

DISEÑO DE UN SISTEMA DE ELEVACIÓN Y POSICIONAMIENTO PARA CARGAS
PESADAS Y MONTAJE DE PIEZAS CON CAPACIDAD DE FUNCIONAR EN
ESPACIOS DE DIFÍCIL ACCESO.

JORGE JAIMES GONZÁLEZ
EDGAR FERNANDO REY TORRA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2025

DISEÑO DE UN SISTEMA DE ELEVACIÓN Y POSICIONAMIENTO PARA CARGAS
PESADAS Y MONTAJE DE PIEZAS CON CAPACIDAD DE FUNCIONAR EN
ESPACIOS DE DIFÍCIL ACCESO.

JORGE JAIMES GONZÁLEZ
EDGAR FERNANDO REY TORRA

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO

DIRECTOR
ISNARDO GONZÁLEZ JAIMES
INGENIERO MECÁNICO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2025

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestra más sincera gratitud a quienes hicieron posible alcanzar este anhelado objetivo. A nuestras familias, pilar fundamental de nuestro camino; a nuestros amigos, compañeros invaluable que nos brindaron aliento en cada paso y compartieron alegrías imborrables; a nuestro director, cuya guía certera y confianza fueron cruciales; y a todas aquellas personas que, con su generosidad, aportaron su granito de arena para que esta meta se hiciera realidad de la mejor forma.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
1. FORMULACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	14
1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
1.2 JUSTIFICACIÓN	15
1.2.1 Solución a las limitaciones de espacio y mejora en la movilidad.....	16
1.2.2 Seguridad de los operarios y operación remota	16
1.2.3 Economía y viabilidad.....	16
2. OBJETIVOS	17
2.1 GENERAL	17
2.2 ESPECÍFICOS	17
3. MARCO TEORICO.....	18
3.1. ESTADO DEL ARTE	18
3.2. REFERENTES TEÓRICOS.....	20
3.2.1 Sistemas de elevación y manipulación de cargas	20
3.2.2 Tornillos de potencia	20
3.2.3 Ruedas mecanum o suecas	21
3.2.4 Sistemas eléctricos y electrónicos.....	21
3.2.5 Motores de Reducción Planetaria	21
3.2.6 Microcontrolador.....	22
3.2.7 Driver BTS7960.....	23
3.2.8 Alimentación del sistema.....	24
3.2.9 Tecnología de comunicación Bluetooth.....	25
3.2.9.1 Bluetooth Classic vs. BLE	25
3.2.10 Normativas de seguridad industrial	26
4. METODOLOGIA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO	27
4.1 ENFOQUE DEL PROYECTO.....	27
4.2 RECURSOS PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO.....	28
4.3 DESARROLLO DEL PROYECTO	29

4.3.1 Documentación del proyecto.....	29
4.3.2 Reconocimiento de requerimientos.....	30
4.3.3 Diseño conceptual.....	30
4.3.4 Diseño de detalle y dimensionamiento.....	31
4.3.5 Prototipado y pruebas.....	31
4.3.6 Análisis económico.....	31
5. DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA.....	32
5.1 DISEÑO CONCEPTUAL.....	32
5.2 DISEÑO DE DETALLE Y DIMENSIONAMIENTO.....	36
5.2.1 Viga central.....	38
5.2.2 Tornillos de potencia.....	39
5.2.3 Armadura de la estructura.....	41
5.2.4 Eje de transmisión.....	43
5.2.5 Motorreductores.....	44
5.2.6 Modelado y Planos.....	46
5.2.7 Análisis de vibraciones.....	47
6. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL REMOTO.....	50
6.1 CONFIGURACIÓN DEL ESP32.....	50
6.1.1. Inclusión de Bibliotecas y Definición de Pines.....	54
6.1.2. Configuración del Sistema.....	55
6.1.3. Bucle Principal.....	55
6.1.4 Funciones de Control.....	56
6.1.4.1 Movimiento y detención de Ruedas.....	56
6.1.4.2 Control de Elevación.....	57
6.1.5. Procesamiento de Comandos.....	57
6.2. DIAGRAMA DE CONEXIÓN ELÉCTRICA.....	58
6.3. ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE CONTROL.....	59
6.3.1 Módulo: MyApp (Aplicación Principal).....	59
6.3.2 Módulo: HomePage (Pantalla Principal).....	59
6.3.3 Módulo: ConnectedScreen (Pantalla de Control del Dispositivo).....	60

