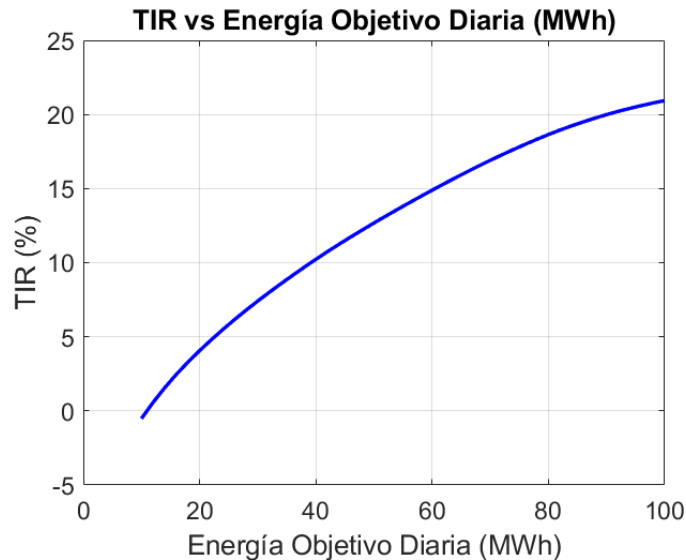


Figura 5.3: Relación entre la TIR y la energía objetivo diaria.

Uno de los elementos clave es el nivel de ingresos, ya que resulta fundamental realizar una buena proyección de las curvas de oferta y demanda para prever de forma adecuada el comportamiento del mercado. De igual forma, es importante estudiar las curvas de crecimiento, tendencias y elasticidades (por ejemplo, cómo el precio afecta a la demanda y la oferta). Además, las políticas de subsidios o incentivos son esenciales para asegurar el éxito de este tipo de proyectos.

## 5.4. Incentivos para el almacenamiento

Es importante destacar que la viabilidad del proyecto puede verse profundamente influida por el apoyo financiero disponible. Si bien este estudio no contempla beneficios indirectos generados por el sistema GESS en sí, existen múltiples mecanismos de apoyo, tanto públicos como privados, a los cuales es posible postular. Además, el contexto regulatorio nacional vigente favorece el desarrollo de tecnologías de almacenamiento energético, como se ha expuesto en capítulos anteriores.

A continuación, se presentan algunos de los principales hitos e instrumentos que podrían beneficiar directa o indirectamente la implementación de proyectos de almacenamiento energético en Chile, incluyendo sistemas GESS.

### 5.4.0.a. Terrenos Fiscales

En específico, el gobierno chileno ha impulsado el desarrollo de sistemas de almacenamiento mediante el Plan Nacional para Impulsar Proyectos de Almacenamiento en Terrenos Fiscales, anunciado a finales de 2023. Este plan pone a disposición terrenos fiscales ubicados estratégicamente cerca de subestaciones eléctricas, con el objetivo de fomentar la instalación de proyectos de almacenamiento energético y reducir barreras de entrada asociadas a la localización y conexión [\[34\]](#).

#### 5.4.0.b. Apoyos CORFO

Mediante resoluciones del Ministerio de Bienes Nacionales (Resolución Exenta N° 1096 del 06/12/2023 y su actualización mediante la Resolución Exenta N° 375 del 18/04/2024), se estableció un procedimiento especial para la concesión onerosa directa de estos terrenos a desarrolladores interesados. Este incentivo forma parte de la Agenda “Segundo Tiempo” de la Transición Energética, y se enmarca dentro de las metas de descarbonización de Chile al año 2050, asegurando condiciones favorables para el emplazamiento y conexión de estos proyectos.

Complementariamente, destaca el Programa Crédito Verde de CORFO [\[35\]](#), vigente desde 2022, que canaliza recursos hacia bancos e instituciones financieras para otorgar préstamos de largo plazo a empresas que inviertan en energías renovables, eficiencia energética o economía circular. Este programa permite financiar hasta un 70% del total de la inversión, con plazos de hasta 15 años, y está dirigido principalmente a empresas medianas con ventas inferiores a 600.000 UF (aprox. 24 mill USD). Entre las tipologías elegibles se incluyen explícitamente proyectos de generación renovable con almacenamiento (por ejemplo, parques solares o eólicos de hasta 9 MW con BESS), así como sistemas de almacenamiento autónomos, ya sea mediante baterías eléctricas, almacenamiento térmico u otras tecnologías limpias.

#### 5.4.0.c. Bancos Internacionales

A nivel internacional, organismos multilaterales también han demostrado un fuerte respaldo al desarrollo del almacenamiento energético en Chile. Por ejemplo, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) firmó en febrero de 2025 acuerdos por un total de US\$180 millones con el Gobierno de Chile [\[36\]](#). Entre ellos, se destaca una operación de US\$100 millones destinada a acelerar la transformación económica y el crecimiento resiliente del país, apoyando políticas públicas que reduzcan la contaminación y aumenten la resiliencia de la infraestructura. Adicionalmente, se contempla un préstamo de US\$15 millones para mejorar los sistemas eléctricos en Rapa Nui, integrando energías renovables con almacenamiento, eficiencia hídrica y diversificación de la matriz energética local.

Asimismo, BID Invest (brazo privado del BID) ha cofinanciado importantes proyectos de baterías en conjunto con bancos comerciales, impulsando la infraestructura clave para la transición energética en Chile.

Un caso emblemático es el proyecto BESS del Desierto (200 MW / 800 MWh, con 4 horas de duración), uno de los más grandes de América Latina. Este proyecto recibió en 2024 un financiamiento de US\$289 millones, a través de un sindicato liderado por BNP Paribas y Crédit Agricole. El financiamiento incluye US\$219 millones en préstamos senior y US\$70 millones en otras líneas de crédito [\[37\]](#).

Todo lo anterior demuestra que existe una convergencia entre apoyos estatales, programas financieros locales y financiamiento internacional, lo cual permite viabilizar proyectos de almacenamiento energético innovadores como los sistemas GESS. Estas iniciativas no solo impulsan el desarrollo tecnológico, sino que también contribuyen significativamente a la estabilidad y flexibilidad del sistema eléctrico nacional, facilitando la integración masiva de energías renovables en la matriz energética de Chile.

## 5.5. Conclusiones análisis económico

El análisis económico desarrollado fue uno de los aspectos más desafiantes del proyecto, principalmente debido a la escasez de información disponible sobre la construcción y operación de sistemas GESS. Esto obligó a establecer diversos supuestos basados en estudios previos, tecnologías comparables y literatura académica afín. A pesar de estas limitaciones, se logró construir un marco de evaluación robusto que permitió estimar la viabilidad económica del proyecto.

Uno de los aspectos clave que se destaca es que la rentabilidad de este tipo de soluciones depende fuertemente del contexto regulatorio y del grado de participación que el almacenamiento tiene en el mercado eléctrico. En el caso particular de Chile, el almacenamiento energético aún se encuentra en una etapa incipiente de integración al sistema, no solo como agente de arbitraje (compra y venta de energía), sino también como proveedor de servicios complementarios como inercia, partida en negro y control de demanda. Esto convierte al sistema GESS en una tecnología que no solo entrega energía, sino que además contribuye a la estabilidad y robustez del SEN.

