



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD INGENIERÍA EN CIENCIAS

AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS

RENOVABLES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

“CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO
DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE FUENTE FOTOVOLTAICA
MEDIANTE ENERGÍA POTENCIAL GRAVITATORIA A
ESCALA DE LABORATORIO”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título en Ingeniería en
Energías Renovables

Línea de investigación: Biotecnología, energía y recursos naturales
renovables

AUTOR:

Jonathan Santiago Muñoz Narváez

DIRECTOR

Ing. Luis Hernán Álvarez Játiva. MSc

Ibarra – Ecuador 2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

| DATOS DE CONTACTO | | | |
|----------------------------------|--|-----------------------------------|------------|
| CÉDULA DE IDENTIDAD: | 1050176153 | | |
| APELLIDOS Y NOMBRES: | MUÑOZ NARVÁEZ JONATHAN SANTIAGO | | |
| DIRECCIÓN: | IBARRA | | |
| EMAIL: | jsmunozn@utn.edu.ec | | |
| TELÉFONO FIJO: | | TELF. MOVIL | 0962358076 |
| DATOS DE LA OBRA | | | |
| TÍTULO: | CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE FUENTE FOTOVOLTAICA MEDIANTE ENERGÍA POTENCIAL GRAVITATORIA A ESCALA DE LABORATORIO | | |
| AUTOR: | MUÑOZ NARVÁEZ JONATHAN SANTIAGO | | |
| FECHA: DD/MM/AAAA | 07/1/2026 | | |
| SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN | | | |
| PROGRAMA: | <input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO | <input type="checkbox"/> POSGRADO | |
| TÍTULO POR EL QUE OPTA: | INGENIERIA EN ENERGÍAS RENOVABLES | | |
| DIRECTOR: | Ing. Luis Hernán Álvarez Játiva | | |

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 7 días del mes de enero de 2026

EL AUTOR:

(Firma).....

Nombre: Jonathan Santiago Muñoz Narváez

**CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTERGRACIÓN
CURRICULAR**

Ibarra, 7 de enero de 2026

Ing. Luis Álvarez, MSc

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f)

Ing. Luis Álvarez, MSc

C.C.: 1002273678

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificador del Trabajo de Integración Curricular “CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE FUENTE FOTOVOLTAICA MEDIANTE ENERGÍA POTENCIAL GRAVITATORIA A ESCALA DE LABORATORIO” elaborado por Jonathan Santiago Muñoz Narváez, previo a la obtención del título de Ingeniero en Energías Renovables, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f):.....

TUTOR: Ing. Luis Álvarez, MSc

C.C.: 1002273678

(f):.....

ASESOR: Ing. Juan Pedro Romero, MSc

C.C.: 1003013768

(f):.....

BIOMETRISTA: Dr. Juan Carlos García, PhD

C.C.: 1002279535

DEDICATORIA

El estudio es la mejor herencia que los padres pueden dejar a un hijo es por eso que dedico este proyecto a mis padres Marco y Eugenia, que gracias a su apoyo incondicional y a sus palabras de aliento hicieron posible la culminación de este gran sueño.

A mis hermanos Marco y Darío que me brindaron su confianza y apoyo incondicional para poder llevar a cabo esta meta y de esta manera poder desempeñarme en el ámbito profesional que he anhelado con muchas ansias. A todos los amigos que encontré en el transcurso del camino, en especial a la futura psicóloga Adriana Cevallos Rosero, quienes me apoyaron en la realización del trabajo aportando con su granito de arena para que este gran proyecto salga adelante y cumpla con todas las expectativas planteadas.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Técnica del Norte, sus Autoridades y Personal Docente de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales, por permitirnos ser parte de tan prestigiosa Institución e impartir su sabiduría para desarrollarnos personal como profesionalmente. A Dios que me dio sabiduría y paciencia en el transcurso de mis estudios y quien me mantuvo con salud y vida para llegar a culmina con éxito la carrera de Ingeniería en Energías Renovables.

RESUMEN

Debido a la creciente demanda de energía y a la evolución de las energías renovables, se propone como solución la implementación de tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica mediante energía potencial gravitatoria ofreciendo una alternativa eficiente, relativamente económica y ecológica evitando el uso de otras tecnologías contaminantes y con poca vida útil: construir un sistema de almacenamiento de energía de fuente fotovoltaica mediante potencial gravitatorio a escala de laboratorio. El sistema de almacenamiento aprovecha el excedente de energía producida por tecnologías solares fotovoltaicas; esto se hace mediante la creación de una estructura la cual mediante un ascensor eleva un peso hasta la zona de almacenamiento de los pesos, estos se encontrarán en reposo hasta que exista una demanda de energía, en ese caso los pesos se integran dentro del segundo ascensor, el cual desciende gracias al peso y mueve el eje de un motor el cual empieza a girar y generar energía eléctrica.

Palabras clave: Energía solar, almacenamiento, gravedad, energía limpia, energías renovables.

ABSTRACT

Due to the growing demand for energy and the advancement of renewable energy sources, the implementation of electrical energy storage technologies using gravitational potential energy is proposed as a solution. This offers an efficient, inexpensive and ecological alternative, avoiding the use of other polluting and short-lived technologies. The objective is to build a photovoltaic energy storage system based on gravitational potential on a laboratory scale. The storage system harnesses the surplus energy generated by solar photovoltaic technologies. This is achieved by creating a structure that uses an elevator to lift weights to a storage area. These weights remain at rest until there is an energy demand. In that case, the weights are transferred to a second elevator, which descends thanks to the weight, moving the shaft of a motor that begins to rotate and generate electrical energy.

Keywords: Energy solar, storage, gravity, clean energy, renewable energy.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Problema de investigación | 1 |
| 1.2 Justificación..... | 3 |
| 1.3 Objetivos | 4 |
| 1.3.1 <i>Objetivo general</i> | 4 |
| 1.3.2 <i>Objetivos específicos</i> | 4 |
| 1.4 Pregunta de investigación | 5 |
| 1.5 Hipótesis..... | 5 |
| CAPÍTULO II | 6 |
| MARCO TEÓRICO..... | 6 |
| 2.1 Energía renovable fotovoltaica y almacenamiento de energía..... | 6 |
| 2.1.1 <i>Energía solar fotovoltaica</i> | 7 |
| 2.1.2 <i>Tecnologías de almacenamiento de energía</i> | 7 |
| 2.1.3 <i>Almacenamiento por energía potencial gravitatoria</i> | 8 |
| 2.2 Tipos de almacenamiento con energía potencial gravitatoria | 10 |
| 2.2.1 <i>Pistón-GES</i> | 10 |
| 2.2.2 <i>Shaft-GES</i> | 10 |
| 2.2.3 <i>Tower-GES</i> | 11 |
| 2.2.4 <i>Building-GES</i> | 11 |
| 2.2.5 <i>Minecar-GES</i> | 12 |

| | |
|--|----|
| 2.2.6 <i>Mountain Truck-GES</i> | 12 |
| 2.2.7 <i>Mountain Cable-GES</i> | 12 |
| 2.2.8 <i>Underground-GES</i> | 13 |
| 2.3 Implementación de almacenamiento por potencial gravitatoria | 13 |
| 2.4 Evaluación de la eficiencia en comparación con otros sistemas..... | 15 |
| Capítulo III..... | 17 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 17 |
| 3.1 Área de estudio..... | 17 |
| 3.2 Diseño del sistema mecánico y eléctrico del sistema..... | 19 |
| 3.2.1 Matriz de selección con criterios ponderados | 19 |
| 3.3 Construcción del sistema mecánico y eléctrico del sistema..... | 24 |
| 3.4 Evaluación comparada con sistemas de almacenamiento convencionales . | 30 |
| 3.3 Materiales, equipos y software..... | 33 |
| CAPÍTULO IV..... | 36 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 36 |
| 4.1 Diseño del sistema..... | 36 |
| 4.1.1 Memoria de cálculo mecánico-eléctrico en diseño | 37 |
| 4.2 Construcción del sistema | 42 |
| 4.3 Evaluación del sistema..... | 51 |
| 4.3.1 Análisis de costos del sistema de almacenamiento..... | 51 |
| 4.3.2 Análisis de vida útil proyectada del sistema | 52 |

| | |
|--|-----------|
| 4.3.3 Análisis de la densidad Energética del sistema..... | 55 |
| 4.3.4 Análisis de impacto ambiental | 60 |
| 4.3.5 Análisis estadístico de la eficiencia del sistema..... | 66 |
| CAPÍTULO IV | 76 |
| Conclusiones y recomendaciones | 76 |
| 4.1 Conclusiones | 76 |
| 4.2 Recomendaciones..... | 77 |
| Referencias bibliográficas..... | 80 |

INDICE DE FIGURAS

| | | |
|------------------|---|----|
| Figura 1 | Tipos de sistemas de almacenamiento de energía. | 8 |
| Figura 2 | Sistema de almacenamiento por energía potencial gravitatoria. | 9 |
| Figura 3 | Mapa de ubicación..... | 17 |
| Figura 4 | Provincia de Imbabura..... | 18 |
| Figura 5 | Laboratorio de la carrera de Ingeniería en Energías Renovables | 18 |
| Figura 6 | Diseño de sistema mecánico..... | 40 |
| Figura 7 | Diseño de sistema eléctrico | 41 |
| Figura 8 | Diseño del sistema en 3D. | 42 |
| Figura 9 | Bases de la construcción de la estructura de madera..... | 43 |
| Figura 10 | Sistema de transporte PVC | 44 |
| Figura 11 | Sistema de transporte con catalina y cadena. | 48 |
| Figura 12 | Controlador solar | 49 |
| Figura 13 | Sensor de voltaje..... | 50 |
| Figura 14 | Sistema de almacenamiento de energía | 50 |
| Figura 15 | Pruebas de normalidad Anderson-Darling para sistemas de almacenamiento GES | 67 |
| Figura 16 | Histograma comparación con eficiencia del 85% | 69 |
| Figura 17 | Valores individuales comparación con eficiencia del 85% | 69 |
| Figura 18 | Diagrama de caja comparación con eficiencia del 85% | 69 |
| Figura 19 | Histograma comparación con eficiencia del 80% | 71 |
| Figura 20 | Valores individuales comparación con eficiencia del 80% | 71 |
| Figura 21 | Diagrama de caja comparación con eficiencia del 80% | 71 |
| Figura 22 | Histograma comparación con eficiencia del 75% | 73 |

| | |
|--|----|
| Figura 23 Valores individuales comparación con eficiencia del 75% | 73 |
| Figura 24 Diagrama de caja comparación con eficiencia del 75% | 74 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Comparación en la importancia entre criterios. | 21 |
| Tabla 2. Ficha técnica del panel de 50 W. | 25 |
| Tabla 3. Ficha técnica del controlador. | 25 |
| Tabla 4. Ficha técnica del motor. | 26 |
| Tabla 5. Sensor de Voltaje DC Arduino 25 V. | 27 |
| Tabla 6. Arduino UNO R3. | 28 |
| Tabla 7. Resumen de materiales, equipos y software. | 34 |
| Tabla 8. Resumen de materiales, equipos y software con costos. | 35 |
| Tabla 9. Resultados de los criterios ponderados. | 36 |
| Tabla 10. Consumo eléctrico. | 37 |
| Tabla 11. Costo por mantenimiento. | 52 |
| Tabla 12. Resultado de las pruebas experimentales. | 57 |
| Tabla 13. Factores de impacto ambiental por material. | 62 |
| Tabla 14. Inventario de masas y cálculo de impactos. | 63 |

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se detallan los antecedentes, la problemática, justificación de la investigación y los objetivos de este. También se presentan las preguntas directrices como eje de la investigación.

1.1 Problema de investigación

A nivel mundial, una de las actividades principales que se han puesto en marcha es la reducción de emisiones de carbono debido a efectos de mitigación del cambio climático usando fuentes alternativas de energía como solar y eólica, además de las futuras innovaciones para la generación de hidrógeno verde a través de electrólisis usado para almacenar energía. Esto nos demuestra que la transición energética es un proceso que cada país, incluso aquellos que están en vías de desarrollo, deben abordar. Aunque las naciones desarrolladas como Alemania, China y Noruega están a la cabeza en este cambio, es importante que todos busquen alternativas para adoptar estas tendencias; esto conlleva la implementación de políticas que no solo fomenten la sostenibilidad, sino que también generen oportunidades internas (Roger, 2018).

Las energías renovables son fuentes de energía amigables con el ambiente, pero los retos más grandes son las tecnologías para almacenar energía, debido a que estos sistemas como las baterías no solo causan daños medioambientales, sino que también representan un costo elevado en la instalación total de los sistemas de generación eléctrica de fuentes renovables, llegando a representar hasta el 66% de la inversión total, también se toman en cuenta factores, cómo pueden ser: eficiencia, durabilidad y sostenibilidad (Casals et al., 2016).

Por otra parte, la acumulación de energía por baterías ha sido utilizada por más de 100 años en diferentes ámbitos, éstas pueden ser de plomo, níquel, iones de litio, cadmio, hidruro metálico, polímero de litio, entre otros compuestos; este tipo de sistemas pueden llegar a ser peligrosos debido a sus compuestos químicos que tienen características corrosivas, explosividad, reactividad, inflamabilidad y toxicidad (Lema, 2023). Los materiales usados en la fabricación de baterías pueden llegar a tener toxicidad debido a su tipo de compuestos como las baterías de cadmio, lo cual puede producir un impacto ambiental considerable y de esta manera afectar a la naturaleza y a las personas (Medardo et al., 2019).

En el contexto ecuatoriano según MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS (2022) la principal fuente de energía es la que proviene de las centrales hidroeléctricas, generando de entre 70 % a 85 % de la energía total producida en el país. Algunas causas como la menor eficiencia en otras fuentes de energía complican la diversificación en la matriz energética, haciendo que el país tenga que depender únicamente de un solo recurso; por eso, la implementación de diversos tipos de almacenamiento de energía es esencial para estabilizar el Sistema Nacional Interconectado (SNI) en Ecuador (Chamba et al., 2022).

Con ayuda de tecnologías como el hidrogeno verde o sistemas de almacenamiento mediante energía potencial gravitatoria se busca desarrollar estrategias que complementen a las energías renovables en conceptos como el "smart grid" y métodos más eficientes para la generación y acumulación de energía que no afecte de manera negativa al medio ambiente (Icaza et al., 2021).

1.2 Justificación

Este estudio busca complementar la generación de electricidad con paneles solares fotovoltaicos apoyándose en los Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS) usando sistemas de almacenamiento energético mediante potencial gravitatorio, reduciendo limitaciones en diversas áreas de dichas tecnologías y brindando una alternativa tanto a futuros proyectos como también al desarrollo de esta industria (Naciones Unidas, 2015).

La necesidad de estudiar nuevas fuentes de almacenamiento para combinarlas con las tecnologías de generación limpia contribuye a la innovación tecnológica y brindar una alternativa técnica, funcional y responsable con el ambiente, respecto a los sistemas tradicionales. Este proyecto busca ahondar en tecnologías capaces de almacenar energía sin llegar a contaminar el medio ambiente, a su vez que se presentan formas de luchar contra el cambio climático y sus efectos. Además, promueve la eficiencia y la preservación del entorno, buscando que este se mantenga limpio y respetando a nuestro planeta.

Un estudio publicado por la revista *Nature Energy* menciona que los sistemas de almacenamiento por gravedad pueden llegar a ser una alternativa para el almacenamiento a gran escala, aunque en algunas regiones dependerá de si cuenta o no con unas topografías adecuadas, aun así, la eficiencia de ida y vuelta es competitiva con otras tecnologías, llegando a alcanzar un 80-90 %, lo que los hace comparables con sistemas como las baterías de iones de litio. Estos sistemas son escalables y pueden adaptarse a diferentes capacidades de almacenamiento, desde pequeñas instalaciones hasta grandes proyectos de red eléctrica. Esto los convierte en una opción atractiva para equilibrar la oferta y la demanda en redes eléctricas.