6.3.4 Módulo: HeightScreen (Control de Altura).....	61
6.3.5 Módulo: TwistScreen (Control de Rotación)	62
6.3.6 Módulo: RotateDirectionScreen (Control Avanzado de Dirección)	63
6.3.7 Widgets	64
7. IMPLEMENTACIÓN DE LA NORMA ISO 12100	65
7.1 DETERMINACION DE LIMITES OPERACIONALES	65
7.2 IDENTIFICACION DE PELIGROS	66
7.3 ESTIMACION DE RIESGOS	66
7.4 MEDIDAS DE PREVENCION	67
8. PROTOTIPADO Y PRUEBAS	68
8.1 MATERIALES UTILIZADOS.....	68
8.1.1 Estructura mecánica:.....	68
8.1.2 Sistema eléctrico y de control:.....	68
8.2 FABRICACIÓN DE COMPONENTES	69
8.2.1 Soldadura	69
8.2.2 Mecanizado	70
8.2.3 Ensamblaje eléctrico	71
8.3 PROCESO DE ENSAMBLAJE	72
8.3.1 Montaje de la estructura mecánica.....	73
8.3.2 Integración del sistema de motorización	73
8.3.3 Conexión del sistema de control	74
8.4 PRUEBAS FUNCIONALES.....	74
8.4.1 Validación del circuito en protoboard	74
8.4.2 Pruebas mecánicas	74
8.4.3 Pruebas de resistencia	75
8.4.4 Resultados de pruebas.....	75
9. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	76
9.1 ANÁLISIS DE COSTOS	76
9.2 VALOR PRESENTE NETO.....	77
9.3 TASA INTERNA DE RETORNO	79

9.4 PERÍODO DE RECUPERACIÓN	80
9.5 COSTOS DEL PROTOTIPO	81
10. CONCLUSIONES.....	83
BIBLIOGRAFIA	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Caso ejemplo.	14
Figura 2. Microcontrolador esp32.....	23
Figura 3. Driver BTS7960.....	24
Figura 4. Despliegue de la función calidad requerimientos de estructura.	34
Figura 5. Despliegue de la función calidad requerimientos sistema de control.	34
Figura 6. Modelo CAD para análisis de esfuerzos en Ansys.....	41
Figura 7. Estudio de independencia de la malla para los soportes.	42
Figura 8. Resultados de la simulación del elemento de soporte.	43
Figura 9. Modelo CAD de la grúa remota con una carga ejemplo.....	46
Figura 10. Diagrama de flujo programa esp32	51
Figura 11. Caso #1, Caso #2 y Caso #3	51
Figura 12. Diagrama conexiones esp32.....	58
Figura 13. Menú bluetooth del aplicativo.....	60
Figura 14. Modulo control móvil del aplicativo.....	61
Figura 15. Modulo control de altura del aplicativo.	62
Figura 16. Modulo control de rotación del aplicativo.	63
Figura 17. Modulo control móvil avanzado del aplicativo.	64
Figura 18. Montaje de estructura metálica	73
Figura 19. Integración del sistema de motorización	73
Figura 20. Conexión del sistema de control	74
Figura 21 . Pruebas.....	75

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Alternativas propuestas para dar solución al problema.	33
Tabla 2. Requerimientos ingenieriles y peso relativo para la estructura.	35
Tabla 3. Requerimientos ingenieriles y peso relativo para el sistema de control.	35
Tabla 4. Evaluación de alternativas para el tipo de grúa a usar.	35
Tabla 5. Evaluación de alternativas para el sistema de control.	36
Tabla 6. Resultados de esfuerzos y deformaciones elementos diseñados.	37
Tabla 7. Selección de Viga.	39
Tabla 8. Diseño Tornillo de potencia.	40
Tabla 9. Diseño eje de las ruedas.	44
Tabla 10. Selección motor de las ruedas.	45
Tabla 11. Selección motor de elevación.	45
Tabla 12. Análisis modal.	47
Tabla 13. Frecuencias de operación de motorreductores.	48
Tabla 14. Movimientos Caso #1.	52
Tabla 15. Implementación norma ISO 12100.	65
Tabla 16. Fabricación apoyo ruedas.	70
Tabla 17. Mecanizado del tornillo.	71
Tabla 18. Conexión ejemplo drivers.	72
Tabla 19. Resultados de pruebas ejecutadas.	75
Tabla 20. Desglose de inversión inicial.	77
Tabla 21. Costo mensual de las alternativas.	78
Tabla 22. Cálculo VPN.	79
Tabla 23. Cálculo TIR.	80
Tabla 24. Cálculo de Payback.	81
Tabla 25. Costos prototipo.	82