En base al marco comparativo establecido en las Tablas de costos totales (entre Tabla 5.3 y Tabla 5.5), se observa que el sistema GESS presenta una inversión significativamente menor en comparación con su principal alternativa tecnológica, las baterías de ion-litio (BESS). Mientras que el costo total estimado para un sistema BESS de características similares (10 MW y 5 horas de almacenamiento) asciende a aproximadamente 22 millones de USD, el proyecto GESS desarrollado en este estudio alcanza un costo total cercano a los 10 millones de USD. Esta diferencia sugiere una mayor factibilidad económica del sistema GESS frente a la alternativa BESS, al menos en términos de inversión inicial, posicionándolo como una opción competitiva dentro del mercado de almacenamiento energético. Presentando una diferencia estimada de inversión entre ambas tecnologías fue del orden de los USD 12 millones.

Es importante señalar que el ingreso corresponde únicamente a la participación en el mercado spot, por lo que no considera remuneraciones adicionales por otros servicios complementarios que podrían ser relevantes dependiendo de la evolución del sistema eléctrico chileno.

Los indicadores financieros obtenidos son consistentes con una inversión rentable: una TIR del 11,25 % y un VAN de USD 3.245.052, ambos comparados a la tasa de descuento utilizada (8 %). Estos resultados confirman la factibilidad económica del proyecto, al tiempo que evidencian su potencial como una alternativa sólida frente a otras soluciones de almacenamiento.

Respecto al costo nivelado de energía (LCOE), este se estimó en 73,5 USD/MWh, bajo el supuesto razonable de que el sistema no incurre en costos de carga, dada la abundancia de energía renovable en el norte y centro del país. En este contexto, el LCOS se aproxima al LCOE, lo cual resulta altamente competitivo frente a las baterías de litio, cuyo LCOE se encuentra actualmente entre 100 y 150 USD/MWh. Además, el sistema GESS presenta problemas ambientales reducidos, ya que se enfoca en la reutilización de material y terrenos mineros, aportando a la sustentabilidad.

El análisis de sensibilidad mostró que la escalabilidad y competitividad del proyecto dependen en gran medida de tres factores: prolongar la vida útil, disminuir la tasa de descuento y aumentar la energía entregada. Mejorar cualquiera de estas variables permite

reducir significativamente los costos nivelados y mejorar el retorno de inversión.

Finalmente, cabe destacar que, más allá de los retornos económicos, existen condiciones estructurales que favorecen el desarrollo de este tipo de tecnologías en Chile, tales como el acceso a terrenos fiscales, el apoyo de CORFO y la posibilidad de acceder a esquemas de financiamiento mixto. En conjunto, estos elementos refuerzan el potencial del sistema GESS como una solución replicable y escalable en el contexto nacional, con un perfil de riesgo bajo y alta proyección de retorno, siempre que se mantenga una estrategia operativa adecuada y alineada con el comportamiento del mercado eléctrico. En este sentido, el monitoreo continuo de la evolución del sistema eléctrico, la oferta y demanda energética, y los costos marginales serán fundamentales para garantizar el éxito de futuros proyectos GESS en Chile.

# Capítulo 6

## Conclusiones

En primer lugar, es relevante destacar que se cumplieron los objetivos planteados al inicio de este trabajo. El estudio logró desarrollar un análisis técnico y económico de un sistema GESS, considerando como eje central la reutilización de instalaciones e infraestructura minera existente. Esta estrategia permitió evidenciar una reducción significativa en los costos asociados al proyecto, validando así la hipótesis de que el aprovechamiento de recursos ya disponibles en faenas mineras puede mejorar sustancialmente la factibilidad del sistema.

Asimismo, se cumplió con el objetivo de investigar las tecnologías GESS actuales disponibles en el mercado, identificando sus principios de funcionamiento, ventajas operativas y desafíos de implementación. A partir de esta revisión, se establecieron los parámetros fundamentales necesarios para evaluar la viabilidad técnica y económica de un proyecto de este tipo, permitiendo generar un marco metodológico aplicable a futuros estudios de almacenamiento gravitacional en contextos similares.

Por otro lado, el desarrollo de un proyecto GESS se basa en tecnologías ya conocidas como máquinas síncronas y asíncronas, presentando una ventaja significativa debido a su alta flexibilidad operativa. Además, a lo largo del estudio se comprobó que, al seleccionar correctamente variables clave como pendiente, fricción y velocidad, es posible alcanzar altos niveles de rendimiento del sistema. No obstante, estas mismas variables representan también limitaciones técnicas que deben ser abordadas con una mirada multidisciplinaria, incluyendo áreas como ingeniería eléctrica, mecánica, estructural y geotécnica, que en este trabajo no se abordaron pero se sugieren ser consideradas para un desarrollo más completo del proyecto. En este sentido, se establecieron supuestos simplificados que permitieron visualizar una base mínima representativa para analizar la viabilidad general del proyecto.

Los gráficos desarrollados en el análisis técnico evidenciaron que la elección del sitio es un pilar fundamental. En particular, la mina Los Colorados, pese a su escala menor respecto a otras faenas a nivel nacional, se presenta como una referencia viable para una primera implementación. A futuro, el aprovechamiento de minas con mayor desnivel altimétrico podría traducirse en mejoras considerables en eficiencia y reducciones importantes en los costos de inversión.

Por otra parte, el análisis económico requirió recopilar y adaptar información de fuentes académicas y técnicas relacionadas con tecnologías análogas, como las baterías de litio. A partir de estos antecedentes, se establecieron supuestos razonables que permitieron realizar

comparaciones realistas. Se estimó una diferencia de inversión del orden de los USD 10 millones entre ambas tecnologías, proyectando ingresos anuales cercanos a USD 187.828 solo por su participación en el mercado spot. Cabe destacar que este valor no contempla remuneraciones adicionales por servicios auxiliares, que dependerán del marco regulatorio y de la evolución del sistema eléctrico nacional. Los resultados financieros obtenidos, con una TIR del 11,25% y un VAN de USD 3.245.052, superan con holgura los criterios mínimos de rentabilidad, lo que respalda la viabilidad económica del proyecto.

Respecto al costo nivelado de energía (LCOE), este se estimó en 73,5 USD/MWh, considerando que el sistema no incurre en costos por carga gracias a la disponibilidad de excedentes renovables en el norte y centro del país. Este valor se aproxima al LCOS, situando al GESS en una posición altamente competitiva frente a tecnologías como las baterías de litio, cuyo LCOE se estima entre 100 y 150 USD/MWh. Además, el GESS presenta problemáticas asociadas al reciclaje reducidas en comparación con los sistemas BESS, entre los cuales cabe destacar que no existe degradación por uso y vida útil más extensa, reforzando su perfil como alternativa sostenible.

El análisis de sensibilidad reveló que la escalabilidad del proyecto depende en gran medida de tres factores: prolongar la vida útil, disminuir la tasa de descuento y aumentar la energía entregada anualmente. Cualquier mejora en estos parámetros repercute directamente en una mayor rentabilidad y en una reducción significativa de los costos nivelados.

Finalmente, más allá de los retornos financieros, Chile presenta condiciones estructurales altamente favorables para este tipo de tecnología: topografía privilegiada, presencia de faenas mineras en desuso, acceso a terrenos fiscales, apoyo de CORFO y disponibilidad de financiamiento mixto. Estas condiciones no solo reducen costos de inversión, sino que también permiten abordar los vertimientos energéticos, uno de los grandes desafíos de la transición energética. Estudios adicionales orientados al levantamiento de minas abandonadas o zonas cordilleranas aptas para almacenamiento gravitacional podrían ser clave para fortalecer la robustez del sistema eléctrico nacional. En conjunto, estos elementos posicionan al sistema GESS como una solución escalable, replicable y alineada con las necesidades futuras del país, siempre que se mantenga una estrategia técnica y operativa adaptada al comportamiento dinámico del mercado eléctrico chileno.