La implementación de este tipo de sistemas en proyectos con energía renovable es una solución para afrontar los problemas de la intermitencia y la variabilidad en fuentes como la solar y la eólica. A diferencia de las baterías químicas, estos sistemas no dependen de materiales escasos o contaminantes, lo que los hace más sostenibles a largo plazo. Además, su vida útil es significativamente mayor, ya que no sufren degradación con el tiempo como las baterías convencionales.

Estos sistemas tienen la capacidad de ser implementados en proyectos de diversas escalas. En el caso de este estudio, se va a implementar a escala de laboratorio.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Construir un sistema de almacenamiento de energía de fuente fotovoltaica mediante potencial gravitatorio a escala de laboratorio.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar el sistema mecánico y eléctrico de almacenamiento de energía de fuente fotovoltaica mediante potencial gravitatorio a escala de laboratorio.
- Construir el sistema mecánico y eléctrico de almacenamiento de energía de fuente fotovoltaica mediante potencial gravitatorio a escala de laboratorio
- Evaluar la eficiencia del sistema de almacenamiento de energía de fuente fotovoltaica mediante potencial gravitatorio en relación con sistemas de almacenamiento convencionales.

1.4 Pregunta de investigación

¿Cómo construir un sistema de almacenamiento de energía de fuentes fotovoltaicas mediante potencial gravitatorio a escala de laboratorio para evaluarlo con tecnologías convencionales?

1.5 Hipótesis

HA: La eficiencia del sistema es significativamente diferente a la de las tecnologías convencionales.

H0: La eficiencia del sistema no es significativamente diferente a la de las tecnologías convencionales.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo, se presenta la información disponible relacionada con el diseño, construcción y evaluación de sistemas de almacenamiento mediante energía potencia gravitatoria. Este marco conceptual muestra los principios teóricos y prácticos acerca de este tipo de sistemas permitiéndonos tener un contexto sobre cómo ha aportado esta tecnología al avance y complemento de la energía eléctrica de fuente renovable y no renovable. Además, se busca establecer una base sólida para la implementación de metodologías que optimicen el diseño, la construcción y el aprendizaje en el ámbito de la ingeniería energética.

2.1 Energía renovable fotovoltaica y almacenamiento de energía

La implementación de tecnologías como las energías renovables es un intento de abastecer la demanda eléctrica que se encuentra en crecimiento a nivel mundial. Algunas energías como la eólica, solar, geotérmica y bio energía son ejemplos de fuentes energéticas que buscan aprovechar de mejor manera recursos ambientales como la radiación solar, el flujo de los ríos o los residuos generados por las personas, estas fuentes representan alrededor del 40 % de la energía mundial y cada vez se abre paso dentro de industrias, hogares o transporte que ocupan electricidad como fuente principal (Wiatros et al., 2023).

Las tecnologías solar y eólica son las más usadas por su versatilidad en cuestión de escala, la energía solar aprovecha la radiación proveniente del sol para transformarla en energía eléctrica y térmica y la energía eólica aprovecha las corrientes de viento para mover turbinas las cuales producirán electricidad, pero

estas tienen limitaciones debido a factores ambientales que el ser humano no puede controlar como es el caso de la energía solar que en la noche su producción se reduce a cero o la energía eólica que depende de las corrientes de aire, debido a esto el almacenamiento de energía complementa el funcionamiento de estas tecnologías (Psarros & Papathanassiou, 2022).

2.1.1 Energía solar fotovoltaica

Los sistemas de generación fotovoltaicos usan la radiación solar para transformarla en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico, los fotones impactan en las capas del panel incidiendo sobre las células usualmente de silicio haciendo que los electrones se exciten y empiecen a moverse, gracias a eso se produce la electricidad, pero factores como la temperatura y los cambios climáticos pueden llegar a afectar su eficiencia y rendimiento (Lopez & Moscoso, 2023).

Los sistemas fotovoltaicos pueden funcionar de forma aislada como son los sistemas off-grid o conectados a la red eléctrica convencional lo que permite cubrir un amplio terreno en cuanto a necesidades energéticas tanto en las zonas rurales como zonas urbanas. Los sistemas fotovoltaicos aislados requieren de paneles solares, baterías para el almacenamiento la energía generada, controladores de carga para regular el flujo de energía e inversores para convertir la corriente continua (CC) en corriente alterna (CA) (De la Cruz & Mejía, 2022).

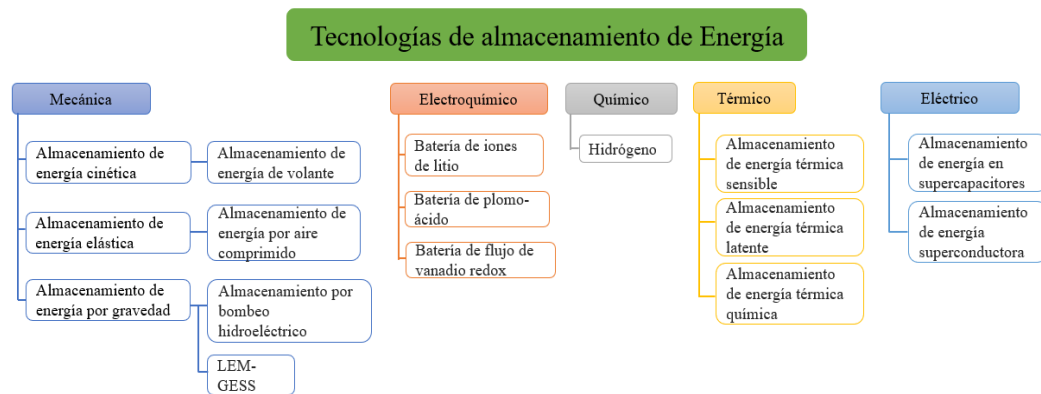
2.1.2 Tecnologías de almacenamiento de energía

Chen (2024) resalta la importancia de las tecnologías actuales de almacenamiento de energía para resolver las implicaciones provocadas por la demanda energética y el apoyo a tecnologías como los sistemas fotovoltaicos. Estas tecnologías incluyen

el almacenamiento mecánico, electroquímico y térmico que son las más usadas en proyectos de gran capacidad de almacenamiento (Figura 1).

Figura 1.

Tipos de sistemas de almacenamiento de energía.



Nota: Clasificación de las diferentes tecnologías de almacenamiento por Julong, et al., (2024)

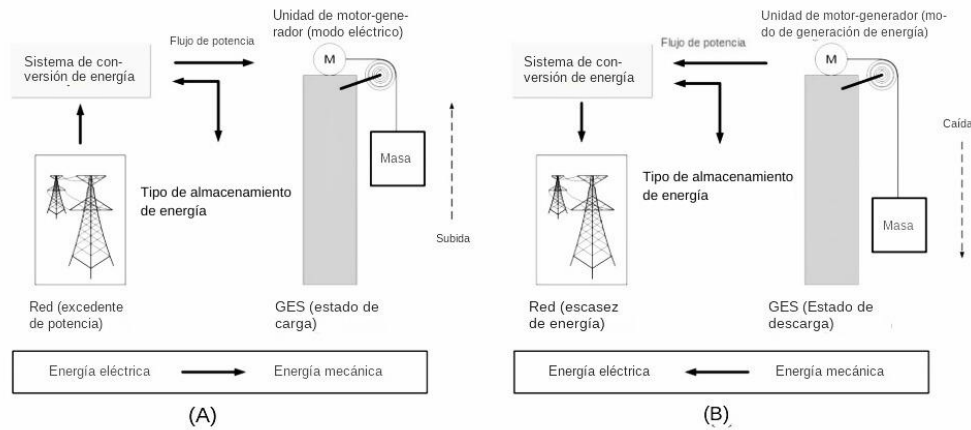
2.1.3 Almacenamiento por energía potencial gravitatoria

El almacenamiento por energía gravitatoria surge como una opción viable debido a su alto factor de seguridad, años de durabilidad y respeto por el medio ambiente, basándose en el uso de electricidad para levantar un peso mediante diferentes técnicas y después dejarlo caer aprovechando la energía potencial gravitatoria y así generar energía eléctrica, esto permite el almacenamiento y la liberación de energía como se observa en la figura 2, muchos países optaron por la construcción de estos sistemas para combinarlos con fuentes de energía renovable, como por ejemplo una de las aplicaciones en China, Wang et al., (2021) nos menciona que es usar un generador triboeléctrico por gravedad para ascender un peso sin importar el tiempo

que tome hacerlo, después al momento del descenso del bloque se entregaría energía estable.

Figura 2.

Sistema de almacenamiento por energía potencial gravitatoria.



Nota: Modelo de sistema de almacenamiento de energía mediante energía potencial gravitatoria usando electricidad de la red pública para su funcionamiento (Tong et al., 2023).

El sistema de almacenamiento energético mediante energía potencial gravitatoria funciona al transformar la energía eléctrica en energía potencial y viceversa, es un proceso que se realiza levantando un objeto con un peso determinado usando un generador y luego soltarlo liberando la misma energía que se ocupó para levantarlo (Tong et al., 2022). Existen diferentes modelos para el diseño de los sistemas de almacenamiento mediante energía potencial, algunos diseños reutilizan pozos abandonados como los creados por las minas, estos se enfocan en la optimización de la energía potencial almacenada a grandes distancias, en este caso también es necesario determinar las pérdidas por fricción del aire con un balance de fuerzas en

el sistema de tracción teniendo en cuenta la fricción dinámica en el ascenso y descenso de la masa (Li et al., 2024).

2.2 Tipos de almacenamiento con energía potencial gravitatoria

Wang et al., 2021 menciona que a lo largo de los años se han desarrollado diferentes modelos de sistemas de almacenamiento mediante energía potencial gravitatoria, entre los cuales nos presenta a:

2.2.1 Pistón-GES

Este sistema emplea un pistón de gran tamaño dentro de un cilindro lleno de agua. Para almacenar energía, una bomba empuja el agua hacia abajo, elevando el pistón. Cuando se requiere electricidad, el pistón desciende y el agua liberada acciona una turbina.

Su principal ventaja es la densidad de energía que este puede alcanzar gracias a la profundidad del cilindro y a la masa del pistón, pero esto significa un mayor aumento en el costo ya que a medida que aumenta la masa, todo el sistema debe ser readecuado para soportar el peso y la presión que se ejerza dentro de este equipo.

2.2.2 Shaft-GES

Funciona mediante la elevación y descenso de pesos dentro de un pozo profundo, usualmente estos pozos son reutilizados de alguna construcción anterior. Opera de manera similar a un ascensor, transformando la energía potencial en electricidad mediante el descenso de los pesos.

En cuanto a sus ventajas se puede mencionar el aprovechamiento de infraestructuras mineras abandonadas, de esta forma se reducen los costos de construcción y el impacto ambiental, reutilizando estas estructuras que no cumplen con una función en la actualidad. A pesar de ser un diseño bastante eficiente se limita por su dependencia en la ubicación geográfica ya que se necesita encontrar pozos mineros profundos y estables que no se encuentren en uso.

2.2.3 Tower-GES

En este sistema un sistema tipo grúa apila y desmonta bloques de hormigón en una torre. La energía se almacena cuando los bloques se elevan y se recupera al bajarlos, ya que el movimiento genera electricidad a través de generadores.

Utilizando materiales de bajo costo este sistema ofrece ser modular y escalable, pero a costa de tener una menor densidad energética comparado con los sistemas mencionados anteriormente además de necesitar estructuras que soporten cargas dinámicas y estáticas enormes lo que implica mayor costo económico.

2.2.4 Building-GES

Adapta edificios altos para almacenar energía mediante el uso de ascensores. Se levantan y descienden cargas pesadas dentro de la estructura, generando electricidad cuando estas bajan.

Estos sistemas pueden aprovechar infraestructuras urbanas existentes lo que puede reducir el costo de inversión, aunque la logística de mover pesos dentro de estas infraestructuras puede llegar a ser muy compleja.

2.2.5 Minecar-GES

Aprovecha vagones de mina que transportan bloques pesados cuesta arriba para almacenar energía. Al descender, la energía potencial se convierte en electricidad, utilizando la infraestructura de antiguas minas.

Al igual que algunos sistemas, este reutiliza terrenos o infraestructuras mineras que se encuentren fuera de servicio, pero tiene el mismo problema relacionado a la ubicación geográfica.

2.2.6 Mountain Truck-GES

Este método emplea camiones eléctricos para subir cargas pesadas a lo alto de una montaña cuando hay excedente de energía. Luego, la energía se recupera cuando los camiones descienden con las cargas.

Aunque puede aprovechar los caminos existentes en algunas montañas tiende a generar pérdidas considerables por rodadura y al desgaste de los neumáticos generando poca eficiencia y aumentando los costos durante su vida útil.

2.2.7 Mountain Cable-GES

Utiliza teleféricos para subir y bajar cargas en áreas montañosas. La energía almacenada en la elevación se libera cuando los pesos descienden, generando electricidad.

Este sistema es capaz de aprovechar la topología natural para tener suficiente altura sin la necesidad de construcciones costosas. Pero, aunque tenga mayor capacidad

que otros sistemas montañosos aún depende de ubicaciones específicas y puede llegar a provocar impactos ambientales considerables.

2.2.8 Underground-GES

Se basa en el movimiento de materiales como arena o grava entre distintos niveles de una mina subterránea. La energía se almacena al elevar el material y se libera cuando baja nuevamente.

A pesar de que se puede usar infraestructuras mineras existentes y reducir costos, el uso de arena y su transporte pueden llegar a afectar la viabilidad de estos proyectos ya que se han registrado obstrucciones en las tuberías y desgastes por abrasión del material.

En Reino Unido se han usado estas tecnologías para la rehabilitación de pozos mineros profundos abandonados, enfocándose en la forma óptima en cuanto a la colocación de los pesos; también, utilizando datos del Catálogo de minas, se estimó que había 340 pozos mineros que podrían ser adecuados para convertirse en unidades de almacenamiento por gravedad con una capacidad superior a 804 MWh de almacenamiento de energía (Morstyn et al., 2019).

2.3 Implementación de almacenamiento por potencial gravitatoria

La empresa Gavitricity es una entidad que compartió su diseño de un sistema de almacenamiento gravitacional el cual utiliza grandes cilindros de acero suspendidos. El diseño calcula la energía almacenada teniendo en cuenta la masa del cilindro, la aceleración de la gravedad y la altura de caída, aunque también se toma en cuenta la relación entre la velocidad angular del motor y la velocidad lineal

de descenso del cilindro, de igual manera se busca la optimización de cada uno de estos parámetros para minimizar costos de operación y maximizar la eficiencia del sistema (Carrera, 2018).

En la construcción de estos sistemas, se utiliza a menudo un peso dentro de un contenedor, simulando un pistón, dicho pistón está hecho de un material fuerte como el PVC de presión o acero, el peso dentro de este está conectado a un motor generador, este es el encargado del ascenso y descenso del peso y de transformar la energía potencial gravitatoria en eléctrica, el generador es alimentado por un inversor de corriente cuando este funciona en corriente alterna y a su vez el inversor a un panel solar fotovoltaico (Ruoso et al., 2019).