LISTA DE ANEXOS

(Ver anexos adjuntos)

Anexo A. NORMAS RELACIONADAS

Anexo B. SELECCIÓN POLIPASTO Y CARRITO

Anexo C. SELECCIÓN DE LA VIGA

Anexo D. CALCULO DE COLUMNA

Anexo E. CALCULO TORNILLOS DE POTENCIA

Anexo F. CALCULOS DE SOPORTES

Anexo G. DISEÑO EJE DE LAS RUEDAS

Anexo H. CALCULO DE BUJES PARA EL EJE

Anexo I. SELECCIÓN DE ANILLOS RETENEDORES PARA EL EJE

Anexo J. CALCULO Y SELECCIÓN DE MOTORES

Anexo K. SELECCIÓN DE CADENA Y SPROCKET PARA SISTEMA TELESCÓPICO

Anexo L. CALCULO DE SOLDADURAS

Anexo M. ANÁLISIS MODAL

Anexo N. TABLAS DE FABRICACIÓN DE PROTOTIPO

Anexo O. CASOS Y MOVIMIENTOS MOTORES

Anexo P. CALCULO DE COSTOS DE OPERACIÓN

Anexo Q. CODIGO ESP 32

Anexo R. REPOSITORIO DEL APLICATIVO MOVIL

Anexo S. ENLACES PARA VIDEOS DEL PROYECTO

Anexo T. PLANOS DE LA GRÚA REMOTA

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO DE UN SISTEMA DE ELEVACIÓN Y POSICIONAMIENTO PARA CARGAS PESADAS Y MONTAJE DE PIEZAS CON CAPACIDAD DE FUNCIONAR EN ESPACIOS DE DIFÍCIL ACCESO*

AUTOR: JORGE JAIMES GONZALEZ, EDGAR FERNANDO REY TORRA**

PALABRAS CLAVE: Diseño mecánico, Grúa, Espacio reducido, Prototipo, Control remoto.

DESCRIPCIÓN: El proyecto *“Diseño de un sistema de elevación y posicionamiento para cargas pesadas y montaje de piezas con capacidad de funcionar en espacios de difícil acceso”* busca resolver las dificultades que enfrentan las PYMEs industriales del área metropolitana de Bucaramanga en la manipulación de cargas pesadas. Estas empresas suelen depender de soluciones improvisadas que no cumplen con estándares técnicos, generando riesgos para la seguridad de los trabajadores, sobrecostos y baja productividad.

La propuesta incluye un dispositivo capaz de manejar cargas de hasta 2 toneladas, ajustable en altura y con capacidad de rotar en ángulos de 90 grados. Su diseño compacto, adaptable a espacios reducidos, y su operación remota garantizan seguridad y eficiencia, reduciendo la intervención física directa de los operarios. Esto no solo disminuye el riesgo de accidentes, sino que también mejora la movilidad y maniobrabilidad en talleres con infraestructuras limitadas.

El proyecto contempla la construcción de un prototipo funcional a escala para validar su desempeño y la realización de un análisis económico para evaluar su viabilidad. Esta solución tecnológica no solo mejorará la seguridad y las condiciones laborales, sino que también optimizará el uso de recursos y aumentará la competitividad de las PYMEs.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Programa académico. Director: Isnardo González Jaimes. Ingeniero mecánico

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF A LIFTING AND POSITIONING SYSTEM FOR HEAVY LOADS AND MOUNTING OF PARTS CAPABLE OF OPERATING IN CONFINED SPACES*

AUTHOR: JORGE JAIMES GONZALEZ, EDGAR FERNANDO REY TORRA **

KEY WORDS: Mechanical design, Crane, Small space, Prototype, Remote control.

DESCRIPTION: The project *“Design of a Lifting and Positioning System for Heavy Loads and Piece Assembly Capable of Operating in Confined Spaces”* aims to address the challenges faced by industrial SMEs in the metropolitan area of Bucaramanga in handling heavy loads. These companies often rely on improvised solutions that fail to meet technical standards, posing safety risks to workers, increasing costs, and reducing productivity.