# Apéndice A

## Códigos

A continuación, se presentan en los apéndices los códigos utilizados para el desarrollo de esta memoria. Por razones de claridad y continuidad en la lectura, se optó por incluirlos en esta sección final.

### A.0.1. Caso base GESS

```
% Parámetros del sistema
m = 100 * 10^3; % Masa en kg (100 toneladas)
h = 600; % Altura en metros
theta = 30; % Ángulo en grados
g = 9.8; % Aceleración gravitacional (m/s^2)
v = 10; % Velocidad del bloque en m/s
Crr = 0.003; % Coeficiente de rodadura (valor asumido)

% Cálculo del largo de la rampa
Largo = 1000; % Uso de sind() para ángulo en grados

% Cálculo del tiempo de ascenso/descenso
t = Largo / v; % Tiempo en segundos para que un bloque descienda

% Cálculo de la fuerza de carga
Fcarga = m * g * (sind(theta) + Crr * cosd(theta));

% Cálculo de la potencia de carga
Pot_carga = Fcarga * v; % Potencia = Fuerza * Velocidad

% Cálculo de la fuerza de descarga
Fdescarga = m * g * (sind(theta) - Crr * cosd(theta));

% Cálculo de la potencia de descarga
Pot_descarga = Fdescarga * v;

% Cálculo de la eficiencia del sistema
Eficiencia = Pot_descarga / Pot_carga;

% Definir el tiempo total de operación (5 horas en segundos)
T_operacion = 5 * 3600; % 5 horas * 3600 segundos/hora
```

Figura A.1: Caption 1

```
% Número de bloques necesarios
N_bloques = T_operacion / t;

% Mostrar resultados
fprintf('Resultados del dimensionamiento del sistema GESS:\n');
fprintf('Largo de la rampa: %.2f m\n', Largo);
fprintf('Tiempo de ascenso/descenso: %.2f s\n', t);
fprintf('Fuerza de carga: %.2f N\n', Fcarga);
fprintf('Potencia requerida para carga: %.2f N (%.2f W)\n', Pot_carga, Pot_carga / 100);
fprintf('Fuerza de descarga: %.2f N\n', Fdescarga);
fprintf('Potencia generada en descarga: %.2f N (%.2f W)\n', Pot_descarga, Pot_descarga / 100);
fprintf('Eficiencia del sistema: %.2f %\n', Eficiencia);
fprintf('Número de bloques requeridos para despacho de 5 horas: %.0f \n', N_bloques);

Resultado del dimensionamiento del sistema GESS:
Largo de la rampa: 1000.00 m
Tiempo de ascenso/descenso: 100.00 s
Fuerza de carga: 402461.15 N
Potencia requerida para carga: 4024611.51 W (4.02 MW)
Fuerza de descarga: 402461.15 N
Potencia generada en descarga: 4024611.51 W (4.02 MW)
Eficiencia del sistema: 0.99
Número de bloques requeridos para despacho de 5 horas: 180
```

Figura A.2: Caption 2

### A.0.2. Aspectos técnicos

```

1 % Parámetros iniciales (constantes)
2 m = 100 * 10^3; % Masa en kg (100 toneladas)
3 g = 9.8; % Aceleración gravitacional (m/s^2)
4 v_init = 10; % Velocidad inicial del bloque en m/s
5 theta_init = 30; % Ángulo inicial en grados
6 Crr_init = 0.0025; % Coeficiente de rodadura inicial
7 Largo_init = 1000; % Largo de rampa inicial
8
9 % Variables a variar (ampliando rango para mejor visualización)
10 Largo_values = [500, 1000, 1500, 2000, 2500]; % Longitud de la rampa en metros
11 Theta_values = [15, 30, 45, 60, 90]; % Ángulos en grados (pendiente)
12 Velocidad_values = [5, 10, 15, 20, 25]; % Velocidad en m/s
13 Crr_values = [0, 0.001, 0.0025, 0.005, 0.01]; % Coeficiente de rodadura
14
15 % Inicialización de matrices para almacenar datos
16 Pot_carga_L = zeros(size(Largo_values));
17 Pot_descarga_L = zeros(size(Largo_values));
18 Eficiencia_L = zeros(size(Largo_values));
19 |
20 Pot_carga_Theta = zeros(size(Theta_values));
21 Pot_descarga_Theta = zeros(size(Theta_values));
22 Eficiencia_Theta = zeros(size(Theta_values));
23
24 Pot_carga_V = zeros(size(Velocidad_values));
25 Pot_descarga_V = zeros(size(Velocidad_values));
26 Eficiencia_V = zeros(size(Velocidad_values));
27
28 Pot_carga_Crr = zeros(size(Crr_values));
29 Pot_descarga_Crr = zeros(size(Crr_values));
30 Eficiencia_Crr = zeros(size(Crr_values));
31
32 %% Variación de Longitud (manteniendo theta, velocidad y fricción constantes)
33 for i = 1:length(Largo_values)
34     t = Largo_values(i) / v_init;
35     Fcarga = m * g * (sind(theta_init) + Crr_init * cosd(theta_init));
36     Pot_carga_L(i) = Fcarga * v_init;
37     Fdescarga = m * g * (sind(theta_init) - Crr_init * cosd(theta_init));
38     Pot_descarga_L(i) = Fdescarga * v_init;
39     Eficiencia_L(i) = Pot_descarga_L(i) / Pot_carga_L(i);
40 end
    
```

Figura A.3: Caption 1

```

41
42 % Gráfico de Potencia vs Longitud
43 figure;
44 plot(Largo_values, Pot_carga_L / 1e6, '-o', 'LineWidth', 2); hold on;
45 plot(Largo_values, Pot_descarga_L / 1e6, '-s', 'LineWidth', 2);
46 xlabel('Longitud de la rampa (m)');
47 ylabel('Potencia (W)');
48 title('Variación de la Potencia con la Longitud de la Rampa');
49 legend('Carga', 'Descarga');
50 grid on;
51
52 % Gráfico de Eficiencia vs Longitud
53 figure;
54 plot(Largo_values, Eficiencia_L, '-d', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 4);
55 xlabel('Longitud de la rampa (m)');
56 ylabel('Eficiencia');
57 title('Variación de la Eficiencia con la Longitud de la Rampa');
58 grid on;
59
60 %% Variación de Pendiente (Ángulo Theta)
61 for i = 1:length(Theta_values)
62     Fcarga = m * g * (sind(Theta_values(i)) + Crr_init * cosd(Theta_values(i)));
63     Pot_carga_Theta(i) = Fcarga * v_init;
64     Fdescarga = m * g * (sind(Theta_values(i)) - Crr_init * cosd(Theta_values(i)));
65     Pot_descarga_Theta(i) = Fdescarga * v_init;
66     Eficiencia_Theta(i) = Pot_descarga_Theta(i) / Pot_carga_Theta(i);
67 end
68
69 % Gráfico de Potencia vs Pendiente
70 figure;
71 plot(Theta_values, Pot_carga_Theta / 1e6, '-o', 'LineWidth', 2); hold on;
72 plot(Theta_values, Pot_descarga_Theta / 1e6, '-s', 'LineWidth', 2);
73 xlabel('Pendiente (°)'); 'FontSize', 18);
74 ylabel('Potencia (W)'); 'FontSize', 18);
75 title('Variación de la Potencia con la Pendiente'); 'FontSize', 19);
76 legend('Carga', 'Descarga'); 'FontSize', 14);
77 grid on;
78 set(gca, 'FontSize', 14); % Cambia el tamaño de los números en los ejes
79
80 % Gráfico de Eficiencia vs Pendiente
81 figure;
    
```