Todos los materiales deben ser capaces de resistir al trabajo sometido y durar lo suficiente para poder comparar con la durabilidad de almacenamientos convencionales, por ejemplo, el contenedor debe ser denso y de alta durabilidad ya que en caso de usarse algún líquido dentro de este como apoyo al momento del descenso del pistón, deberá resistir a la presión del líquido. En algunos casos, se usa cintas de acero o abrazaderas como refuerzos y en el caso del material de los pesos, puede variar dependiendo el modelo que se vaya a realizar, algunos de los materiales óptimos son los discos de acero o bloques de concreto por sus propiedades de durabilidad, fuerza y en el caso de los bloques de concreto por los costos relativamente bajos (Berrada et al., 2017).

En caso de usar poleas, estas deberán ser resistentes y capaces de aguantar el peso, hechas de materiales como aluminio, hierro fundido y acero, aunque también se puede usar cables de acero debido a su fuerza para aguantar la tracción, también

utilizando máquinas de eje y fuerza como un conjunto de engranajes se puede aumentar la fuerza a la que se someterá el generador con la finalidad de que consuma la mayor cantidad de corriente en una distancia relativamente corta (Hunt et al., 2020).

2.4 Evaluación de la eficiencia en comparación con otros sistemas

Menéndez et al., (2020) menciona que en la evaluación de la eficiencia del almacenamiento gravitatorio frente a diferentes sistemas como por ejemplo el almacenamiento hidroeléctrico por bombeo y los sistemas de aire comprimido, se comparan parámetros en común como la densidad de la energía y la eficiencia del ciclo completo, llegando a la conclusión de que los sistemas de almacenamiento por gravedad alcanzaban una eficiencia del 90 % superando a los otros dos sistemas los cuales suelen presentar eficiencias ligeramente inferiores, aunque esto puede variar según factores como la escala del sistema o las condiciones de operación usando variables como el tiempo de respuesta y tiempo de carga.

En una minicentral hidroeléctrica se ha realizado una comparación entre los sistemas de almacenamiento convencionales y los sistemas de almacenamiento gravitatorios teniendo en cuenta la generación en este campo y la energía constante que entrega, dando como resultado que las baterías convencionales presentan un deterioro en un tiempo inferior al de los sistemas gravitatorios (Pastas, 2024).

Para evaluar la eficiencia de los diferentes sistemas tomar datos *in situ* no es la única opción, ya que en la actualidad se cuenta con programas de simulación que pueden llegar a facilitar una comparación entre sistemas de almacenamiento, herramientas estadísticas como la t de student usada, por ejemplo, en la creación de modelos de

optimización como la de enjambre de gatos, recaban información entre dos tecnologías y simulan como reaccionaran ante diferentes circunstancias. Además, usando un programa para el análisis de datos como Excel podemos representar de mejor manera la superioridad de uno de los sistemas frente al otro (González et al., 2015).

Los modelos de optimización como la de enjambre de gatos que se basan en buscar la mejor combinación consideran variables como: la potencia de la entrada a la red, la compra de la electricidad y la potencia disponible del sistema, además se enfoca en la capacidad, ubicación de la granja fotovoltaica y el sistema de almacenamiento con potencial gravitatorio, y así calcular la relaciones como la de potencia y almacenamiento, esto lo hace mediante ligeros cambios en cada sistema, como por ejemplo, el cambio en la potencial del panel, de esta forma se optimiza la disposición y el uso de recursos para maximizar la eficiencia del almacenamiento (Hou et al., 2020).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se presenta el área de estudio en donde se implementó el sistema y la metodología que se llevó a cabo, además, de los equipos y materiales usados.

3.1 Área de estudio

El estudio se ubicó en la Universidad Técnica del Norte (UTN), en la ciudad de Ibarra, provincia de Imbabura (Figuras 3 y 4). Esta ciudad se encuentra en la región Sierra, al norte del país con una latitud de 2225 msnm, contando con un clima templado con temperaturas que varían de entre 14 C y 22 C. Este sistema se encontrará dentro del laboratorio de la Carrera de Ingeniería en Energías Renovables de la Universidad Técnica del Norte (Figura 5).

Figura 3.

Mapa de ubicación



Nota: Vista aérea de la Universidad Técnica del Norte (UTN). ArcGis 10.8

Figura 4.

Provincia de Imbabura.



Nota: Vista del territorio que ocupa la provincia de Imbabura.

Figura 5.

Laboratorio de la carrera de Ingeniería en Energías Renovables



3.2 Diseño del sistema mecánico y eléctrico del sistema

En el desarrollo de este proyecto se evaluaron dos diferentes sistemas de almacenamiento mencionados en capítulos anteriores: Uno se basa en la capacidad de almacenar varios pesos responsables del principal funcionamiento de este sistema, tipo: *Building-GES* y el otro solo contará con un peso, similar al concepto Gravitricity ambos mencionados en capítulos anteriores. Para esto se realizó una matriz de selección con criterios ponderados (Álvarez, 2014).

3.2.1 Matriz de selección con criterios ponderados

Sistema de peso único tipo Gravitricity (A):

El sistema de almacenamiento mediante energía potencial gravitatoria funciona mediante la entrega de energía eléctrica a un motor cuyo eje es sujetado a un peso de masa m , el cual es elevado de forma vertical, cuando llegue a la altura máxima deseada, el peso permanecerá en reposo hasta que se requiera de energía. Cuando el consumo de energía lo demande, el peso descenderá lentamente para hacer girar al eje y este motor entregue energía eléctrica. Este proceso se llevará a cabo en una estructura de al menos 1.5 metros; el sistema constará con únicamente un ciclo que será el momento de carga (ascenso) y momento de descarga (descenso).

Ventajas:

- El diseño es relativamente simple a comparación del otro sistema ya que contiene menos elementos.
- Menor costo en construcción e implementación debido al uso de un solo peso y a la ausencia de una sección de almacenamiento.

Desventajas:

- Capacidad de almacenamiento limitada a un solo bloque.
- Sin opción a realizar una modificación a futuro ya que el sistema está diseñado para no ser escalable.
- Requiere un motor con mayor torque para el ascenso.

Sistema de múltiples bloques tipo Building-GES (B):

Este sistema de almacenamiento ocupa el mismo principio que el anterior a diferencia de que usa diversos bloques de masa m y estos podrán ser almacenados, estos pesos se elevan a través de un ascensor que los depositará en la zona de almacenamiento manteniéndose en una altura h hasta su futuro requerimiento, cuando sea necesario dichos pesos descenderán por otro ascensor conectado a un motor diferente el cual se encarga de transformar la energía potencial gravitatoria en energía eléctrica.

Después los pesos son llevados a la zona de elevación otra vez, mediante sistemas de transporte en una estructura que será de al menos 1.5 metros.

Ventajas:

- Mayor capacidad de almacenamiento a comparación del otro sistema gracias a su apartado específico para almacenamiento.
- Posible expansión aumentando más peso generando mayor energía.

Desventajas:

- Diseño con mayor complejidad y mantenimiento lo que resulta en una inversión de tiempo mayor.
- Mayor costo a comparación del otro sistema por la implementación de más procesos como el de almacenamiento.

Para la comparación se definió los siguientes criterios, los cuales son comparados entre sí para identificar que tan importantes son en relación con cada uno así añadir un peso basado en su relevancia. Los valores de esta matriz representarán:

0: El criterio comparado tiene menor importancia frente al otro.

0.5: Los dos criterios tienen la misma importancia.

1: El criterio comparado tiene mayor importancia que el otro.

*Tabla 1.
Comparación en la importancia entre criterios.*

| Criterios | Bajo costos | Innovación estructural | Capacidad de almacenamiento | Bajo mantenimiento | Escalabilidad | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|-----------------------------|--------------------|-------------------------------|------------------------------------|---------------------------|----------------------|------------------------------|--------------------|
| Bajo costos | - | 0.5 | 0 | 0.5 | 0.5 | 2.5 | 0.16 |
| Innovación estructural | 0.5 | - | 0 | 1 | 1 | 3.5 | 0.23 |
| Capacidad de almacenamiento | 1 | 1 | - | 1 | 1 | 5 | 0.3 |
| Bajo mantenimiento | 0.5 | 0 | 0 | - | 1 | 2.5 | 0.16 |
| Escalabilidad | 0.5 | 0 | 0 | 0 | - | 1.5 | 0.1 |
| Suma | | | | | | 15 | 1 |

- Bajo costos (16 %): La inversión total que se requiere para la construcción del sistema.
- Innovación estructural (23 %): al ser un proyecto de grado debe demostrar el conocimiento adquirido.
- Capacidad de almacenamiento (30 %): Uno de los aspectos más importantes es la capacidad de almacenar energía.
- Bajo mantenimiento (16 %): La necesidad de intervenciones frecuentes para mantener el sistema en operación.
- Escalabilidad (10 %): Posibilidad de ampliar el modelo a futuro como aumento de almacenamiento.

Una vez definido el valor de cada criterio, estos se evaluaron con las alternativas propuestas como A y B, después se realizó la suma de los resultados para terminar el modelo óptimo para este trabajo.

Para diseñar el sistema se utilizó las ecuaciones mencionadas por Ruoso et al., (2019) ya que es necesario realizar un dimensionamiento del sistema de generación energético, el motor eléctrico, el sistema de control y la masa que se utilizó con la finalidad de evitar pérdidas en cada equipo.

Para el sistema de generación de energía eléctrica se utilizó un panel solar fotovoltaico el cual se dimensionó con la ecuación 1:

$$G = n \cdot Wp \quad (1)$$

En donde G es la potencia total del sistema de generación, n el número de módulos fotovoltaicos y Wp es la potencia pico de cada módulo.

La capacidad de almacenamiento de energía se calculó con la ecuación 3:

$$Ea = \eta ES \cdot g \cdot m \cdot D' \quad (3)$$

Donde Ea está dada en Joules (J), ηES es la eficiencia de ida y vuelta, siendo la división entre la energía recuperada útil y la energía inicial suministrada, m es la masa del peso (kg), g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2) y D' es la distancia de la profundidad que el peso recorrerá (m).

Transformando los J a Wh podemos escribir el almacenamiento de energía con la siguiente ecuación 4:

$$Ea = 2.78 * 10^{-4} (\eta ES \cdot g \cdot m \cdot D') \quad (4)$$

Para el volumen del peso se consideró una esfera, se usó la altura y el diámetro como se indica en la ecuación 5:

$$V = \frac{\pi * d^3}{6} \quad (5)$$

Para el peso con densidad ρ (kg/m^3), la masa (m) del peso se expresó con la ecuación 6:

$$m = \rho * V \quad (6)$$

La profundidad útil del eje para levantar el peso está representada por la ecuación 7:

$$D' = D - h \quad (7)$$

Así, la capacidad total de almacenamiento de energía (Wh) también se pudo expresar mediante las ecuaciones 8 y 9:

$$Ea = 2.78 * 10^{-4} * \eta ES * (m * g * D - m * g * h) \quad (8)$$

$$Ea = 2.78 * 10^{-4} * \eta ES * \rho * \left(\frac{\pi d^3}{6}\right) * g * (D - h) \quad (9)$$

Por lo tanto, la densidad de energía del sistema (Wh/m³) se puede calcular de acuerdo con la ecuación 10:

$$\rho ES = \frac{Ea}{V} = 2.78 * 10^{-4} * \rho * g * h \quad (10)$$

Para finalizar, la ecuación (11) presenta el cálculo de la densidad de potencia (W/m³).

$$\rho p = \frac{\rho * h * g}{3.6 * 10^3 * td} \quad (11)$$

En donde td es el tiempo de descarga del sistema de almacenamiento en horas. Esta propiedad es válida para cualquier forma siempre que la forma del eje y del pistón sean iguales.

3.3 Construcción del sistema mecánico y eléctrico del sistema

La construcción del sistema tanto eléctrico como mecánico se llevó a cabo utilizando los componentes seleccionados y las conexiones requeridas para un buen funcionamiento. Entre estos se menciona los equipos más relevantes en las tablas 2, 3 y 4:

Tabla 2.

Ficha técnica del panel de 50 W.

| Parámetros | Valor |
|------------------------------------|-------------------------|
| Tipo de módulo | Policristalino |
| Potencia pico (Pp) | 60 W |
| Tolerancia salida de potencia | 0 / +5 % |
| Voltaje de circuito abierto (Voc) | 22.6 V |
| Corriente de cortocircuito (Isc) | 2.95 A |
| Voltaje en potencia máxima (Vpm) | 18.59 V |
| Corriente en potencia máxima (Ipm) | 2.69 A |
| Eficiencia | 13.82 % |
| Peso | 4.5 kg |
| Dimensiones | 540 mm x 680 mm x 25 mm |

Tabla 3.

Ficha técnica del controlador.

| Parámetros | Valor |
|---------------------|--------------|
| Tipo de controlador | MPW |
| Corriente | 10 A |
| Eficiencia | 90 % |
| Voltaje de entrada | 12/24 V DC |
| Entrada FV max | 50 V |

Tabla 4.

Ficha técnica del motor.

| Parámetro | Valor |
|---------------------------------|----------------------------|
| Tipo de motor | Motor eléctrico monofásico |
| Potencia requerida (Modo motor) | 6 W |
| RPM | 15 RPM |
| Voltaje | 12 V |
| Longitud del eje | 15 mm |
| Torque | 13.5 kg.cm |

Y para el monitoreo el funcionamiento del sistema se instalaron sensores que permitan medir parámetros como voltaje, corriente y potencia generándonos datos para verificar de mejor manera la eficiencia y generación del sistema, estos se conectarán a un dispositivo de visualización para facilitar el seguimiento (Mora, 2022).

Para esto se usará los siguientes sensores y materiales:

- En la tabla 6 podemos observar las características de sensor de voltaje DC Arduino 25 V

Tabla 5.

Sensor de Voltaje DC Arduino 25 V.

| Parámetro | Valor |
|--------------------------|-------------------------------------|
| Tipo de sensor | Sensor de voltaje DC |
| Rango de medición | 0 – 25 V |
| Tipo de corriente | Corriente continua (DC) |
| Salida | Analógica |
| Precisión | Alta |
| Aplicaciones | Monitoreo de voltaje en sistemas DC |
| Interfaz de comunicación | Señal analógica |
| Compatibilidad | Arduino, microcontroladores |

- En la tabla 6 podemos observar las características de Arduino uno

Tabla 6.

Arduino UNO R3.

| Parámetro | Valor |
|----------------------------------|---|
| Tipo de microcontrolador | ATmega328P |
| Voltaje de operación | 5 V |
| Voltaje de entrada (recomendado) | 7 – 12 V |
| Voltaje de entrada (límite) | 6 – 20 V |
| Pines digitales I/O | 14 (6 PWM) |
| Pines analógicos | 6 |
| Memoria Flash | 32 KB |
| Comunicación | UART, I2C, SPI |
| Aplicaciones | Prototipos, automatización, adquisición de datos |

El primer prototipo de la estructura se la realizó de madera para una optimización en los costos y la facilidad de movilización, ya que al cambiar de material el peso de la estructura total aumentaría considerablemente.

La instalación del panel solar sobre la estructura, al no depender de una inclinación u orientación preestablecidos se colocó en posición óptima con una inclinación 7° y orientación 0° Sur.

A su vez el panel estuvo conectado a uno de los dos motores ya que este consume energía eléctrica en corriente continua (DC). El panel también se conectó

a un controlador para aprovechar la energía producida por este en el día y poder conectar algunas cargas.

Para el montaje de los motores y sistemas de poleas se usó el siguiente procedimiento: el motor eléctrico se conectó a un sistema de engranajes con la finalidad de tener un mayor control en la velocidad del giro, este sistema al que se lo denominó caja reductora estuvo conectada a un piñón el cual fungió el papel de polea permitiendo el movimiento de los pesos de forma cíclica. Este motor se instaló en una base fija a una altura determinada, con la finalidad de que el peso tenga recorridos fluidos y controlados, el cual, también estuvo conectado a otro piñón a través de una cadena. A esta cadena se le añadió un “elevador”, el cual se fabricó con un diseño que permita levantar y descender los pesos.