The proposed system is designed to handle loads of up to 2 tons, with adjustable height and the ability to rotate at 90-degree angles. Its compact design, suitable for confined spaces, and remote operation ensure safety and efficiency by minimizing direct physical contact with heavy loads. This reduces the risk of accidents while enhancing mobility and maneuverability in workshops with limited infrastructure.

The project involves constructing a scaled functional prototype to validate the system’s performance and conducting an economic analysis to assess its feasibility. This technological solution will not only improve safety and working conditions but also optimize resource usage and enhance the competitiveness of SMEs in the metalworking sector.

*Degree work

**Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Academic program. Director: Isnardo González Jaimes. mechanical engineer

INTRODUCCIÓN

La manipulación de cargas pesadas es un desafío recurrente en el sector industrial, especialmente en pequeñas y medianas empresas (PYMEs) que operan en talleres con limitaciones de espacio. Estas empresas suelen recurrir a métodos improvisados para mover y posicionar piezas como motores, bujes y estructuras metálicas, exponiendo a los trabajadores a riesgos significativos y comprometiendo la productividad de los procesos. En este contexto, se plantea la necesidad de desarrollar soluciones tecnológicas que garanticen una manipulación más eficiente, segura y adaptada a las restricciones físicas de estos entornos.

El diseño de sistemas de elevación y posicionamiento representa un área de interés en la ingeniería mecánica debido a su impacto en la seguridad laboral, la ergonomía y la eficiencia operativa. Este proyecto se origina en la observación de las deficiencias actuales en las herramientas utilizadas por las PYMEs de la región y en la revisión de estándares internacionales como las normativas CMAA #74 e ISO 12100, que enfatizan la importancia de sistemas seguros y funcionales.

El trabajo se enfoca en el desarrollo de un sistema compacto, ajustable y manejable a distancia, con capacidad para operar en espacios reducidos. A través de un enfoque metodológico que incluye diseño, prototipado y análisis técnico-económico, se busca ofrecer una solución viable que beneficie a estas empresas en términos de productividad, seguridad y sostenibilidad económica.

Este estudio no solo contribuye al avance en el diseño de equipos industriales, sino que también promueve la implementación de tecnologías accesibles para el sector metalmeccánico, con un impacto positivo en la calidad del trabajo y la competitividad de las PYMEs.

1. FORMULACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En el área metropolitana de Bucaramanga, muchas pequeñas y medianas empresas (pymes) del sector industrial enfrentan el desafío de manipular y mover cargas pesadas, que van desde bujes y motores hasta estructuras de gran tamaño. Estas piezas, que a menudo superan los cientos de kilogramos e incluso pueden llegar a pesar varias toneladas, requieren una manipulación precisa y cuidadosa para evitar daños tanto a los materiales como a los trabajadores.

Actualmente, muchas de estas pymes carecen de equipos especializados para operar en sus entornos, que a menudo están caracterizados por espacios reducidos y accesibilidad limitada. En consecuencia, es común que recurran a soluciones improvisadas, como el uso de grúas y polipastos montados en estructuras metálicas rígidas y de manufactura casera. Estas alternativas, que no consideran principios básicos de ingeniería y ergonomía, provocan sobrecostos, mal diseño y, lo más crítico, exponen a los operarios a riesgos significativos para su salud y seguridad.

Figura 1. Caso ejemplo.



El manejo ineficiente y lento de estas cargas, además del peligro constante de accidentes, pone en riesgo no solo la integridad de las piezas, sino también la salud de los trabajadores. Al carecer de equipos apropiados, las empresas a menudo deben involucrar a varios operarios en la manipulación de una sola carga, lo que aumenta la posibilidad de errores humanos, fatiga y lesiones y comprometiendo la productividad de la empresa.

Este problema subraya la necesidad urgente de desarrollar una solución tecnológica que permita la manipulación de cargas pesadas de manera más eficiente, cómoda y, sobre todo, segura. Un dispositivo diseñado específicamente para operar en espacios reducidos y que minimice la intervención física directa de los trabajadores no solo reduciría el tiempo y esfuerzo necesarios, sino que también mejoraría considerablemente las condiciones de seguridad laboral, reduciendo los riesgos de accidentes y optimizando el uso de recursos humanos y materiales.