Figura A.4: Caption 2

```

80 % Gráfico de Eficiencia vs Pendiente
81 figure;
82 plot(Theta_values, Eficiencia_Theta, '-d', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 2);
83 xlabel('Pendiente (°)'); 'FontSize', 18);
84 ylabel('Eficiencia'); 'FontSize', 18);
85 title('Variación de la Eficiencia con la Pendiente'); 'FontSize', 19);
86 grid on;
87 set(gca, 'FontSize', 14); % Cambia tamaño de números en ejes
88
89 %% Variación de Velocidad (manteniendo longitud, pendiente y fricción constantes)
90 for i = 1:length(Velocidad_values)
91     Fcarga = m * g * (sind(theta_init) + Crr_init * cosd(theta_init));
92     Pot_carga_V(i) = Fcarga * Velocidad_values(i);
93     Fdescarga = m * g * (sind(theta_init) - Crr_init * cosd(theta_init));
94     Pot_descarga_V(i) = Fdescarga * Velocidad_values(i);
95     Eficiencia_V(i) = Pot_descarga_V(i) / Pot_carga_V(i);
96 end
97
98 % Gráfico de Potencia vs Velocidad
99 figure;
100 plot(Velocidad_values, Pot_carga_V / 1e6, '-o', 'LineWidth', 2); hold on;
101 plot(Velocidad_values, Pot_descarga_V / 1e6, '-s', 'LineWidth', 2);
102 xlabel('Velocidad (m/s)'); 'FontSize', 18);
103 ylabel('Potencia (W)'); 'FontSize', 18);
104 title('Variación de la Potencia con la Velocidad'); 'FontSize', 19);
105 grid on;
106
107 % Gráfico de Eficiencia vs Velocidad
108 figure;
109 plot(Velocidad_values, Eficiencia_V, '-d', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 7);
110 xlabel('Velocidad (m/s)'); 'FontSize', 18);
111 ylabel('Eficiencia'); 'FontSize', 18);
112 title('Variación de la Eficiencia con la Velocidad'); 'FontSize', 20);
113 grid on;
114
115
    
```

Figura A.5: Caption 3

```

114 %% Variación de Fricción (Coeficiente de Rodadura)
115 for i = 1:length(Crr_values)
116     Fcarga = m * g * (sind(theta_init) + Crr_values(i) * cosd(theta_init));
117     Pot_carga_Crr(i) = Fcarga * v_init;
118     Fdescarga = m * g * (sind(theta_init) - Crr_values(i) * cosd(theta_init));
119     Pot_descarga_Crr(i) = Fdescarga * v_init;
120     Eficiencia_Crr(i) = Pot_descarga_Crr(i) / Pot_carga_Crr(i);
121 end
122
123 % Gráfico de Potencia vs Fricción
124 figure;
125 plot(Crr_values, Pot_carga_Crr / 1e6, '-o', 'LineWidth', 2); hold on;
126 plot(Crr_values, Pot_descarga_Crr / 1e6, '-s', 'LineWidth', 2);
127 xlabel('Coeficiente de Rodadura (Crr)'); 'FontSize', 18);
128 ylabel('Potencia (W)'); 'FontSize', 18);
129 title('Variación de la Potencia con la Fricción'); 'FontSize', 19);
130 legend('Carga', 'Descarga'); 'FontSize', 14, 'Location', 'best');
131 grid on;
132 set(gca, 'FontSize', 14);
133
134 % Gráfico de Eficiencia vs Fricción
135 figure;
136 plot(Crr_values, Eficiencia_Crr, '-d', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 6);
137 xlabel('Coeficiente de Rodadura (Crr)'); 'FontSize', 18);
138 ylabel('Eficiencia'); 'FontSize', 18);
139 title('Variación de la Eficiencia con la Fricción'); 'FontSize', 19);
140 grid on;
141 set(gca, 'FontSize', 14);
142
143
144
145
    
```

Figura A.6: Caption 4

## A.0.3. Cables

```

1 % Parámetros del cable
2 sigma_r = 896e6; % Resistencia a la tracción en Pa (896 MPa)
3 rho_r = 4706; % Densidad del cable en kg/m³
4 F_cable = 122.6e3; % Fuerza total por cable en N
5
6 % Rango de longitudes de cable (100 a 2000 metros)
7 longitudes = linspace(100, 2000, 100);
8
9 % Rango de número de cables a considerar (de 2 a 10)
10 num_cables_range = 2:10;
11
12 % Inicialización de variables
13 A_r_values = zeros(size(longitudes));
14 m_r_values = zeros(size(longitudes));
15 A_r_matrix = zeros(length(num_cables_range), length(longitudes));
16
17 % Cálculo iterativo del área de la sección transversal considerando peso propio
18 for i = 1:length(longitudes)
19     l = longitudes(i);
20     A_r = F_cable / sigma_r; % Estimación inicial
21
22     for j = 1:10 % Iteración para convergencia
23         m_r = A_r * l * rho_r; % Masa del cable
24         F_total = F_cable + (m_r * 9.81); % Fuerza total con peso propio
25         A_r = F_total / sigma_r; % Nueva estimación del área
26     end
27
28     A_r_values(i) = A_r * 1e6; % Convertir a mm²
29     m_r_values(i) = m_r * 9.81; % Peso en N
30 end
31
32 % Cálculo del área en función del número de cables
33 for k = 1:length(num_cables_range)
34     num_cables = num_cables_range(k);
35     for i = 1:length(longitudes)
36         l = longitudes(i);
37         A_r = (F_cable / num_cables) / sigma_r;
38     end
39     for j = 1:10

```

Figura A.7: Caption 1

```

39         for j = 1:10
40             m_r = A_r * l * rho_r;
41             F_total = (F_cable / num_cables) + (m_r * 9.81);
42             A_r = F_total / sigma_r;
43         end
44
45         A_r_matrix(k, i) = A_r * 1e6; % Convertir a mm²
46     end
47 end
48
49 % Gráfico 1: Área de la sección transversal vs. Longitud del cable
50 figure;
51 plot(longitudes, A_r_values, 'b', 'LineWidth', 2);
52 xlabel('Longitud del cable (m)', 'FontSize', 18);
53 ylabel('Área de la sección (mm²)', 'FontSize', 18);
54 title('Área de la Sección Transversal vs. Longitud del Cable', 'FontSize', 19);
55 grid on;
56 set(gca, 'FontSize', 14);
57
58 % Gráfico 2: Peso del cable vs. Longitud del cable
59 figure;
60 plot(longitudes, m_r_values, 'r', 'LineWidth', 2);
61 xlabel('Longitud del cable (m)', 'FontSize', 18);
62 ylabel('Peso del cable (N)', 'FontSize', 18);
63 title('Peso del Cable vs. Longitud del Cable', 'FontSize', 19);
64 grid on;
65 set(gca, 'FontSize', 14);
66
67 % Gráfico 3: Área de la sección vs. Longitud para diferentes números de cables
68 figure;
69 hold on;
70 colors = jet(length(num_cables_range)); % Colores variados para cada curva
71
72 for k = 1:length(num_cables_range)
73     plot(longitudes, A_r_matrix(k, :), 'Color', colors(k, :), 'LineWidth', 2);
74 end
75
76
77
78
79