En la configuración del peso se realizó de la siguiente manera: los pesos tuvieron un recorrido de cuatro fases, la fase de ascenso: en donde el primer motor logró elevarlos con el elevador; la fase de almacenamiento: aquí los pesos se deslizaron mediante gravedad a la zona de almacenamiento hasta que se requirió de la energía almacenada; fase de descenso: los pesos se soltaron y entraron dentro del elevador de descenso, lo que hizo girar al segundo motor y este generó energía eléctrica; fase de retorno: una vez los pesos bajen hasta el límite del recorrido de descenso se deslizaron nuevamente por el sistema de transportación hasta el punto de ascenso para su uso posterior.

Para la recopilación de datos se conectó el sensor de voltaje DC, en el microcontrolador Arduino UNO R3 para obtener y procesar la información del sistema. La plataforma Arduino llevó los datos de los sensores a visualizar en una pantalla, para poder visualizarlos en tiempo real. Gracias a este programa, se

realizará la recolección, análisis y almacenamiento de la información obtenida, para el monitoreo y la evaluación de los parámetros eléctricos del sistema.

3.4 Evaluación comparada con sistemas de almacenamiento convencionales

Una vez instalado el sistema se realizó las siguientes pruebas:

Se calculó la energía potencial generada al elevar el peso y se comparó con la energía recuperada durante la descarga para determinar la eficiencia total del sistema, después se utilizó la optimización de enjambre de gatos, que se ha mencionado en los capítulos anteriores, usando herramientas estadísticas como la prueba *t de student*, programas de recopilación y análisis como Excel y presentación de datos en pantallas led, para la evaluación de parámetros dentro del sistema como la altura, el peso, la potencia del panel y la potencia del motor, también se evaluó con otros sistemas de almacenamiento. Se comprobó la eficiencia operativa realizando al menos 15 ciclos estos teniendo en cuenta carga y descarga para determinar la consistencia del sistema.

Se llevó a cabo un análisis económico y técnico del sistema y se registraron los costos de los componentes utilizados, así como el tiempo requerido para el ensamblaje e instalación. Los datos recopilados permitieron realizar una prueba estadística, en este caso con alternativas de almacenamiento energético, considerando los siguientes aspectos:

Costos por ciclo operativo

Se calcularon mediante el precio unitario de cada elemento como por ejemplo materiales estructurales, el sistema de elevación, el motor y los paneles solares. Además, se tomó en cuenta el costo de mantenimiento para el ensamblaje e

instalación del sistema. Se utilizó un modelo de costos basado en el tiempo de operación y el desgaste de los componentes mecánicos.

Vida útil proyectada del sistema

La durabilidad se estimó con un análisis de fatiga de los materiales y componentes principales, como los cables, las poleas y la estructura de soporte. Se utilizaron datos de fabricantes y pruebas de laboratorio para determinar el número aproximado de ciclos que cada componente podía soportar antes de requerir reemplazo o mantenimiento. Además, se realizaron inspecciones visuales y mediciones de desgaste tras cada ciclo de carga y descarga para encontrar fallos prematuros.

Densidad de energía (Wh/m³)

Esto se calcula usando la energía potencial máxima acumulada en función de la ecuación 12:

$$E_p = mgh \quad (12)$$

donde m es la masa utilizada, g la gravedad y h la altura de elevación dando como resultado un valor medido en Joules. Después, este valor se dividió por el volumen ocupado por el sistema de almacenamiento para obtener la densidad energética en Wh/m³.

$$\text{Densidad energética} = \frac{\text{Energía almacenada (Wh)}}{\text{Volumen del sistema (m}^3\text{)}} \quad (13)$$

Estos valores fueron comparados con los de otros sistemas de almacenamiento como baterías de litio.

Impacto ambiental

Para el impacto ambiental se realizó un life cycle analysis de los materiales utilizados teniendo en cuenta la extracción de materias primas, el proceso de fabricación, la operación del sistema y su disposición final. Se evaluó la cantidad de energía embebida en los componentes, así como la posibilidad de reutilización o reciclaje de estos. También, se midió la emisión indirecta de CO₂ relacionadas con la producción de los materiales y su transporte.

Requerimientos de mantenimiento

Este se identificó a través de la observación de los desgastes en los componentes mecánicos y eléctricos durante las pruebas de operación. Se establecieron inspecciones periódicas para verificar el estado de cables, poleas y motor. Se realizaron mediciones de eficiencia en un tiempo determinado para detectar posibles pérdidas de rendimiento debidas a la fricción o fatiga de materiales.

Análisis estadístico

Se usó t de Student como método estadístico para comparar el rendimiento del sistema con otras variantes y con sistemas convencionales, como las baterías de litio. Esta prueba estadística también se utilizó para buscar diferencias significativas en ciertos parámetros tales como; la eficiencia de almacenamiento, la densidad energética o la tasa de descarga. Para ello, se realizaron comparaciones entre las medias de cada grupo, considerando las condiciones operativas específicas de cada sistema. Esto permitió medir las ventajas y limitaciones de nuestro diseño en términos de desempeño energético, obteniendo datos objetivos para evaluar su viabilidad técnica en comparación con las soluciones tradicionales.

3.3 Materiales, equipos y software

Los materiales, equipos y software que se emplearon en el desarrollo de la investigación están descritos en la tabla 7 y 8.

Tabla 7.

Resumen de materiales, equipos y software.

| Equipo | Descripción | Cantidad | Unidad | Valor Unitario | Valor total US\$ |
|----------------------|-----------------------|-----------------|---------------|---------------------------|-----------------------------|
| Panel Solar | 60 W | 1 | W | 59 | 59 |
| Motor | 3 Nm | 3 | - | 30 | 90 |
| Estructura | Madera | 1 | - | 110 | 110 |
| Catalinas | 20 cm | 8 | - | 5 | 40 |
| Piñones | 4 cm | 4 | - | 3 | 12 |
| Tubería PVC | Media pulgada | 3 | - | 5 | 15 |
| Sensores DC | Voltaje, Corriente | 2 | A/V | 10 | 10 |
| Controlador solar | MPW | 1 | - | 20 | 20 |
| Pantalla led | - | 4 | - | 5 | 20 |
| Cadena | Cadenilla KMC x11 | 15 | m | 32.19 | 105 |

| | |
|--------------|--------|
| TOTAL | 481.00 |
|--------------|--------|

| Materiales | Equipo | Software | |
|-------------------|---------------------|-----------------|--------------------|
| Estructura madera | Panel Solar 60 W | Autocad | <i>Tabla</i> 8. |
| Piñón 18cm | Controlador 12V10A | Excel | |
| Cadenilla KMC x11 | Motor 3 Nm | SolidWorks | |
| Tubería PVC | Sensor de Voltaje | | |
| | Sensor de corriente | | |
| | Pantalla led | | |
| | Arduino UNO R3 | | |

Resumen de materiales, equipos y software con costos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se tabula y se discute los resultados obtenidos durante el diseño, la construcción y la evaluación del proyecto de almacenamiento de energía.

4.1 Diseño del sistema

Después de realizar la matriz de criterios ponderados se comparó los modelos como se muestra en la tabla 9, en donde el sistema con múltiples bloques (Modelo B) tiene una puntuación total de 2.67 superando al sistema con un único peso (2.33). Aunque el diseño con múltiples bloques tenga un mayor costo y mayor complejidad, la capacidad de almacenamiento y de escalabilidad hizo que sea la mejor opción para este proyecto.

Tabla 9.

Resultados de los criterios ponderados.

| Criterio | Peso (%) | Ponderación | |
|-----------------------------|------------|-------------|-------------|
| | | Modelo A | Modelo B |
| Capacidad de almacenamiento | 30 | 0.33 | 0.67 |
| Diseño compuesto | 20 | 0.33 | 0.67 |
| Bajo costo | 15 | 0.67 | 0.33 |
| Bajo mantenimiento | 25 | 0.67 | 0.33 |
| Escalabilidad | 10 | 0.33 | 0.67 |
| Total | 100 | 2.33 | 2.67 |

Para el diseño del sistema se utilizó las ecuaciones mencionadas en el capítulo anterior tales como:

4.1.1 Memoria de cálculo mecánico-eléctrico en diseño

La ecuación uno para el sistema de generación de energía eléctrica se resolvió con estos datos:

$$G = n \cdot Wp \quad (1)$$

$$G = 1 * 60 Wp$$

$$G = 60 Wp$$

En donde G es la potencia total del sistema de generación, n el número de módulos fotovoltaicos y Wp es la potencia pico de cada módulo y se justificó con la tabla 10 de consumo en donde se muestra las cargas, cantidad, potencia, potencia total, uso y energía diarios.

Tabla 10.

Consumo eléctrico.

| CARGAS ELÉCTRICAS | CANTIDAD | POTENCIA (W) | POTENCIA TOTAL (W) | USO DIARIO (h) | ENERGÍA DIARIA (Wh/día) |
|--------------------------|-----------------|---------------------|---------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Motor DC | 1 | 6 | 6 | 1 | 6 |
| Foco DC | 1 | 9 | 9 | 1 | 9 |
| Cargador de celular | 1 | 33 | 33 | 1 | 33 |
| | | | 48 | Total | 48 |

La capacidad de almacenamiento de energía se calculó con la ecuación 2:

$$Ea = \eta ES \cdot g \cdot m \cdot D' \quad (2)$$

$$Ea = 0.7 \cdot 9.81 \cdot 2 \cdot 1 = 13.734 \text{ J por cada peso.}$$

Donde Ea es dada en Joule (J), ηES es la eficiencia de ida y vuelta, siendo la división entre la energía recuperada útil y la energía inicial suministrada, m es la masa del peso (kg), g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2) y D' es la distancia de la profundidad que el peso recorrerá (m) como se muestra en la figura 4.

Transformando los J a Wh podemos escribir el almacenamiento de energía con la siguiente ecuación 4:

$$Ea = 2.78 \cdot 10^{-4} (\eta ES \cdot g \cdot m \cdot D') \quad (4)$$

$$Ea = 2.78 \cdot 10^{-4} \cdot 0.7 \cdot 9.81 \cdot 2 \cdot 1 = 0.0038 \text{ Wh por cada peso.}$$

Para el volumen del peso se consideró una esfera, se usó la altura y el diámetro para completar la siguiente ecuación 5:

$$V = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \quad (5)$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot m}{\pi \cdot \rho}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 2}{\pi \cdot 7850}} = 0.0786 \text{ m} \cdot 100 \text{ cm} =$$

7.86 cm.

$$V = \frac{\pi \cdot 0.0786^3}{6} = 0.000255 \text{ m}^3$$

Para el peso con densidad ρ (kg/m³), la masa (m) del peso se expresó con la ecuación 6:

$$m = \rho \cdot V \quad (6)$$

$$m = 7850 \cdot 0.000255 = 2 \text{ kg}$$

La profundidad útil del eje para levantar el peso está representada por la ecuación 7:

$$D' = D - h \quad (7)$$

$$D = D' + h = 1 + 0.0786 = 1.0786 \text{ m}$$

Así, la capacidad total de almacenamiento de energía (Wh) también se pudo expresar mediante las ecuaciones 8 y 9:

$$Ea = 2.78 * 10^{-4} * \eta ES * (m * g * D - m * g * h) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} Ea &= 2.78 * 10^{-4} * [0.7 * (2 * 9.81 * 1.0786 - 2 * 9.8 * 0.0786)] \\ &= 0.0458 \text{ Wh.} \end{aligned}$$

$$Ea = 2.78 * 10^{-4} * \eta ES * \rho * \left(\frac{\pi d^3}{6}\right) * g * (D - h) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} Ea &= 2.78 * 10^{-4} * 0.7 * 7850 * \left(\frac{\pi * (0.0786)^3}{6}\right) * 9.81 * (1.0786 \\ &\quad - 0.0786) = 0.0458 \text{ Wh} \end{aligned}$$

Por lo tanto, la densidad de energía del sistema (Wh/m³) se puede calcular de acuerdo con la ecuación 10:

$$\rho ES = \frac{Ea}{V} = 2.78 * 10^{-4} * \rho * g * h. \quad (10)$$

$$\rho ES = \frac{0.0458}{12 * 0.000255} = 14.96 \text{ Wh/m}^3.$$

Para finalizar, la ecuación (11) presenta el cálculo de la densidad de potencia (W/m³).

$$\rho p = \frac{\rho * h * g}{3.6 * 10^3 t d} \quad (11)$$

$$td = \frac{D'}{\text{velocidad}} = \frac{100 \text{ cm}}{2 \text{ s/cm}} = 50\text{s} = 0.0139 \text{ h.}$$

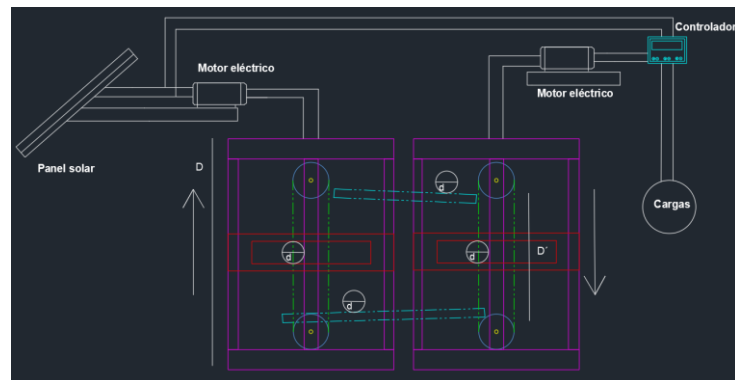
$$\rho p = \frac{7850 * 0.0786 * 9.81}{3.6 \times 10^3 * (0.0139\text{h})} = 1076 \text{ W/m}^3.$$

En donde td es el tiempo de descarga del sistema de almacenamiento en horas. Esta propiedad es válida para cualquier forma siempre que la forma del eje y del pistón sean iguales.

Además, se eligió el software Autocad para hacer el diseño tanto mecánico como eléctrico y la estructura, realizando una distribución óptima de los equipos e instrumentos como se puede visualizar en la figura 6, también se puede observar la guía de las ecuaciones y en la figura 7 el diseño eléctrico del sistema.

Figura 6.

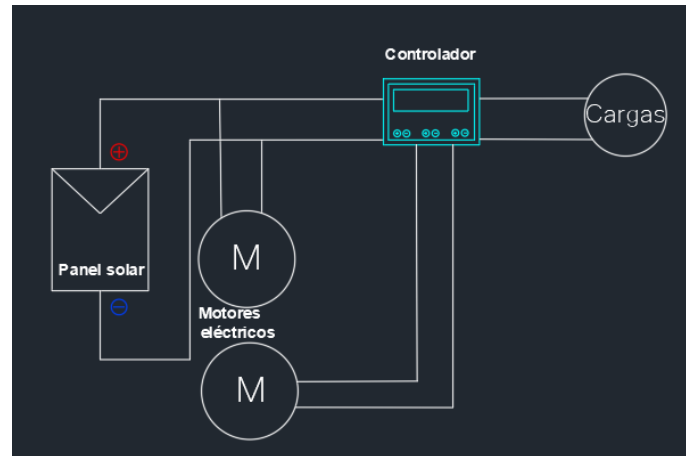
Diseño de sistema mecánico.



Nota: Guía de ecuaciones del sistema de almacenamiento mediante energía potencial gravitatoria realizado en AutoCAD 2025 - English

Figura 7.