En resumen, la manipulación y posicionamiento de cargas pesadas en talleres con limitaciones de espacio representa un desafío significativo para las pymes del sector metalmeccánico. La falta de equipos de manipulación adecuados y la necesidad de involucrar a varios operarios en estas tareas subraya la urgencia de desarrollar una solución o dispositivo que permita realizar estas operaciones de manera más eficiente, segura y cómoda. Una solución de este tipo no solo reduciría el tiempo y esfuerzo necesarios para estas tareas, sino que también mejoraría la seguridad laboral y optimizaría los recursos dentro de las empresas, contribuyendo así a una mayor productividad y competitividad en el sector.

¿Es posible diseñar un dispositivo que permita llevar a cabo esta tarea de manera más eficiente, cómoda y segura para disminuir el tiempo y esfuerzo que consume actualmente?

1.2 JUSTIFICACIÓN

El proyecto "Diseño de un sistema de elevación y posicionamiento para cargas pesadas y montaje de piezas con capacidad de funcionar en espacios de difícil acceso." busca abordar los desafíos específicos que afrontan una gran cantidad de talleres industriales,

especialmente PYMES, correspondientes a costos, seguridad y confort con respecto a soluciones para la manipulación de piezas. Las razones para emprender este proyecto se basan en los siguientes aspectos clave:

1.2.1 Solución a las limitaciones de espacio y mejora en la movilidad: El proyecto busca proporcionar una solución que permita realizar montajes en espacios reducidos sin modificar las instalaciones existentes, asegurando un proceso accesible y cómodo. Además, se hará énfasis en la portabilidad y facilidad de maniobra, mejorando la movilidad del equipo dentro del taller y facilitando el transporte de piezas o elementos de un lugar a otro según se requiera.

1.2.2 Seguridad de los operarios y operación remota: El diseño prioriza la seguridad de los empleados al implementar un sistema manejado remotamente, lo que minimiza el contacto directo con cargas pesadas y reduce los riesgos de accidentes laborales. La maniobrabilidad del sistema en espacios estrechos sin intervención física directa garantiza un entorno más seguro para los trabajadores.

1.2.3 Economía y viabilidad: El proyecto ofrece una solución rentable para pequeños talleres metalmecánicos, optimizando la eficiencia sin incurrir en altos costos. Diseñado para ser operado por una sola persona, el sistema reduce tiempos de operación, lo que incrementa la productividad. Además, la infraestructura de estos talleres no es adecuada para la instalación de puentes grúa sin un significativo aumento en los costos. A esto se suma la presencia de mezanines, que limitan el acceso a las piezas pesadas mediante un puente grúa.

En resumen, el proyecto tiene un alcance amplio al beneficiar a la comunidad de talleres pequeños en el sector metalmecánico proporcionando soluciones para las limitaciones de espacio, seguridad y salud de los trabajadores, mejorará la movilidad y promoverá la economía en esta comunidad.

2. OBJETIVOS

2.1 GENERAL

Diseñar un sistema de elevación adaptable y ajustable en altura, capaz de manipular cargas de hasta 2 toneladas mediante un polipasto de cadena permitiendo la rotación de piezas en ángulos de 90 grados para facilitar el montaje en máquinas herramienta dentro de talleres industriales con limitaciones de espacio, cumpliendo con las normativas de seguridad ISO 12100 y la norma CMAA #74 para garantizar un entorno seguro para los operarios.

2.2 ESPECÍFICOS

- Diseñar un sistema de elevación y posicionamiento para cargas de hasta 2 toneladas, ajustable en altura entre 2 y 3 metros, que permita rotaciones de 90 grados siguiendo los estándares propuestos por la norma CMAA #74.
- Implementar un sistema de control remoto que permita operar el equipo a una velocidad entre 0.1 y 0.5 m/s, evaluando su funcionamiento y diseño para de acuerdo a la norma ISO 12100.
- Construir un prototipo a escala (aproximadamente 1:5) del sistema con materiales accesibles y componentes del mercado local, realizando pruebas físicas específicas de funcionalidad, tales como ajuste de altura, giro de 90 grados, y pruebas de resistencia para evaluar la capacidad de soportar cargas correspondientes a la escala del prototipo (16 kg aproximadamente).
- Realizar un análisis económico del sistema final mediante las metodologías de Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Período de Recuperación (Payback) para proyectar la rentabilidad y el tiempo de recuperación de la inversión.