```

Figura A.8: Caption 2

```

78 xlabel('Longitud del cable (m)', 'FontSize', 18);
79 ylabel('Área de la sección por cable (mm²)', 'FontSize', 18);
80 title('Área de la Sección vs. Longitud para Diferentes Números de Cables', 'FontSize', 19);
81
82 legend(arrayfun(@(x) sprintf('%d cables', x), num_cables_range, 'UniformOutput', false), ...
83         'FontSize', 11, 'Location', 'best');
84
85 grid on;
86 set(gca, 'FontSize', 14);
87 hold off;
88
89 % Gráfico 4: Peso total del sistema de cables vs. Número de cables
90 longitudes_especificas = [200, 500, 1000, 1500, 2000];
91 peso_total_cables = zeros(length(num_cables_range), length(longitudes_especificas));
92
93 for k = 1:length(num_cables_range)
94     num_cables = num_cables_range(k);
95     for j = 1:length(longitudes_especificas)
96         l = longitudes_especificas(j);
97         A_r = (F_cable / num_cables) / sigma_r;
98
99         for i = 1:10
100             m_r = A_r * l * rho_r;
101             F_total = (F_cable / num_cables) + (m_r * 9.81);
102             A_r = F_total / sigma_r;
103         end
104
105         peso_total_cables(k, j) = m_r * 9.81 * num_cables; % Peso total de los cables
106     end
107 end
108
109 % Gráfico del peso total en función del número de cables para varias longitudes
110 figure;
111 hold on;
112 colors = jet(length(longitudes_especificas)); % Colores para cada curva
113
114 for j = 1:length(longitudes_especificas)
115     plot(num_cables_range, peso_total_cables(:, j), 'o-', ...
116         'Color', colors(j, :), 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 6);
117

```

Figura A.9: Caption 3

```

115
116 for j = 1:length(longitudes_especificas)
117     plot(num_cables_range, peso_total_cables(:, j), 'o-', ...
118         'Color', colors(j, :), 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 6);
119 end
120
121 xlabel('Número de cables', 'FontSize', 18);
122 ylabel('Peso total del sistema de cables (N)', 'FontSize', 18);
123 title('Peso Total del Sistema de Cables vs. Número de Cables', 'FontSize', 19);
124
125 legend(arrayfun(@(x) sprintf('Longitud %d m', x), longitudes_especificas, 'UniformOutput', false), ...
126         'FontSize', 11, 'Location', 'best');
127
128 grid on;
129 set(gca, 'FontSize', 14);
130 hold off;
131

```

Figura A.10: Caption 4

### A.0.4. LCOE

```

1  clc;
2  clear;
3
4  % -----
5  % Parámetros del proyecto
6  % -----
7  inversion_inicial = 9653600; % USD
8  ingreso_anual=1188629.39 ;
9
10 costo_OandM_anual = 482680; % USD por año
11 energia_entregada_anual = 18250; % MWh/año
12 tasa_descuento_anual = 0.08; % Tasa base (puedes cambiarla)
13 anos = 30; % Horizonte de evaluación principal
14 porcentaje_costo_carga = 3; % % del CAPEX como costo de carga
15
16 % -----
17 % Cálculo del VAN y TIR
18 % -----
19 flujo_caja = [-inversion_inicial, repmat(ingreso_anual, 1, anos)];
20 VAN = sum(flujo_caja ./ (1 + tasa_descuento_anual).^(0:anos));
21 TIR = irr(flujo_caja);
22
23 % -----
24 % Cálculo del PVA (Presente Valor de Anualidades)
25 PVA = sum(1 ./ (1 + tasa_descuento_anual).^(1:anos))
26
27 % -----
28 % Cálculo del LCOE
29 Costo_OM_ACTUALIZADO=costo_OandM_anual * PVA
30 costo_total_actualizado = inversion_inicial + costo_OandM_anual * PVA
31 energia_total_actualizada = energia_entregada_anual * PVA
32 LCOE = costo_total_actualizado / energia_total_actualizada
33
34
35 % Cálculo del LCOS
36 costo_carga_anual = (porcentaje_costo_carga / 100) * inversion_inicial
37 costo_operacional_total = costo_OandM_anual + costo_carga_anual
38 costos_operacionales_actualizados = costo_operacional_total * PVA
39 numerador_LCOS = inversion_inicial + costos_operacionales_actualizados
40
41 % Cálculo del LCOE
42 costo_carga_anual = (porcentaje_costo_carga / 100) * inversion_inicial
43 costo_operacional_total = costo_OandM_anual + costo_carga_anual
44 costos_operacionales_actualizados = costo_operacional_total * PVA
45 numerador_LCOS = inversion_inicial + costos_operacionales_actualizados
46 LCOS = numerador_LCOS / energia_total_actualizada
47
48 % Mostrar resultados
49 fprintf('\n----- RESULTADOS DEL PROYECTO -----\n');
50 fprintf('VAN (Valor Actual Neto): %.2f millones USD\n', VAN / 1e6);
51 fprintf('TIR (Tasa Interna de Retorno): %.2f%%\n', TIR * 100);
52 fprintf('LCOE (Costo Nivelado de Energía): %.2f USD/MWh\n', LCOE);
53 fprintf('LCOS (Costo Nivelado de Almacenamiento): %.2f USD/MWh ...
54 '(Carga = %.2f%% de CAPEX)\n', LCOS, porcentaje_costo_carga);
55
56 % -----
57 % GRÁFICO 1: LCOE vs vida útil del proyecto
58 % -----
59 horizonte = 1:50;
60 LCOE_vs_anios = zeros(size(horizonte));
61
62 for i = 1:length(horizonte)
63     n = horizonte(i);
64     PVA_temp = sum(1 ./ (1 + tasa_descuento_anual).^(1:n));
65     costo_total_temp = inversion_inicial + costo_OandM_anual * PVA_temp;
66     energia_total_temp = energia_entregada_anual * PVA_temp;
67     LCOE_vs_anios(i) = costo_total_temp / energia_total_temp;
68 end
69
70 figure;
71 plot(horizonte, LCOE_vs_anios, 'b-', 'LineWidth', 2);
72 xlabel('Vida útil del proyecto (años)', 'FontSize', 18);
73 ylabel('LCOE [USD/MWh]', 'FontSize', 18);
74 title('LCOE en función de la vida útil del proyecto', 'FontSize', 19);
75 grid on;
76 set(gca, 'FontSize', 14);
77
78 % -----
79 % GRÁFICO 2: LCOE vs tasa de descuento (5% a 15%)
80 % -----
81 tasas = 0.05:0.01:0.15;
82 LCOE_vs_tasa = zeros(size(tasas));
83
84 for i = 1:length(tasas)
85     r = tasas(i);
86     PVA_r = sum(1 ./ (1 + r).^(1:anos));
87     costo_total_r = inversion_inicial + costo_OandM_anual * PVA_r;
88     energia_total_r = energia_entregada_anual * PVA_r;
89     LCOE_vs_tasa(i) = costo_total_r / energia_total_r;
90 end
91
92 figure;
93 plot(tasas * 100, LCOE_vs_tasa, 'r-', 'LineWidth', 2);
94 xlabel('Tasa de descuento (%)', 'FontSize', 18);
95 ylabel('LCOE [USD/MWh]', 'FontSize', 18);
96 title('LCOE en función de la tasa de descuento', 'FontSize', 19);
97 grid on;
98 set(gca, 'FontSize', 14);
99
100 % GRÁFICO 3: LCOE vs energía entregada (multiplicadores)
101 multiplicadores = linspace(0.15, 6, 100); % Más suave y hasta 6
102 LCOE_vs_energia = zeros(size(multiplicadores));
103
104 for i = 1:length(multiplicadores)
105     E_mod = energia_entregada_anual * multiplicadores(i);
106     energia_mod = E_mod * PVA;
107     LCOE_vs_energia(i) = costo_total_actualizado / energia_mod;
108 end
109
110 figure;
111 plot(multiplicadores, LCOE_vs_energia, 'g-', 'LineWidth', 2);
112 xlabel('Multiplicador de energía entregada anual (50 MWh)', 'FontSize', 18);
113 ylabel('LCOE [USD/MWh]', 'FontSize', 18);
114 title('LCOE en función de la energía entregada', 'FontSize', 19);
115 grid on;
116 set(gca, 'FontSize', 14);
117