Diseño de sistema eléctrico

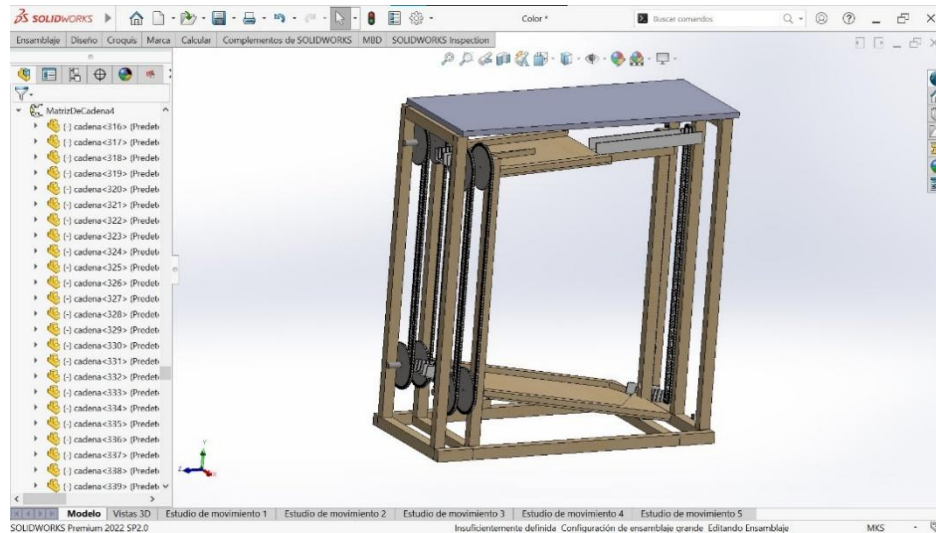


Nota: Diseño eléctrico del sistema de almacenamiento mediante energía potencial gravitatoria realizado en AutoCAD 2025 – English

Para complementar el diseño del sistema se realizó un modelo en el programa SolidWorks (figura 8) en cual permitió visualizar en 3D de forma clara y realista que un plano en 2D, esto ayudó a verificar la viabilidad del modelo de construcción antes de empezar a fabricarlo detectando errores e implementando mejoras.

Figura 8.

Diseño del sistema en 3D.



Nota: Diseño 3D del sistema de almacenamiento mediante energía potencial gravitatoria realizado en SolidWorks 2022

4.2 Construcción del sistema

Para la construcción del primer prototipo de la estructura (figura 9) se utilizó madera principalmente pensando en la sostenibilidad ambiental ya que según la IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) de 2014 afirma que la madera en construcción reduce un 30 % de las emisiones de CO₂ comparado con el hormigón y con el acero. Además, permite un mejor manejo y maleabilidad para ensamblar la estructura siendo la opción más rentable en la relación resistencia-precio.

Figura 9.

Bases de la construcción de la estructura de madera



Nota: Base de la estructura de madera inspirado en el diseño 3D elaborado anteriormente

Para la zona de transporte se pensó en tubo pvc como se muestra en la figura 10 simulando un canal por donde los pesos se deslizarán a la zona de almacenamiento superior y a la zona de almacenamiento inferior, este material permitió moldearlo y su bajo peso hizo que no sobrecarguemos a la estructura de fuerzas innecesarias.

Figura 10.

Sistema de transporte PVC



Nota: Sistema de transporte PVC y motor de la zona de ascenso conectado a cadena

Para los recorridos se implementó dos sistemas independientes, uno centrado en el ascenso y el otro en el descenso, utilizando un motor cada uno, pero con las mismas características.

4.2.1 Memoria de cálculo mecánico en construcción

El motor entrega energía mecánica para elevar la carga (sistema de ascenso). La catalina pequeña (4 cm) convierte el movimiento rotacional del motor en movimiento lineal de la cadena calculándolo de la siguiente manera:

a) Conversión de velocidad angular:

El motor gira a 15 RPM y se convirtió a rad/s

$$\omega = \frac{15 \times 2\pi}{60} = 1.571 \text{ rad/s}$$

b) Cálculo de velocidad lineal:

La velocidad tangencial en el borde de la catalina equivale a la velocidad de ascenso:

$$v_{asc} = \omega \times r = 1.571 \text{ rad/s} \times 0.02 \text{ m} = 0.0314 \text{ m/s}$$

c) Tiempo de ascenso:

Para una altura de 1.10 m:

$$t_{asc} = \frac{v_{asc}}{distancia} = \frac{0.0314}{1.10} = 35.03 \text{ s}$$

En cambio, para el sistema de bajada con generación eléctrica trabajó con las siguientes fórmulas:

d) Fuerza que ejerce cada peso

La fuerza gravitatoria que actúa sobre el peso de 2 kg es:

$$F_g = m \cdot g = 2 \text{ kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 19.62 \text{ N}$$

Si la fuerza de frenado (fuerza que extrae el generador) es:

$$F_{fren} = 18.62 \text{ N}$$

entonces la fuerza neta que acelera la masa hacia abajo es:

$$F_{net} = F_g - F_{fren} = 19.62 - 18.62 = 1.00 \text{ N}$$

Aceleración:

$$a = \frac{F_{\text{net}}}{m} = \frac{1.00}{2} = 0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Tiempo para recorrer 1 m desde reposo con:

$$t = \sqrt{\frac{2s}{a}} = \sqrt{\frac{2 * 1}{0.5}} = \sqrt{4} = 2.00 \text{ s}$$

Velocidad final:

$$v_f = a * t = 0.5 * 2 = 1.00 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

g) Análisis de cargas y esfuerzos en la estructura

La estructura se diseñó bajo el propósito de soportar el peso propio de los componentes más las cargas estáticas y dinámicas proporcionadas por las masas.

- **Análisis de las bases de soporte**

Carga total soportada (P): Las masas actúan sobre una base en donde se almacenan:

$$P = 8 \text{ pesos} * 2 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 156.96 \text{ N}$$

Área de Apoyo (A): Las bases hechas de triplex de 1cm de grosor tienen las dimensiones 50 cm X 60 cm:

$$A = 0.5 \text{ m} * 0.6 \text{ m} = 0.3$$

Esfuerzo de Compresión en la base (σ_c): De esta forma se determina la presión ejercida sobre la base:

$$\sigma_c = P / A = 156.96 \text{ N} / 0.3 \text{ m}^2 = 523.2 \text{ Pa}$$

Lo que nos indica que el esfuerzo de compresión calculado bajo comparado a la compresión del triplex que suele encontrarse en un rango de 15,000,000 a 30,000,000 Pa para direcciones paralelas a las capas.

h) Análisis de la estructura metálica

La estructura contiene 6 pilares verticales y cuatro soportes horizontales de tubo cuadrado cuyo material es acero negro y sus medidas 4x5 cm en los dos casos.

Carga por Pilar (P_{pilar}): Asumiendo una distribución equitativa de toda la carga entre los 6 pilares.

$$P_{\text{pilar}} = P_{\text{total}} / 6 = 156.96 \text{ N} / 6 = 26.16 \text{ N}$$

Cálculo de pandeo para pilares con Euler's Formula

Longitud de Pandeo (L): Para los pilares que se encuentran empotrados en la base, pero libres en el extremo superior, la longitud efectiva de pandeo es:

$$L_{\text{ef}} = 2 * L_{\text{real}}$$

$$L_{\text{ef}} = 2 * 1.5 \text{ m} = 3.0 \text{ m}$$

Momento de Inercia (I): Considerando las dimensiones de los tubos

Dimensiones externas: 40 mm x 50 mm

Dimensiones internas: 36 mm x 46 mm

$$\begin{aligned} I_x &= \frac{(50 * 40^3 - 46 * 36^3)}{12} = \frac{(50 * 64000 - 46 * 46656)}{12} \\ &\approx (3,200,000 - 2,146,176) / 12 \approx 87,818.67 \text{ mm}^4 \\ &= 8.78e - 8 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

Módulo de Elasticidad (E) del Acero:

$$E = 200 \text{ GPa} = 200 \times 10^9 \text{ Pa}$$

Carga Crítica de Pandeo (P_{cr}): Permite calcular la carga máxima que el pilar puede soportar antes de pandearse.

$$P_{cr} = (\pi^2 * E * I) / (L_{ef})^2$$

$$P_{cr} = (\pi^2 * 200e9 \text{ Pa} * 8.78e - 8 \text{ m}^4) / (3.0 \text{ m})^2$$

$$P_{cr} \approx \frac{(9.8696 * 17.56e6)}{9} \approx \frac{173.3e6}{9} \approx 19.266 \text{ N} = 19.3 \text{ kN}$$

Factor de Seguridad (N):

$$N = \frac{P_{cr}}{P_{pilar}} = \frac{19.3 \text{ kN}}{26.16 \text{ N}} \approx 737$$

Esto demuestra que los pilares son lo suficientemente robustos para soportar la carga aplicada.

Se soldó el eje de los motores a la catalina para aumentar el tamaño del eje de rotación (figura 11), a su vez, otra catalina fue soldada a un tubo de $\frac{3}{4}$ de pulgada para ser sujeta con chumaceras de la misma medida, de esta forma utilizando una cadena KMC x11 se creó el recorrido para del ascensor del sistema el cual llevará los pesos.

Figura 11

Sistema de transporte con catalina y cadena.



Nota. Sistema de transporte, catalina sujeta al motor que cumplirá la función de generador.

El panel solar fotovoltaico de 60 W se conectó a un controlador (figura12) que se encarga de mostrar la cantidad de tensión suministrada a las cargas y a nuestro sistema. Este controlador arroja 12 V de forma continua al motor de subida y cuando termine enviará toda la energía a las cargas, ya que el motor solo necesita energía durante 35.03 segundos, el resto del tiempo el panel tendrá la capacidad de suministrar energía a otros equipos.

Figura 12.

Controlador solar

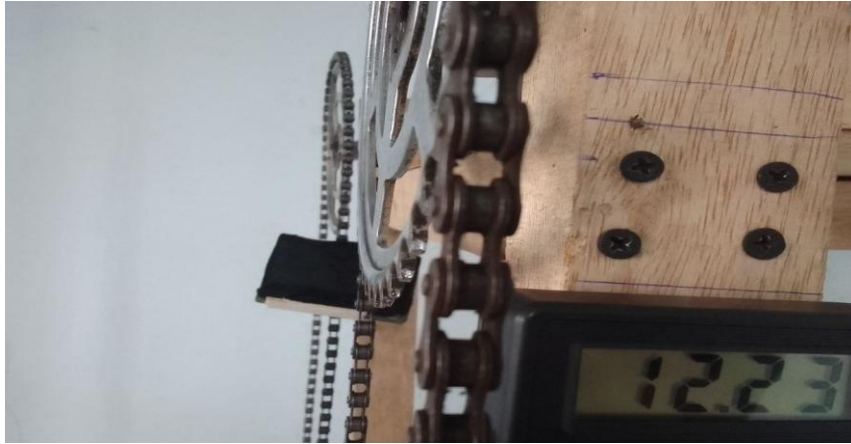


Nota. Este equipo permitió monitorear la energía entregada por el panel y la energía entregada a nuestro equipo.

A la salida del sistema se encuentran los sensores para poder visualizar la energía entregada por cada uno de los motores como se muestra en la figura 13, todo el sistema se visualiza en la figura 14.

Figura 13.

Sensor de voltaje



Nota. Sensores con capacidad de medir conexión en serie o paralelo

Figura 14.

Sistema de almacenamiento de energía



4.3 Evaluación del sistema

Se realizaron ciclos completos de carga y descarga para poder evaluar al sistema en diferentes áreas y a posterior determinar la eficiencia y comparación con otros sistemas.

4.3.1 Análisis de costos del sistema de almacenamiento

Este análisis se realizó considerando el costo de capital inicial, correspondiente a la adquisición de los materiales, equipos y componentes que se usaron en su construcción.

a) Costos de capital inicial

El desglose detallado del costo de los materiales y equipos se presentaron en la tabla del capítulo anterior el cuál ascendió a US\$ 481.00 Este valor refleja la suma de los precios unitarios de cada componente.

b) Modelo de costo operativo y de mantenimiento

El modelo de costos se centró en un mantenimiento preventivo simple y de bajo costo enfocado en garantizar la operatividad a lo largo de su vida útil organizado en la tabla 11 también se consideró que el sistema no está conectado a la red eléctrica, así que se consideró como consumo nulo.

Tabla 11.

Costo por mantenimiento

| Concepto de Mantenimiento | Descripción / Frecuencia | Costo Anual (\$) |
|-------------------------------------|---|------------------|
| Lubricación y limpieza | Lubricante y materiales de limpieza. | 5.00 |
| Sustitución preventiva de la cadena | Reposición cada 5 años. Costo de la cadena: US\$105.00. | 21.00 |
| Costo operativo Anual Total | Suma de los conceptos anteriores | 26.00 |

4.3.2 Análisis de vida útil proyectada del sistema

Para el análisis de durabilidad del sistema se consideró la fatiga y el desgaste de los componentes críticos así estimar la vida útil en ciclos de los elementos sostenidos a cargas cíclicas.

a) Análisis de fatiga de la cadena de transmisión

Uno de los componentes más afectados desde el punto de vista mecánico es la cadena KMC x11, siendo la encargada de transmitir la potencia y el transporte de los pesos.

La fuerza máxima de tracción de la cadena está determinada por la fuerza de frenado que ejerce el generador (18.62 N). Se consideró un factor de seguridad de 3 para prever picos de carga y esfuerzos dinámicos triplicando la fuerza de tracción (55.86 N)

EL esfuerzo de tracción del eslabón se calculó sobre el área transversal de uno de los eslabones. El diámetro de del alambre de eslabón es de aproximadamente de 2.5 mm (0.0025 m).

$$\begin{aligned} \text{Transversal (A)} &= \pi * (d/2)^2 = \pi * (0.0025/2)^2 \\ &\approx 4.91 \times 10^{-6} \text{ m}^2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Esfuerzo de Trabajo } (\sigma) &= F_{\text{diseño}} / A = 55.86 \text{ N} / 4.91 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \\ &\approx 11.37 \text{ MPa}. \end{aligned}$$

La cadena está hecha en acero al carbono con una resistencia a la tracción de aproximadamente 700 MPa. Para aceros, el límite de fatiga se puede estimar como:

$$\begin{aligned} \text{Límite fatiga}' &= 0.5 * \text{resistencia a la tracción cuando esta sea} \\ &< 1400 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

$$\text{Límite de fatiga}' = 0.5 * 700 \text{ MPa} = 350 \text{ MPa}$$

El límite de fatiga (LF) debe ser ajustado por factores reales con la ecuación:

$$LF = K_a * K_b * K_c * K_d * K_e * K_f * \text{límite de fatiga}'$$

K_a (Factor de superficie): Del acero laminado en caliente = 0.7.

K_b (Factor de tamaño): Para un diámetro de 2.5 mm = 0.95.

K_c (Factor de carga): Para carga de flexión (ocurre en pasadores de eslabones) = 1.

Kd (Factor de temperatura): En temperatura ambiente = 1.

Ke (Factor de confiabilidad): Confiabilidad del 90 % = 0.90.

Kf (Factor de efectos varios): Considerando la mella entre eslabones = 0.9.

Límite de fatiga = $0.7 * 0.95 * 1 * 1 * 0.90 * 0.9 * 350 \text{ MPa} \approx 169 \text{ MPa}$.

Ya que el esfuerzo de trabajo es significativamente menor que el límite de fatiga, la cadena no corre un riesgo significativo. Esto indica que no se espera una falla por fatiga durante ciclos de carga y descarga.

b) Análisis de desgaste en catalinas y cadena

Se consideró el desgaste abrasivo que incrementa el paso de la cadena y puede llevar a un mal engrane.