```

Figura A.11: Caption 1.

Figura A.12: Caption 2.

```

73 % -----
74 % GRÁFICO 2: LCOE vs tasa de descuento (5% a 15%)
75 % -----
76 tasas = 0.05:0.01:0.15;
77 LCOE_vs_tasa = zeros(size(tasas));
78
79 for i = 1:length(tasas)
80     r = tasas(i);
81     PVA_r = sum(1 ./ (1 + r).^(1:anos));
82     costo_total_r = inversion_inicial + costo_OandM_anual * PVA_r;
83     energia_total_r = energia_entregada_anual * PVA_r;
84     LCOE_vs_tasa(i) = costo_total_r / energia_total_r;
85 end
86
87 figure;
88 plot(tasas * 100, LCOE_vs_tasa, 'r-', 'LineWidth', 2);
89 xlabel('Tasa de descuento (%)', 'FontSize', 18);
90 ylabel('LCOE [USD/MWh]', 'FontSize', 18);
91 title('LCOE en función de la tasa de descuento', 'FontSize', 19);
92 grid on;
93 set(gca, 'FontSize', 14);
94
95
96 % GRÁFICO 3: LCOE vs energía entregada (multiplicadores)
97 multiplicadores = linspace(0.15, 6, 100); % Más suave y hasta 6
98 LCOE_vs_energia = zeros(size(multiplicadores));
99
100 for i = 1:length(multiplicadores)
101     E_mod = energia_entregada_anual * multiplicadores(i);
102     energia_mod = E_mod * PVA;
103     LCOE_vs_energia(i) = costo_total_actualizado / energia_mod;
104 end
105
106 figure;
107 plot(multiplicadores, LCOE_vs_energia, 'g-', 'LineWidth', 2);
108 xlabel('Multiplicador de energía entregada anual (50 MWh)', 'FontSize', 18);
109 ylabel('LCOE [USD/MWh]', 'FontSize', 18);
110 title('LCOE en función de la energía entregada', 'FontSize', 19);
111 grid on;
112 set(gca, 'FontSize', 14);
113

```

Figura A.13: Caption 3.

### A.0.5. VAN, TIR e ingresos

```

167 clc;
168 clear all;
169
170 % -----
171 % PARÁMETROS CASO AÑO V2
172 % -----
173 Energia_objetivo = 50*0.88; % MWh diarios
174
175 % -----
176 % CARGA DE DATOS DESDE EXCEL
177 % -----
178 filename = 'RETOS HORARIOS_ANUALES_COLORADO.xlsx';
179 T = readtable(filename, 'Sheet', 'amCharts', 'PreserveVariableNames', true);
180
181 % Convertir fecha y extraer columnas necesarias
182 Hora = datetime(T(:,1));
183 Demanda = T(:,4); % MWh
184 ValoresUSD = T(:,5); % USD
185
186 % -----
187 % DETECTAR DÍAS ÚNICOS
188 % -----
189 dias_unicos = unique(dateshift(Hora, 'start', 'day'));
190
191 % Inicializar acumulador
192 ingreso_total_anual = 0;
193 ingresos_por_dia = zeros(length(dias_unicos),1);
194 dias_con_ingresos = 0;
195
196 % -----
197 % RECORRER CADA DÍA
198 % -----
199 for d = 1:length(dias_unicos)
200     dia = dias_unicos(d);
201     idx = (Hora >= dia) & (Hora < dia + days(1));
202
203     % Extraer datos del día
204     H_dia = Hora(idx);
205     D_dia = Demanda(idx);

```

Figura A.14: Caption 1.

```

203 % Extraer datos del día
204 H_dia = Hora(idx);
205 D_dia = Demanda(idx);
206 USD_dia = ValoresUSD(idx);
207
208 % Construir tabla diaria
209 T_dia = table(H_dia, D_dia, USD_dia, ...
210     'VariableNames', {'Hora', 'Demanda', 'ValorUSD'});
211
212 % Ordenar por ingreso mayor
213 T_dia = sortrows(T_dia, 'ValorUSD', 'descend');
214
215 % Simulación de despacho diario
216 energia_desp = 0;
217 ingreso_total = 0;
218 i = 1;
219
220 while energia_desp < Energia_objetivo && i <= height(T_dia)
221     energia_disp = T_dia.Demanda(i);
222     energia_necesaria = Energia_objetivo - energia_desp;
223
224     if energia_disp <= energia_necesaria
225         energia_desp = energia_desp + energia_disp;
226         ingreso_total = ingreso_total + T_dia.ValorUSD(i);
227     else
228         fraccion = energia_necesaria / energia_disp;
229         energia_desp = energia_desp + energia_necesaria;
230         ingreso_total = ingreso_total + T_dia.ValorUSD(i) * fraccion;
231     end
232     i = i + 1;
233 end
234
235 % Acumular solo si hubo despacho exitoso
236 if ingreso_total > 0
237     ingreso_total_anual = ingreso_total_anual + ingreso_total;
238     ingresos_por_dia(d) = ingreso_total;
239     dias_con_ingresos = dias_con_ingresos + 1;
240 end
241
242 end

```

Figura A.15: Caption 2.

```

242 % -----
243 % COSTO OPERATIVO Y NETO
244 % -----
245 Ingreso_netto_anual = ingreso_total_anual;
246 costo_op=75*44*306
247 % -----
248 % RESULTADOS
249 % -----
250
251 fprintf('🔥 Ingreso anual : %2f USD\n', Ingreso_netto_anual);
252 Ingreso_netto=Ingreso_netto_anual-costo_op
253 % -----
254 % PARÁMETROS ECONÓMICOS
255 % -----
256 vida_util = 30; % años de operación
257 tasa_descuento_anual = 0.08; % tasa de descuento (8%)
258 inversion_inicial = 10136200; % inversión inicial en USD
259
260 % Flujos de caja: inversión inicial negativa + 30 años de ingreso neto
261 flujo_caja = [-inversion_inicial, repmat(Ingreso_netto_anual, 1, vida_util)];
262
263 % VAN (Valor Actual Neto)
264 VAN = sum(flujo_caja ./ (1 + tasa_descuento_anual).^(0:vida_util));
265
266 % TIR (Tasa Interna de Retorno)
267 TIR = irr(flujo_caja);
268
269 % PVA (Presente Valor de Anualidades)
270 PVA = sum(1 ./ (1 + tasa_descuento_anual).^(1:vida_util));
271
272 % -----
273 % RESULTADOS ECONÓMICOS
274 % -----
275 fprintf('\n📊 Evaluación Económica del Proyecto GESS\n');
276 fprintf('🔥 VAN (Valor Actual Neto): %2f USD\n', VAN);
277 fprintf('🔥 TIR (Tasa Interna de Retorno): %2f %\n', TIR * 100);
278 fprintf('🔥 PVA (Valor Presente Anual): %2f\n', PVA);
279
280

```

Figura A.16: Caption 3.

```

278 fprintf('🔥 TIR (Tasa Interna de Retorno): %2f %\n', TIR * 100);
279 fprintf('🔥 PVA (Valor Presente Anual): %2f\n', PVA);
280
281 % -----
282 % ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: TIR vs Energía Objetivo
283 % -----
284 energias_objetivo = 10:2:100; % desde 10 hasta 100 MWh diarios
285 TIRs = zeros(size(energias_objetivo));
286
287 for k = 1:length(energias_objetivo)
288     energia_dia = energias_objetivo(k);
289     ingreso_total_anual = 0;
290
291     for d = 1:length(dias_unicos)
292         dia = dias_unicos(d);
293         idx = (Hora >= dia) & (Hora < dia + days(1));
294         H_dia = Hora(idx);
295         D_dia = Demanda(idx);
296         USD_dia = ValoresUSD(idx);
297
298         T_dia = table(H_dia, D_dia, USD_dia, ...
299             'VariableNames', {'Hora', 'Demanda', 'ValorUSD'});
300         T_dia = sortrows(T_dia, 'ValorUSD', 'descend');
301
302         energia_desp = 0;
303         ingreso_total = 0;
304         i = 1;
305
306         while energia_desp < energia_dia && i <= height(T_dia)
307             energia_disp = T_dia.Demanda(i);
308             energia_necesaria = energia_dia - energia_desp;
309
310             if energia_disp <= energia_necesaria
311                 energia_desp = energia_desp + energia_disp;
312                 ingreso_total = ingreso_total + T_dia.ValorUSD(i);
313             else
314                 fraccion = energia_necesaria / energia_disp;
315                 energia_desp = energia_desp + energia_necesaria;
316                 ingreso_total = ingreso_total + T_dia.ValorUSD(i) * fraccion;
317             end
318             i = i + 1;
319         end
320     end
321
322     TIRs(k) = irr([inversion_inicial, repmat(ingreso_total_anual, 1, vida_util)]);
323 end

```

Figura A.17: Caption 4.

```
310         if energia_disp <= energia_necesaria
311             energia_desp = energia_desp + energia_disp;
312             ingreso_total = ingreso_total + T_dia.ValorUSD(i);
313         else
314             fraccion = energia_necesaria / energia_disp;
315             energia_desp = energia_desp + energia_necesaria;
316             ingreso_total = ingreso_total + T_dia.ValorUSD(i) * fraccion;
317         end
318         i = i + 1;
319     end
320
321     if ingreso_total > 0
322         ingreso_total_anual = ingreso_total_anual + ingreso_total;
323     end
324 end
325
326 % Flujo de caja para este nivel de energía
327 flujo_caja = [-inversion_inicial, repmat(ingreso_total_anual, 1, vida_util)];
328 TIRs(k) = irr(flujo_caja);
329 end
330
331 % -----
332 % GRAFICAR TIR vs Energía Objetivo
333 % -----
334 figure;
335 plot(energias_objetivo, TIRs * 100, 'b', 'LineWidth', 2);
336 grid on;
337 xlabel('Energía Objetivo Diaria (MWh)', 'FontSize', 18);
338 ylabel('TIR (%)', 'FontSize', 18);
339 title('TIR vs Energía Objetivo Diaria (MWh)', 'FontSize', 19);
340 set(gca, 'FontSize', 14);
341
342
343
```

Figura A.18: Caption 5.

# Bibliografía

- [1] Comisión Chilena del Cobre (Cochilco). El mercado de litio: Desarrollo reciente y proyecciones al 2035 - actualización a mayo 2023. *Ministerio de Minería, Gobierno de Chile*, 2023.
- [2] Dimitrios Vlahopoulos and Aggelos S. Bouhouras. Performance evaluation of electrical energy storage systems focused on gravity storage technology. In *2022 2nd International Conference on Energy Transition in the Mediterranean Area (SYNERGY MED)*. IEEE, 2022. Disponible en línea: <https://doi.org/10.1109/SyNERGYMED55767.2022.9941454>.
- [3] C.D. Botha, M.J. Kamper, and R.-J. Wang. Design optimisation and cost analysis of linear vernier electric machine-based gravity energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, 44, 2021. Disponible en línea: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103397>.
- [4] Gravitricity Ltd. Gravitricity technology – gravistore. 2025. Disponible en línea: <https://gravitricity.com/gravistore/>.
- [5] Energy Vault Inc. Energy vault – transforming sustainability through gravity energy storage, 2025. Disponible en línea: <https://www.energyvault.com/photo-gallery>.
- [6] Loz Blain. Ares: A new train-based energy storage system. *New Atlas*, 2013. Disponible en línea: <https://newatlas.com/ares-rail-energy-storage/28395/>.
- [7] Rodrigo Palma Behnke, Guillermo Jiménez Estévez, and Ignacio Alarcón Arias. Las energías renovables no convencionales en el mercado eléctrico chileno. *Comisión Nacional de Energía (CNE) y Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH*, 2009. Disponible en línea: <https://www.cne.cl>.
- [8] Ministerio de Energía de Chile. Consolidado y respuesta: Proceso de consulta ciudadana del reglamento de transferencias de potencia entre empresas generadoras. *Ministerio de Energía*, 2023. Disponible en línea: <https://www.energia.gob.cl/mini-sitio/reglamentos>.
- [9] Portal Minero. Compañía minera del pacífico destina us\$343 millones para proyecto de continuidad operacional de mina los colorados. *Portal Minero*, 2024. Disponible en línea: <https://www.portalminero.com/wp/compania-minera-del-pacifico-destina-us343-millones-para-proyecto-de-continuidad-operacional-de-mina-los-colorados/>.