Material de las Catalinas: Las catalinas son de acero al carbono sin tratamiento térmico superficial, con una dureza Brinell (HB) de aproximadamente 150.

Tasa de Desgaste Estimada: Basado en datos empíricos para pares acero-acero con lubricación intermitente, se espera un desgaste de 0.2 mm por cada 10,000 ciclos en los bujes de la cadena y en los dientes de la catalina.

Criterio de Fin de Vida Útil: Se estableció un desgaste máximo permitido en el diámetro de la catalina de 1.5 mm, en este punto el acoplamiento cadena-catalina se vuelve ineficiente.

Vida útil por desgaste:

$$\begin{aligned} \text{Vida Útil (ciclos)} &= \frac{(\text{Desgaste Máximo Permitido})}{(\text{Tasa de Desgaste})} \\ &= 1.5 \text{ mm} / (0.2 \text{ mm} / 10,000 \text{ ciclos}) = 75,000 \text{ ciclos.} \end{aligned}$$

Este cálculo indica la vida útil del sistema, estando limitado por el desgaste de las catalinas, siendo a aproximadamente 75,000 ciclos, lo que equivale a unos 20 años de operación a 10 ciclos por día, confirmando una robustez adecuada para el prototipo.

4.3.3 Análisis de la densidad Energética del sistema

Este valor cuantifica la cantidad de energía eléctrica que puede ser recuperada por unidad de volumen que ocupa el sistema. La realización del cálculo inició con la determinación de la energía potencial máxima teórica almacenable y después se relacionó esta energía con el volumen física total del prototipo.

a) Principio de operaciones del generador y punto de operación

Usando un motor Dc como si fuera un generador, nos permite convertir esta energía mecánica en eléctrica. La fuerza de la masa ($m \cdot g$) al momento del descenso es la que genera el par mecánico (τ_{motor}) en el eje del motor, esta fuerza es transmitida a través del sistema de cadenas y catalinas en una relación de transmisión ($n=20$). De esta forma, el par y la velocidad angular (ω_{motor}) del rotor, definen el punto de operación mecánica del generador.

La potencia eléctrica instantánea de salida se calculó tomando el voltaje y la corriente generados en los terminales del motor en el punto de generación. Estos parámetros eléctricos están ligados a las variables mecánicas a través de las constantes del motor, la constante de voltaje (K_v) y la constante de par (K_t), donde

$$V \approx K_v \cdot \omega; \tau \approx K_t \cdot I$$

Estos datos fueron obtenidos en el punto de operación:

Voltaje generado (V)= 12.0 V

Corriente generada (I)= 0.41 A

Potencia eléctrica instantánea:

$$P_{elec} = V \cdot I = 12.0 \cdot 0.41 \approx 4.92 \text{ W}$$

b) Metodología experimental y cálculo de la energía eléctrica recuperada

Para determinar la energía eléctrica generada se realizaron 60 pruebas agrupadas en 5 grupos experimentales con una masa de 2 kg por cada peso (8 pesos) descendiendo de manera secuencial desde una altura útil de 1.00 m. Los grupos tomaron la media de 12 datos, siendo clasificados por la hora en la que fueron tomados. Durante cada caída se utilizó un sistema de adquisición de datos para registrar la variación del voltaje con respecto al tiempo (V_t) y la corriente (I_t) en los terminales del generador con un muestreo de 10 Hz.

Después la energía eléctrica total recuperada (E_{elec}) se obtuvo mediante integración numérica de la potencia en función del tiempo considerando que la potencia se calculó mediante:

$$P_t = V_t \cdot I_t$$

Empleando la regla del trapecio aplicada a los datos discretos

$$E_{elec} = \int_0^{t_{total}} P_t dt$$

Los datos presentados en la tabla 12 muestran una generación en el sistema equivalente a 4.95 W en promedio durante un ciclo completo de 8 pesos liberados secuencialmente, con una duración de 24.5 segundos en promedio.

Tabla 12.

Resultado de las pruebas experimentales

| Grupos | Tiempo de Descarga (s) | Energía Eléctrica (J) | Energía Eléctrica (Wh) | Potencia Promedio (W) |
|-----------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| 1 | 24.5 | 121.2 | 0.0337 | 4.95 |
| 2 | 24.3 | 119.8 | 0.0333 | 4.93 |
| 3 | 24.7 | 122.6 | 0.0341 | 4.96 |
| 4 | 24.4 | 120.6 | 0.0335 | 4.94 |
| 5 | 24.6 | 121.9 | 0.0339 | 4.95 |
| Promedio | 24.5 | 121.2 | 0.0337 | 4.95 |

a) Cálculo de la Eficiencia del sistema

La eficiencia de conversión del sistema (η_{ES}) se define como la relación entre energía eléctrica recuperada y la energía potencial gravitatoria inicial.

$$\eta_{ES} = \frac{E_{potencial}}{E_{elec}}$$

Con:

$$E_{potencial} = m * g * h = 16 * 9.81 * 1.00 = 156.96 \text{ J}$$

y

$$E_{elec} = 121.2 \text{ J}$$

se obtiene:

$$\eta_{ES} = \frac{121.2}{156.96} \approx 0.772 \Rightarrow 77.2 \%$$

Este valor de eficiencia (77 %) valida la eficiencia del sistema de transmisión electromecánica del motor generador en un ciclo de pesos liberados secuencialmente.

b) Simulación del desempeño del sistema y enjambre de gatos

Se desarrolló un modelo de simulación llamado enjambre de gatos como se menciona en la sección 2.4 del capítulo 2, este resuelve las ecuaciones fundamentales del sistema como las electromecánicas para distintas combinaciones entre altura y masa, con la finalidad de predecir comportamientos dinámicos y validar los resultados experimentales. Las variables de entrada consideradas fueron: masa de los pesos (m), altura de liberación (h), relación de transmisión (n) y parámetros del motor (constante de par (Kt) y resistencia interna (R))

Fuerza y par:

$$F = m * g - m * a$$

$$\tau_{\text{catalina}} = F * r_{\text{catalina}}$$

$$\tau_{\text{motor}} = \frac{\tau_{\text{catalina}}}{n}$$

La fuerza neta F es la diferencia entre el peso aplicado y la fuerza asociada a la aceleración del sistema. Esta fuerza se convierte en un par en la catalina y esta se reduce al eje del motor según la relación de transmisión.

Corriente y voltaje:

$$I = \frac{\tau_{\text{motor}}}{K_t}; V = K_v * \omega - I * R$$

La corriente generada es proporcional al par en el motor mediante la constante K_t . Al mismo tiempo, el voltaje en los terminales se calcula con la velocidad angular y la caída de tensión interna por la resistencia del bobinado.

Potencia y aceleración:

$$P_{\text{elec}} = V * I ; \quad a = \frac{F \cdot r_{\text{tambor}} - \tau_{\text{pérdidas}}}{m \cdot r_{\text{tambor}}^2 + I_{\text{motor}} \cdot n^2}$$

La potencia eléctrica instantánea es el producto entre el voltaje (V) y la corriente (I). La aceleración (a) se determinó considerando el balance dinámico entre la fuerza aplicada, las pérdidas mecánicas y la inercia equivalente reflejada a la catalina.

Con esto se puede simular distintas combinaciones de voltaje, corriente y potencia para distintos escenarios. El enjambre de gatos muestra como variaciones de ± 2 kg en la masa y ± 0.1 m en la altura alteran la potencia generado y el tiempo de descarga.

4.3.4 Análisis de impacto ambiental

Se realizó un life cycle assessment (análisis del ciclo de vida) para evaluar la sostenibilidad del sistema, considerando las fases de producción de los materiales, transporte, operación y fin de su vida útil.

a) Metodología y alcance del análisis

El análisis del ciclo de vida (ACV) se basó en el enfoque de “de la cuna a la tumba” cuyo principio es analizar no solo la generación energética sino las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) expresadas en dióxido de carbono equivalente (CO₂e) que se produjeron durante toda la vida del sistema desde los materiales que componen a los equipos principales hasta la etapa en donde terminan inutilizables.

Unidad funcional: Un sistema de almacenamiento con capacidad de 4.92 W por ciclo completo

Límites del sistema:

Producción de materiales, transporte de componentes y operación (sin incluir manufactura de componentes)

Horizonte de tiempo: Vida útil estimada de 20 años

Los datos de la energía embebida y factores de emisión de CO₂e para cada material se obtuvieron de la base de datos Ecoinvent v3 presentados en la tabla 13.

Tabla 13.

Factores de impacto ambiental por material

| Material | Energía Embebida (MJ/kg) | Factor de Emisión de CO ₂ e (kg CO ₂ e/kg) |
|--|--------------------------|--|
| Acero (estructura, pesos, cadena) | 35 | 2.8 |
| Madera de Pino (estructura inicial) | 2.5 | 0.5 |
| PVC (tuberías) | 70 | 2.4 |
| Silicio (Panel Solar, 60W) | 4,500 MJ/kWp | 450 kg CO ₂ e/kWp |
| Electrónica (motores, controlador, sensores) | 150 | 12 |

b) Inventario de masas y cálculo de impactos en la fase de producción

Tomando la lista de materiales se construyó el inventario de masas para el prototipo final (con estructura de acero) mostrado en la tabla 14.

Tabla 14.

Inventario de masas y cálculo de impactos

| Componente | Material Principal | Masa Estimada (kg) | Energía Embebida (MJ) | Emisiones de CO ₂ e (kg) |
|--------------------------------------|------------------------|--------------------|--------------------------------------|--|
| Estructura (6 pilares, 4 travesaños) | Acero | 15 | 15.0 kg * 35 MJ/kg = 525.0 | 15.0 kg * 2.8 kg CO ₂ e/kg = 42.0 |
| 12 Pesos (esferas) | Acero | 24 | 24.0 kg * 35 MJ/kg = 840.0 | 24.0 kg * 2.8 kg CO ₂ e/kg = 67.2 |
| Cadena KMC x11 (15m) | Acero | 2.5 | 2.5 kg * 35 MJ/kg = 87.5 | 2.5 kg * 2.8 kg CO ₂ e/kg = 7.0 |
| Catalinas y Piñones | Acero | 1.5 | 1.5 kg * 35 MJ/kg = 52.5 | 1.5 kg * 2.8 kg CO ₂ e/kg = 4.2 |
| Tubería PVC | PVC | 1 | 1.0 kg * 70 MJ/kg = 70.0 | 1.0 kg * 2.4 kg CO ₂ e/kg = 2.4 |
| Panel Solar (60 Wp) | Silicio y componentes. | 5 | (4,500 MJ/kWp * 0.06 kWp) = 270.0 | (450 kg CO ₂ e/kWp * 0.06 kWp) = 27.0 |
| Motores, Controlador, Sensores | Electrónica | 2 | 2.0 kg * 150 MJ/kg = 300.0 | 2.0 kg * 12 kg CO ₂ e/kg = 24.0 |
| TOTAL. FASE DE PRODUCCIÓN | | 51.0 kg | Σ = 2,145.0 MJ | Σ = 173.8 kg CO ₂ e |

c) Fase de transporte

Se estimó que los materiales fueron transportados una distancia promedio de 100km por carretera en un camión ligero. El factor de emisión para el transporte por carretera se considera como 0.2 kg CO₂e/tonelada-kilómetro

$$\begin{aligned}
 \text{Emisiones Transporte} &= \text{Masa Total} * \text{Distancia} * \text{Factor} \\
 &= 0.051 \text{ ton} * 100 \text{ km} * 0.2 \text{ kg CO}_2\text{e/t} \cdot \text{km} \\
 &= 1.02 \text{ kg CO}_2\text{er}^2
 \end{aligned}$$

Resultando insignificante al impacto del transporte (<1 %) en comparación a la fase de producción.

d) Fase de operación

En este apartado se presenta el mayor beneficio ambiental del sistema ya que opera con energía solar y no requiere insumos durante su funcionamiento, siendo cero sus emisiones directas.

Energía generada en la vida útil: Con 10 ciclos/día, la energía generada diaria es

$$0.0621 \text{ Wh/ciclo} * 10 \text{ ciclos/día} = 0.621 \text{ Wh/día.}$$

Para una vida útil de 20 años:

$$\text{Energía Total} = 0.621 \text{ Wh/día} * 365 \text{ días/año} * 20 \text{ años} = 4,533.3 \text{ Wh} = 4.53 \text{ kWh.}$$

Emisiones evitadas: Se utilizó el factor de emisión promedio de la red eléctrica peruana, aproximadamente 0.5 kg CO_{2e}/kWh.

$$\text{Emisiones Evitadas} = 4.53 \text{ kWh} * 0.5 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh} = 2.27 \text{ kg CO}_2\text{e.}$$

e) Fase de fin de vida

Se consideró un escenario optimista de reciclaje:

Acero (43 kg): El reciclaje del acero ahorra aproximadamente un 70 % de la energía y emisiones asociadas a la producción primaria. Por lo tanto, se contabiliza como un crédito negativo (ahorro).

$$\text{Ahorro Energía} = 43 \text{ kg} * 35 \text{ MJ/kg} * 0.70 \approx 1,053.5 \text{ MJ.}$$

Ahorro Emisiones = $43 \text{ kg} * 2.8 \text{ kg CO}_2\text{e/kg} * 0.70 \approx 84.3 \text{ kg CO}_2\text{e}$.

Electrónica (7 kg): Se asume un reciclaje parcial con un ahorro del 30 %.

Ahorro Energía = $7 \text{ kg} * (\text{promedio } 300 \text{ MJ/kg}) * 0.30 \approx 630 \text{ MJ}$.

Ahorro Emisiones = $7 \text{ kg} * (\text{promedio } 15 \text{ kg CO}_2\text{e/kg}) * 0.30 \approx 31.5 \text{ kg CO}_2\text{e}$.

PVC (1 kg): Se considera incineración con recuperación de energía, con un impacto neto cercano a cero.

En cuanto a la energía embebida se observó que el balance neto de energía positiva (+461.5 MJ) siendo la energía invertida en fabricar el sistema la cuál no se recupera a través de la energía que genera durante su operación. Esto se preveía debido a la escala del prototipo. Manteniendo su larga vida útil; se estima que, si el sistema se escalara, la relación mejoraría significativamente.

La huella de carbono total del prototipo a lo largo de su vida útil es de 56.7 kg de CO₂e. El reciclaje al final de la vida implica una reducción de la huella inicial en más de un 65%.

Comparación con Otras Tecnologías: Una batería de ion-litio de pequeña escala (por ejemplo, para almacenar 50 Wh) podría tener una huella de carbono de entre 30 y 100 kg CO₂e, pero con una vida útil típica de 3-5 años, mucho menor a los 20 años de este sistema. Esto sugiere que, a largo plazo, el sistema de gravedad podría ser competitivo en términos de emisiones por año de servicio.

La principal ventaja ambiental confirmada es la ausencia de químicos tóxicos y la facilidad de reciclaje de sus componentes principales (acero), a diferencia de las baterías.

4.3.5 Análisis estadístico de la eficiencia del sistema

Para poder aplicar la prueba *t de Student* se realizó una prueba de normalidad con los datos que se encuentran en la tabla valores experimentales que se pueden observar en Anexos 1.

La variable de interés es la eficiencia experimental η_i (%), ya que es el resultado medido en cada repetición experimental constituyendo la variable continua que se desea comparar con un valor teórico o de referencia.

Las variables E_{elec} y E_{pot} corresponden a magnitudes físicas de entrada por lo que no son objeto de la prueba *t*. Por tanto, los datos utilizados para la prueba de normalidad son η_i (%) con un tamaño muestral $n = 15$

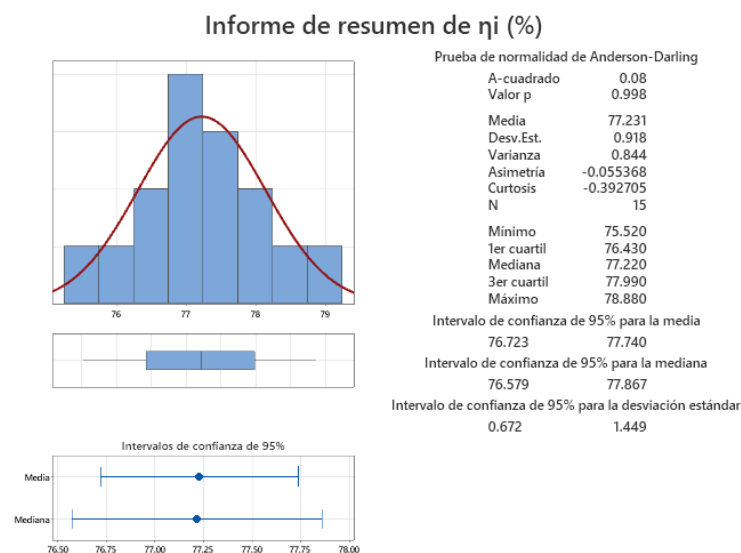
Dado que el tamaño muestral es menor que 50 como se puede ver en la figura 15, se empleó la prueba de Anderson-Darling recomendada para muestras pequeñas.

La distribución de los datos se evaluó mediante un histograma con ajuste a una distribución normal y un diagrama de caja, los cuales muestran una distribución aproximadamente simétrica, sin presencia de valores atípicos relevantes, esta observación se ve respaldada por los valores de asimetría (-0.055) y curtosis (-0.393), los cuales indican un comportamiento cercano al de una distribución normal. La normalidad de los datos se verificó con la prueba de Anderson-Darling, obteniéndose un valor *p* de 0.998, superior al nivel de significancia adoptado ($\alpha = 0.05$). En consecuencia, no se rechaza la hipótesis de normalidad, por lo que los

datos pueden considerarse provenientes de una población con distribución normal. La eficiencia presenta una media de 77.23 % y una desviación estándar de 0.918 %, lo que demuestra una dispersión reducida entre las mediciones y una adecuada consistencia del comportamiento del sistema. El intervalo de confianza del 95 % para la media se encuentra entre 76.72 % y 77.74 %, lo que delimita el rango en el que se espera que se ubique la eficiencia promedio real del sistema. En función de los resultados obtenidos, se concluye que los datos cumplen con el supuesto de normalidad y presentan una variabilidad controlada, lo que justifica la aplicación de la prueba t de Student para una muestra como herramienta de comparación entre la eficiencia media del sistema propuesto y los valores de referencia reportados para tecnologías convencionales de almacenamiento energético.

Figura 15

Pruebas de normalidad Anderson-Darling para sistemas de almacenamiento GES



Después de realizar la prueba de normalidad se comparó la eficiencia media del sistema propuesto con la eficiencia media de un sistema de almacenamiento ion

litio con un valor de $\mu_0 = 85 \%$, usando una prueba t de Student mediante el software minitab y se formularon las siguientes hipótesis estadísticas:

- Hipótesis nula (H_0): $\mu = 85 \%$
- Hipótesis alternativa (H_1): $\mu > 85 \%$

El contraste se realizó con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. A partir de los 15 datos experimentales, se obtuvo una media muestral de 77.23% , con una desviación estándar de 0.918% y un error estándar de 0.237% , lo que indica una variabilidad reducida y una estimación correcta de la media. El estadístico de prueba calculado fue $t = -32.76$, con un valor $p = 1.000$, valor muy superior al nivel de significancia establecido. En consecuencia, no se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que no existe evidencia estadística que permita afirmar que la eficiencia media del sistema propuesto sea superior al 85% . Las representaciones gráficas (histograma, gráfica de valores individuales y diagrama de caja) como se visualizan en las figuras 16, 17 y 18 respectivamente, muestran que la totalidad de los valores de eficiencia se encuentran por debajo del valor planteado en la hipótesis nula, y que el intervalo de confianza del 95% para la media no incluye el valor de 85% , lo que permite visualizar el resultado obtenido mediante la prueba t. Los resultados propuestos por el software presentan una eficiencia significativamente inferior a la del sistema de referencia con eficiencia del 85% , lo que confirma que el desempeño del sistema se encuentra por debajo del nivel alcanzado por tecnologías de mayor eficiencia, como las baterías de ion-litio.

Figura 16
Histograma comparación con eficiencia del 85%

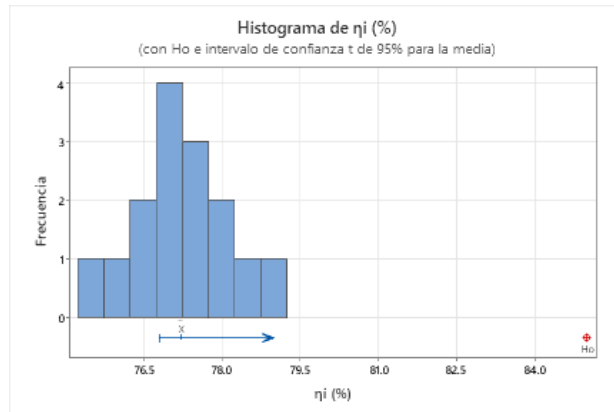


Figura 17
Valores individuales comparación con eficiencia del 85%

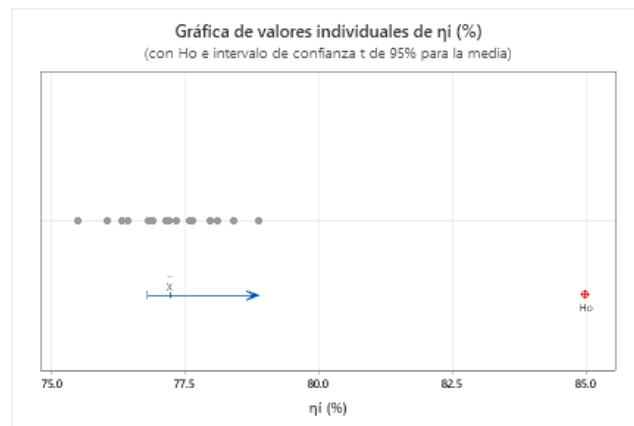
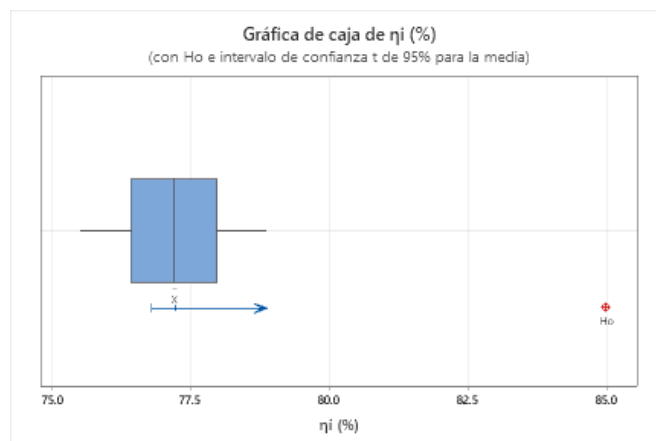


Figura 18
Diagrama de caja comparación con eficiencia del 85%



Después, se comparó la eficiencia del sistema presentado con la eficiencia de los sistemas de almacenamiento hidráulico por bombeo con un valor de $\mu_0 = 80$ %, con el objetivo de evaluar cual es el sistema con mayor eficiencia, se aplicó una prueba t de Student para una muestra, considerando los supuestos de normalidad previamente verificados.

Se establecieron las siguientes hipótesis estadísticas nuevamente:

Hipótesis nula (H_0): $\mu = 80$ %

Hipótesis alternativa (H_1): $\mu > 80$ %

El contraste se realizó con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. A partir de los 15 datos experimentales, se obtuvo una media muestral de 77.23 %, con una desviación estándar de 0.918 % y un error estándar de 0.237 %, lo que refleja una variabilidad reducida de los datos y una estimación confiable de la media.

El estadístico de prueba calculado fue $t = -11.67$, con un valor $p = 1.000$, valor claramente superior al nivel de significancia adoptado. En consecuencia, no se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que no existe evidencia estadística que permita afirmar que la eficiencia media del sistema sea superior al 80 %. Las representaciones gráficas (histograma, valores individuales y diagrama de caja) mostradas en las figuras 19, 20, 21 muestran que la totalidad de los datos se concentran por debajo del valor planteado en la hipótesis nula, y que el intervalo de confianza del 95 % para la media no alcanza el valor de 80 %, lo que refuerza la decisión estadística obtenida mediante la prueba t. En conjunto, los resultados indican que el sistema propuesto presenta una eficiencia estadísticamente inferior a la del sistema de referencia considerado, lo que permite ubicar su desempeño dentro

de un rango intermedio respecto a tecnologías convencionales, sin alcanzar el nivel de eficiencia del sistema con referencia del 80 %.

Figura 19

Histograma comparación con eficiencia del 80%

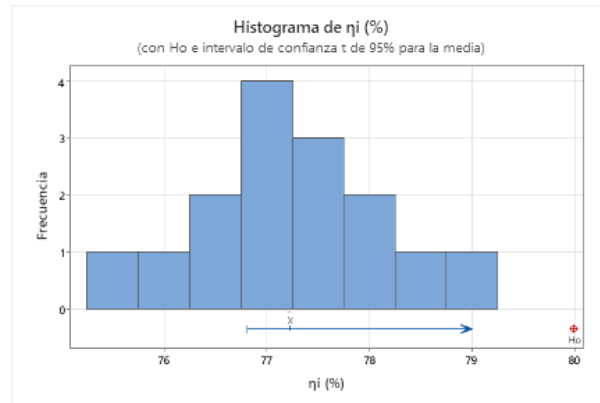


Figura 20

Valores individuales comparación con eficiencia del 80%

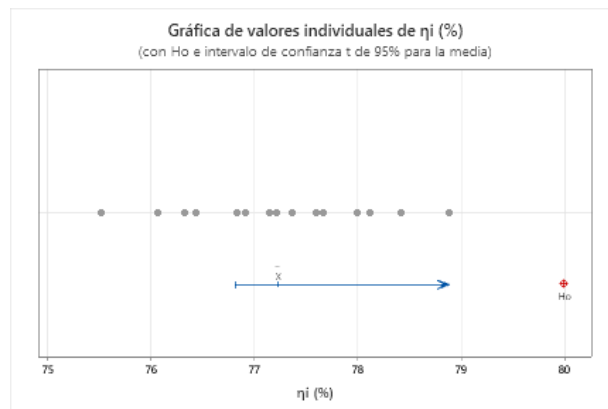
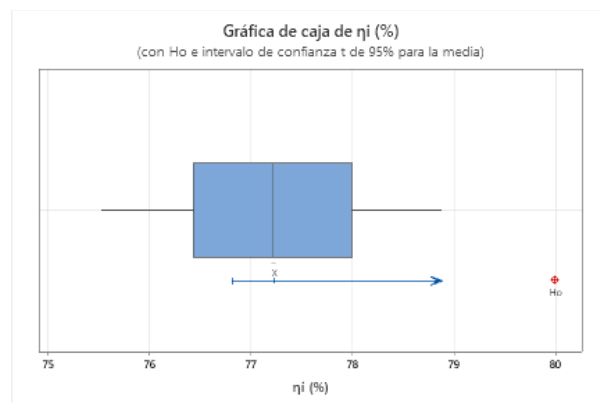


Figura 21

Diagrama de caja comparación con eficiencia del 80%



Con el fin de evaluar si la eficiencia media del sistema propuesto es significativamente superior a la eficiencia reportada para un equipo de referencia, se aplicó una prueba t de Student para una muestra, tomando como valor de comparación una eficiencia de $\mu_0 = 75 \%$. Esta prueba permite contrastar estadísticamente la media poblacional de la eficiencia del sistema con un valor de referencia específico, bajo el supuesto de normalidad previamente verificado. Se plantearon las siguientes hipótesis estadísticas: Hipótesis nula (H_0): $\mu = 75 \%$ Hipótesis alternativa (H_1): $\mu > 75 \%$ El contraste se realizó con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

A partir de los 15 datos experimentales, se obtuvo una media muestral de 77.23 %, con una desviación estándar de 0.918 % y un error estándar de 0.237 %, lo que indica una baja dispersión de los valores y una estimación precisa de la media.

El estadístico de prueba calculado fue $t = 9.41$, con un valor $p = 0.000$, inferior al nivel de significancia establecido. En consecuencia, se rechaza la hipótesis nula, concluyéndose que la eficiencia media del sistema es estadísticamente mayor que la eficiencia del equipo de referencia considerada (75 %). La representación gráfica mediante el histograma, la gráfica de valores individuales y el diagrama de caja que se ven en la figura 22, 23 y 24 respectivamente, muestra que la totalidad de los datos se concentran por encima del valor planteado en la hipótesis nula, y que el intervalo de confianza del 95 % para la media no incluye el valor de 75 %, lo que refuerza la decisión estadística obtenida mediante la prueba t.

En conjunto, estos resultados evidencian que el sistema propuesto presenta un desempeño superior al del equipo de referencia, no solo desde un punto de vista descriptivo, sino también con respaldo estadístico, confirmando que la diferencia observada no se debe a la variabilidad experimental sino a una mejora real en la eficiencia del sistema.

Figura 22
Histograma comparación con eficiencia del 75%

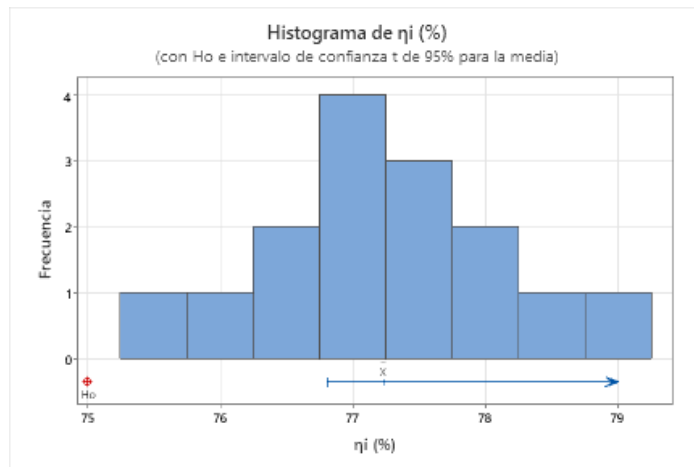


Figura 23
Valores individuales comparación con eficiencia del 75%

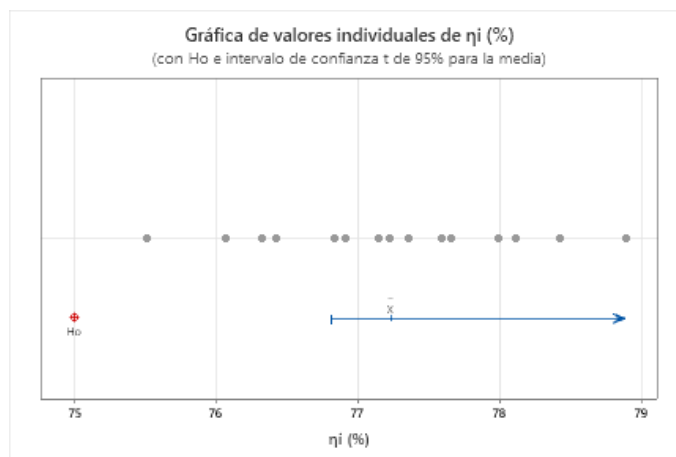
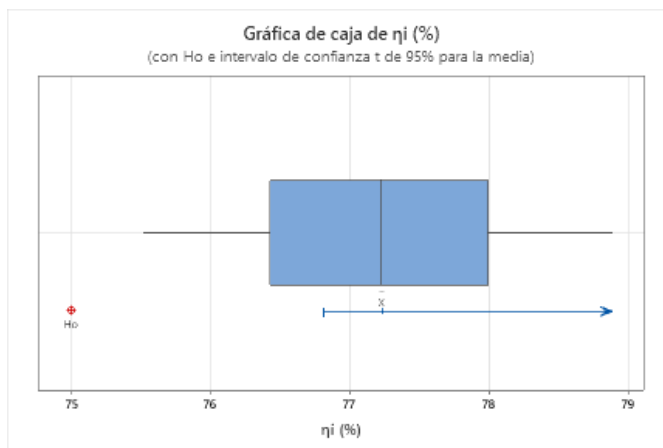


Figura 24
Diagrama de caja comparación con eficiencia del 75%



Al comparar el sistema propuesto con tecnologías de mayor eficiencia, como las baterías de ion-litio ($\mu_0 = 85\%$), los resultados estadísticos muestran una diferencia claramente significativa, con valores de eficiencia experimental completamente por debajo del valor de referencia.