- [10] Coordinador Eléctrico Nacional. Operación real del sistema eléctrico, 2025. Disponible en línea: <https://www.coordinador.cl/operacion/graficos/operacion-real/>.
- [11] Wikipedia. Resistencia a la rodadura, 2025. Disponible en línea: [https://es.wikipedia.org/wiki/Resistencia\\_a\\_la\\_rodadura](https://es.wikipedia.org/wiki/Resistencia_a_la_rodadura).
- [12] Google Earth. Ubicación de mina los colorados, 2025. Disponible en línea: [https://earth.google.com/web/search/mina+los+colorados/@-28.3107398,-70.8160467,541.57144676a,733.46369447d,35y,0h,0t,0r/data=CoEBG1MSTQo1MHg5Njk3MTMzNWYyZTNkZDc50jB4OTRhNmVjMjM1NTU4NzRkYRnKkL6k\jE88wCGPIPAbOrRRwCoSbWluYSBsb3MgY29sb3JhZG9zGAIgASImCiQJ08J16ApKPMAR4Z\8uSVdNPMAZv1n5WKWYUcAhC\\_5Ce5WOUcBCAggB0gMKATBCAggASgOI\\_\\_\\_\\_\\_ \\_ARAA](https://earth.google.com/web/search/mina+los+colorados/@-28.3107398,-70.8160467,541.57144676a,733.46369447d,35y,0h,0t,0r/data=CoEBG1MSTQo1MHg5Njk3MTMzNWYyZTNkZDc50jB4OTRhNmVjMjM1NTU4NzRkYRnKkL6k\jE88wCGPIPAbOrRRwCoSbWluYSBsb3MgY29sb3JhZG9zGAIgASImCiQJ08J16ApKPMAR4Z\8uSVdNPMAZv1n5WKWYUcAhC_5Ce5WOUcBCAggB0gMKATBCAggASgOI_____ _ARAA).
- [13] Inodú SpA. Estudio de determinación de costos por tecnología de generación: Informe cuarta emisión - licitación n° 610-4-le19. Technical report, Comisión Nacional de Energía (CNE), 2019. Disponible en línea: <https://www.cne.cl>.
- [14] Ministerio de Energía de Chile. Plan de descarbonización - 2<sup>o</sup> tiempo de la transición energética. *Ministerio de Energía*, 2024. Disponible en línea: <https://energia.gob.cl/panel/plan-de-descarbonizacion>.
- [15] Comisión Chilena del Cobre (Cochilco). Informe de costos de tecnologías de generación: Ictg 2020. *Cochilco*, 2020.
- [16] Comisión Chilena del Cobre (Cochilco). Informe de costos de tecnologías de generación: Ictg 2024. *Cochilco*, 2024.
- [17] Generadoras de Chile. Documentos y boletines, 2024. Disponible en línea: <https://generadoras.cl/documentos/boletines>.
- [18] J. Pizzoleo. Cochilco: Superávit del litio se mantendrá en 2024 y 2025. *Reporte Minero*, 2024. Disponible en línea: <https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2024/08/superavit-litio-mantendra-2024-2025>.
- [19] C. Recabarren Ortiz. Chile recicla solo un 5% de 80 millones de baterías de litio. *Revista Minera*, 2024. Disponible en línea: <https://revistaminera.cl/mineria/chile-recicla-solo-un-5-de-80-millones-de-baterias-de-litio/>.
- [20] Aaron Fyke. The fall and rise of gravity storage technologies. *Joule*, 3, 2019. Disponible en línea: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.01.012>.
- [21] A. Berrada, K. Loudiyi, and I. Zorkani. System design and economic performance of gravity energy storage. *Journal of Cleaner Production*, 156, 2017.
- [22] Qian Wang, Yujie Li, Qian Zhang, Dong He, and Dongmei Wang. Fast voltage regulation and grid connection method for generator-motor of vertical gravity energy storage systems, 2023. Disponible en línea: <https://doi.org/10.1109/CESPE60923.2023.00017>.
- [23] Wenxuan Tong, Zhengang Lu, Minxiao Han, Haisen Zhao, Guizhi Xu, Guoliang Zhao, and Julian David Hunt. Inertial characteristics of gravity energy storage systems. In *2023 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*.

- IEEE, 2023. Disponible en línea: <https://doi.org/10.1109/APPEEC57400.2023.10561970>.
- [24] Thomas Morstyn, Martin Chilcott, and Malcolm D. McCulloch. Gravity energy storage with suspended weights for abandoned mine shafts. *Applied Energy*, 239, 2019. Disponible en línea: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.226>.
- [25] Zhen Li, Xuepeng Mou, Zilin Hao, Yongqing Zhu, Linlin Dong, Jianwang Gao, Bin Wang, Tian Gao, and Zufan Wang. Analysis of influencing factors of energy efficiency of slope gravity energy storage system. In *26th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. IEEE, 2023. Disponible en línea: <https://doi.org/10.1109/ICEMS59686.2023.10344839>.
- [26] Laya M.A. Al-Hilfi, Stella Morris, A Peer Fathima, and Morris Ezra. Investigation of potential benefits and challenges of using gravity energy storage in residential sectors. In *2022 International Virtual Conference on Power Engineering Computing and Control (PECCON)*. IEEE, 2022. Disponible en línea: <https://doi.org/10.1109/PECCON55017.2022.9851072>.
- [27] C.D. Botha and M.J. Kamper. Capability study of dry gravity energy storage. *Journal of Energy Storage*, 23, 2019. Disponible en línea: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.03.015>.
- [28] Gobierno de Chile. Ley n° 20.936: Establece un nuevo sistema de transmisión eléctrica y crea un organismo coordinador independiente del sistema eléctrico nacional. *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*, 2016. Disponible en línea: <https://bcn.cl/3gqia>.
- [29] Gobierno de Chile. Decreto supremo n° 125: Aprueba reglamento de coordinación y operación del sistema eléctrico nacional. *Diario Oficial de la República de Chile*, 2017. Disponible en línea: <https://www.diariooficial.cl>.
- [30] Gobierno de Chile. Ley n° 21.505: Promueve el almacenamiento de energía eléctrica y la electromovilidad. *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*, 2022. Disponible en línea: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=118457&f=2022-11-21>.
- [31] Yusuf Kaya and Ibrahim Dincer. Gravity energy storage technologies: A review of the solid gravity. *Journal of Energy Storage*, 47, 2022. Disponible en línea: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.103640>.
- [32] C.D. Botha, M.J. Kamper, and R.-J. Wang. Design optimisation and cost analysis of linear vernier electric machine-based gravity energy storage systems, 2021. Disponible en línea: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103397>.
- [33] Qinggan Yang, Qinjie Liu, Qiang Fu, Ke Yang, Man Zhang, and Qiang Chen. Smart microgrid construction in abandoned mines based on gravity energy storage. *Heliyon*, 9, 2023. Disponible en línea: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21481>.
- [34] Ministerio de Bienes Nacionales. Plan nacional para impulsar sistemas de almacenamiento de energía en terrenos fiscales. *Ministerio de Bienes Nacionales*, 2024. Disponible en línea: <https://www.bienesnacionales.cl/46367-2/>.

- [35] CORFO. Programa crédito verde. *CORFO*, 2024. Disponible en línea: [https://www.corfo.cl/sites/cpp/movil/programa\\_credito\\_verde](https://www.corfo.cl/sites/cpp/movil/programa_credito_verde).
- [36] Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Bid y Chile firman acuerdos por us\$180 millones durante las reuniones anuales del bid y bid invest. *Banco Interamericano de Desarrollo*, 2024. Disponible en línea: <https://www.iadb.org/es/noticias/bid-y-chile-firman-acuerdos-por-us180-millones-durante-las-reuniones-anuales-del-bid-y-bid>.
- [37] Guía Chile Energía. Atlas renewable energy cierra financiamiento por us\$289 millones para primer proyecto de baterías standalone. *Guía Chile Energía*, 2024. Disponible en línea: <https://www.guiachileenergia.cl/atlas-renewable-energy-cierra-financiamiento-por-us-289-millones-para-protect@normalcr\relax-primer-proyecto-de-baterias-standalone/>.