Este resultado es coherente con lo mencionado por Botha y Kamper, (2019), quienes señalan que los sistemas de almacenamiento alternativos, especialmente los mecánicos o gravitacionales, suelen presentar eficiencias globales inferiores debido a pérdidas asociadas a fricción, conversión electromecánica y control del sistema. Por tanto, el hecho de que el sistema propuesto no alcance la eficiencia de tecnologías electroquímicas consolidadas, no constituye una anomalía sino que se alinea con las tendencias reportadas en la literatura especializada.

De manera similar, la comparación con sistemas de almacenamiento hidráulico por bombeo ($\mu_0 = 80\%$) evidencia que la eficiencia del sistema propuesto también es estadísticamente inferior a este tipo de tecnología. Según Emrani et al., (2022) los sistemas hidráulicos a gran escala logran eficiencias superiores principalmente gracias a economías de escala, infraestructura optimizada y menores

pérdidas relativas durante el ciclo de carga y descarga. En contraste, los sistemas de menor escala o de carácter experimental, como el desarrollado en esta investigación, enfrentan limitaciones estructurales que impactan negativamente la eficiencia global. La comparación con un equipo de referencia de menor eficiencia ($\mu_0 = 75\%$) muestra que el sistema propuesto presenta una mejora estadísticamente significativa, confirmada tanto por la prueba t de Student como por las representaciones gráficas. Este resultado es consistente con lo discutido por Mitali et al., (2022), quienes enfatizan que uno de los principales aportes de sistemas alternativos de almacenamiento no radica necesariamente en superar a las tecnologías dominantes, sino en ofrecer mejoras reales frente a soluciones convencionales de menor desempeño, especialmente en contextos donde factores como costo, simplicidad mecánica o disponibilidad de materiales resultan relevantes. En este sentido, el sistema desarrollado demuestra un avance cuantificable y respaldado estadísticamente frente a tecnologías de referencia menos eficientes.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones recopiladas durante el desarrollo de todo este proyecto y las recomendaciones que se concluyen para mejorar este prototipo así mismo el cómo este proyecto puede introducirse en la sociedad.

4.1 Conclusiones

El sistema de almacenamiento de energía mediante energía potencial gravitatoria da como resultado como una alternativa que ayuda al medio ambiente frente a las tecnologías de almacenamiento electroquímico convencionales. Estos resultados demuestran este concepto, destacando que la principal fortaleza de la tecnología no es una alta densidad energética, sino en una mayor longevidad y sostenibilidad.

El análisis de durabilidad proyectó una vida útil superior a los 20 años, limitada principalmente por el desgaste de componentes mecánicos sencillos y fácilmente reemplazables, como la cadena y las catalinas. Este aspecto llega a ser competitivo con la vida útil de las baterías de ion-litio que es de entre 3 a 10 años, las cuales sufren degradaciones químicas irreversibles. Adicionalmente, al realizar el análisis de ciclo de vida confirmó un perfil ambiental positivo, con una huella de carbono total de 56.7 kg CO₂ de carbono equivalente para el prototipo; además, al reciclar los componentes metálicos al final de su vida útil, aporta un crédito significativo, evitando la generación de residuos peligrosos.

La construcción y evaluación del prototipo a escala de laboratorio demostraron una viabilidad del sistema. Este operó con una eficiencia media

significativa del 77.2 %, manteniendo una variación inter-ciclos menor al 5 %, lo que indica un rendimiento confiable bajo condiciones controladas.

La funcionalidad del sistema fue validada al almacenar energía proveniente de un panel solar y recuperarla para alimentar cargas DC, como una luminaria y un cargador de celular, cumpliendo con el objetivo de ser una solución útil en aplicaciones de diferentes tamaños.

Si bien la eficiencia está limitada por pérdidas mecánicas como la fricción en rodamientos y transmisiones, el sistema representa un avance en cuanto a concepto como alternativas de gestión energéticas descentralizada. El análisis del sistema determinó que este puede implementarse utilizando materiales reciclables y de bajo costo, lo que facilita su construcción local e incentiva la economía circular. Además, su fácil mantenimiento permite la participación de personas que no cuenten con años de experiencia si no que con capacitaciones pueden permitirse entrar al mundo de las energías renovables fortaleciendo la autonomía energética. En comparación con los sistemas convencionales, este enfoque minimiza el impacto ambiental y social, evitando la generación de desechos peligrosos y reduciendo costos a largo plazo.

4.2 Recomendaciones

A partir de los resultados y los conocimientos adquiridos en el desarrollo y evaluación de este prototipo, se identifican varias líneas de acción para fortalecer el rendimiento del sistema, ampliar sus aplicaciones y consolidarlo como una solución de almacenamiento sostenible. Las consideraciones se agrupan en mejoras técnicas, validación operativa y estrategias de disseminación.

Una propuesta para mejorar este sistema consiste en aumentar la cantidad de motores-generadores en paralelo. Según los datos se prevé que cada motor-generador puede entregar una potencia de 4.95 W aproximadamente. La incorporación de un motor más en el sistema de descenso, acoplado a la misma cadena cinemática, permitiría duplicar la potencia de salida hasta 10.0 W aproximadamente, sin modificar significativamente la estructura mecánica, mejorando la densidad de la potencia del sistema.

También se considera que la energía almacenada es directamente proporcional a la altura de descenso. Si se aumenta la altura útil de descenso de 1.00 m que es la altura actual a 2.50 m, por ejemplo, aumentaría la energía potencial por peso en un 150 %, pasando de 18.62 J a 46.55 J. Esto permitiría almacenar más energía en el mismo volumen de pesos o reducir el número de pesos necesarios para la misma capacidad, optimizando el espacio. Un diseño vertical más alto podría facilitar este incremento.

La eficiencia del sistema (77.2 %) está limitada principalmente por pérdidas mecánicas. Se recomienda sustituir rodamientos simples por rodamientos de bolas sellados de baja fricción, implementar un sistema de lubricación automática o pasiva para la cadena y rediseñar las guías de los pesos para utilizar ruedas o cojinetes lineales en lugar de deslizamiento simple sobre PVC, reduciendo drásticamente la fuerza de fricción durante el ascenso y descenso.

Se propone, además, probar el prototipo con las mejoras añadidas, pero bajo distintas condiciones climáticas. Una prueba debería incluir el funcionamiento continua en un rango de temperaturas por ejemplo de entre 10 °C a 40 °C que sería

el rango existente en la ciudad de Ibarra y con niveles de humedad relativa para evaluar su efecto en la fricción, la generación solar y la integridad de los materiales. Esto garantizaría su adaptabilidad a escenarios reales fuera del laboratorio.

También se podría conectar el sistema a demandas complejas que simulen el uso en residencias e industrias como en iluminación LED nocturna, carga intermitente de dispositivos. Esto permitiría evaluar la capacidad de respuesta del sistema y ajustar el sistema de control para gestionar la energía entre la carga, la descarga y el consumo directo del panel solar.

La simplicidad del concepto del sistema lo hace viable para proyectos de capacitaciones. Se recomienda desarrollar talleres teórico-prácticos dirigidos a comunidades educativas y rurales. Estos talleres resultarían una guía para la autoconstrucción de sistemas a microescala, fomentando la participación e integración a estas nuevas tecnologías y proporcionando una solución local para el almacenamiento de energía en zonas no interconectadas o considerar explorar sinergias con otras tecnologías renovables constituye un paso hacia soluciones integrales. Un estudio de viabilidad para un sistema híbrido que combine energía solar fotovoltaica (para el ascenso) con un micro-generador eólico (que podría alimentar directamente las cargas o asistir en el ascenso) permitiría crear un sistema de generación y almacenamiento más robusto y con menor dependencia de una única fuente de energía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, L. (2014). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA DESVAINADORA DE FRÉJOL SECO*. Universidad Técnica del Norte.
- Berrada, A., Loudiyi, K., & Zorkani, I. (2017). System design and economic performance of gravity energy storage. *Journal of Cleaner Production*, 156, 317–326. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.043>
- Botha, C. D., & Kamper, M. J. (2019). Capability study of dry gravity energy storage. *Journal of Energy Storage*, 23, 159–174. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.03.015>
- Carrera, M. (2018). *Almacenamiento de energía gravitatoria con utilización de cuerpos sólidos*.
- Casals, C., García, A., González Benítez, B. ;, & Margarita, M. (2016). *ENVIRONMENTAL IMPACT OF SECOND LIFE BATTERIES IN STATIONARY APPLICATIONS*.
- Chamba, S., Vargas, W., Echeverría, D., & Riofrio, J. (2022). Regulación Primaria de Frecuencia Mediante Sistemas de Almacenamiento de Energía con Baterías en el Sistema Eléctrico Ecuatoriano. *Revista Técnica "Energía,"* 19(1), 13–21. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v19.n1.2022.506>
- Chen, J., Liu, D., Wang, B., Luo, C., Zhu, Y., & Fang, S. (2024). A charge and discharge control strategy of gravity energy storage system for peak load Cutting. *Results in Engineering*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102436>

- De la Cruz, F., & Mejía, R. (2022). SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: SOLUCION ENERGETICA EN LAS COMUNIDADES. *Revista Ciencia e Ingeniería, 9*.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.7461726>
- Emrani, A., Berrada, A., & Bakhouya, M. (2022). Optimal sizing and deployment of gravity energy storage system in hybrid PV-Wind power plant. *Renewable Energy, 183*, 12–27. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.072>
- González, L., García, A., & Acero, J. (2015). *Tesis de Grado MAESTRIA EN INGENIERIA MECANICA*.
- Hou, H., Xu, T., Wu, X., Wang, H., Tang, A., & Chen, Y. (2020). Optimal capacity configuration of the wind-photovoltaic-storage hybrid power system based on gravity energy storage system. *Applied Energy, 271*.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115052>
- Hunt, J. D., Zakeri, B., Falchetta, G., Nascimento, A., Wada, Y., & Riahi, K. (2020). Mountain Gravity Energy Storage: A new solution for closing the gap between existing short- and long-term storage technologies. *Energy, 190*.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116419>
- Icaza, D., Borge-Diez, D., & Galindo, S. P. (2021). Proposal of 100% renewable energy production for the City of Cuenca- Ecuador by 2050. *Renewable Energy, 170*, 1324–1341. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.067>
- Lema, P. R. M. S. E. G. J. (2023). Análisis de la eficiencia de las baterías convencionales en comparación

con las baterías de flujo y su impacto en el medio ambiente en Ecuador. *Revista de Investigación Talentos*, 10, 16–28.

Li, F. F., Xie, J. Z., Fan, Y. F., & Qiu, J. (2024). Potential of different forms of gravity energy storage. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103728>

Lopez, E., & Moscoso, A. (2023). *IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO HÍBRIDO SOLAR Y EÓLICO PARA EL ESTUDIO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA*. www.congresoucec.com.mx

Medardo, A., Cárdenas, M., Jeverson, E., & Gaibor, Q. (2019). ÉTICA AMBIENTAL ENFOCADO EN LA CONTAMINACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE DEBIDO AL MAL DESECHO DE LAS PILAS Y BATERÍAS. *Caribeña de Ciencias Sociales*. <https://www.facebook.com/sharer/sharer.php?u=https%3A%2F%2Fwww.eu.med.net%2Frev%2Fcaribe%2F2019%2F05%2Fcontaminacion-medio-ambiente.html&src=sdkpreparse>

Menéndez, J., Schmidt, F., & Loredó, J. (2020). Comparing Subsurface Energy Storage Systems: Underground Pumped Storage Hydropower, Compressed Air Energy Storage and Suspended Weight Gravity Energy Storage. *E3S Web of Conferences*, 162. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016201001>

MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS. (2022). *ECUADOR CONSOLIDA LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE FUENTES RENOVABLES*. <https://www.rekursosyenergia.gob.ec/ecuador-consolida-la-produccion-electrica-a-partir-de-fuentes-renovables/#:~:text=Bajo>

- Mitali, J., Dhinakaran, S., & Mohamad, A. A. (2022). Energy storage systems: a review. In *Energy Storage and Saving* (Vol. 1, Issue 3, pp. 166–216). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2022.07.002>
- Mora, C. (2022). *APRENDIZAJE ACTIVO Y SIGNIFICATIVO PARA CIRCUITOS ELÉCTRICOS MEDIANTE SIMULACIONES COMPUTACIONALES PHET EN ESTUDIANTES DE NIVEL MEDIO SUPERIOR.*
- Morstyn, T., Chilcott, M., & McCulloch, M. D. (2019). Gravity energy storage with suspended weights for abandoned mine shafts. *Applied Energy*, 239, 201–206. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.226>
- Naciones Unidas. (2015). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible.* <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- Pastas, F. (2024). *ESTUDIO DE VIABILIDAD TECNICA Y ECONOMICA.*
- Psarros, G. N., & Papathanassiou, S. A. (2022). Electricity storage requirements to support the transition towards high renewable penetration levels – Application to the Greek power system. *Journal of Energy Storage*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105748>
- Roger, D. (2018). *Almacenaje de energía y transición energética.* 34, 17–47.
- Ruoso, A. C., Caetano, N. R., & Rocha, L. A. O. (2019). Storage gravitational energy for small scale industrial and residential applications. *Inventions*, 4(4). <https://doi.org/10.3390/inventions4040064>

- Tong, W., Lu, Z., Chen, W., Han, M., Zhao, G., Wang, X., & Deng, Z. (2022). Solid gravity energy storage: A review. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 53). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105226>
- Tong, W., Lu, Z., Hunt, J. D., Zhao, H., Han, M., & Zhao, G. (2023). Energy management system for modular-gravity energy storage plant. *Journal of Energy Storage*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109283>
- Wang, Y., Yu, X., Yin, M., Wang, J., Gao, Q., Yu, Y., Cheng, T., & Wang, Z. L. (2021). Gravity triboelectric nanogenerator for the steady harvesting of natural wind energy. *Nano Energy*, 82. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105740>
- Wiatros, M., Jones, D., Broadbent, H., Fulghum, N., Bruce-Lockhart, C., Dizon, R., Macdonald, P., Moore, C., Candlin, A., Lee, U., Copsey, L., Hawkins, S., Ewen, M., Worthington, B., Benham, H., Trueman, M., Yang, M., Lolla, A., Shahram Edianto, A., ... Bachelet, M. (2023). *Global Electricity Review 2023*. Oliver Then.