3. MARCO TEORICO

El diseño de un sistema de elevación y posicionamiento para cargas pesadas con un polipasto de cadena se fundamenta en una amplia gama de conocimientos técnicos y experiencias previas. En este sentido, es crucial examinar proyectos anteriores que hayan abordado problemas similares y hayan ofrecido soluciones relevantes. A continuación, se presentan una variedad de fuentes, incluyendo trabajos de grado y otros documentos que desempeñan el papel de "Estado del Arte", estableciendo así la base esencial para la ejecución del presente proyecto.

3.1. ESTADO DEL ARTE

El proyecto de grado titulado "Diseño y construcción de un sistema de elevación de carrocerías de camiones en la empresa Ninox S.A.S."¹, desarrollado por los estudiantes Jerson Yamid Arismendi y Alexander Bravo, se centra en la concepción y ejecución de un sistema de elevación similar al presentado en este trabajo. Por ende, su relevancia radica en su contribución al avance de este campo específico, evidenciada a través de los ensayos relevantes llevados a cabo para verificar la funcionalidad del elevador de carga, así como en la exploración de diversas alternativas para la materialización del diseño.

Asimismo, se destaca el proyecto titulado "Diseño de Estructura para Levante de Carga de Dos Toneladas para Taller de Mantenimiento, Arequipa 2019"², elaborado por Silver Huayta Ticona. Este estudio proporciona una valiosa perspectiva en cuanto al diseño de estructuras destinadas a la manipulación de cargas pesadas en ambientes de taller. Resalta la importancia crucial de contar con soluciones eficientes para la gestión de

¹ ARISMENDI PINZÓN, Jerson Yamid; BRAVO CORREDOR, Alexander. Diseño y construcción de una plataforma elevadora de carrocerías de camiones en la empresa Ninox S.A.S. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2020. 147 p.

² HUAYTA TICONA, Silver. Diseño de estructura para levante de carga de dos toneladas para taller de mantenimiento. Trabajo de grado. Arequipa: Universidad continental, 2019. 88 p.

cargas, subrayando su impacto directo en la seguridad del personal y la eficacia operativa. Este antecedente se erige como un sólido punto de referencia para la formulación de la metodología de diseño, la elección de materiales y la evaluación de los factores de seguridad en el contexto del proyecto actual.

La exploración del estado del arte identificó diversos proyectos relacionados con sistemas de elevación y transporte de carga. Se encontraron trabajos como “Sistemas mecánicos móviles de elevación de carga para descongestionar el área de embarque y desembarque del mercado mayorista de Ambato”³, relevante por abordar la optimización de espacios mediante sistemas móviles; “Diseño y construcción de un elevador para la facultad de mecánica”⁴, importante por su enfoque en el diseño y la materialización práctica de un elevador; y “Diseño y construcción de un elevador dúplex con capacidad de 25 kg para la biblioteca del campus El Girón de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito”⁵, que muestra la adaptación de sistemas a restricciones específicas de carga y espacio.

Estos antecedentes, en conjunto, ofrecen una visión de las soluciones existentes para el manejo de cargas en diversos contextos, y su análisis ha sido crucial para la formulación y justificación del sistema propuesto, permitiendo identificar áreas de oportunidad y definir requerimientos específicos

³ ROBAYO, M. Sistemas mecánicos móviles de elevación de carga para descongestionar el área de embarque y desembarque del mercado mayorista de Ambato. 2016. [Tesis de pregrado]. Ambato: Universidad Técnica de Ambato.

⁴ GUAMÁN GUAJALA, Luis Miguel y VEGA SEVILLA, Ángel Aurelio. Diseño y construcción de un elevador para la Facultad de Mecánica. Trabajo de grado. RIOBAMBA: ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, 2014. 173 p.

⁵ JIMÉNEZ ERAZO, Diego Estuardo; PÉREZ PÉREZ Marcelo David. Diseño y construcción de un elevador dúplex con capacidad de 25 KG para la biblioteca del Campus El Girón de la Universidad Politecnica Salesiana, sede Quito. Trabajo de grado. Quito: Universidad politécnica Salesiana de Ecuador, 2012. 164 p.

3.2. REFERENTES TEÓRICOS

3.2.1 Sistemas de elevación y manipulación de cargas: Los sistemas de elevación, como polipastos y grúas, son esenciales para la manipulación segura y eficiente de cargas pesadas. La norma CMAA #74⁶ establece estándares para el diseño y funcionamiento de estos equipos, asegurando su funcionamiento y desempeño en aplicaciones industriales. Funcionan usualmente mediante sistemas de poleas o engranes para facilitar la elevación de cargas pesadas para transportarlas fácilmente de un lugar a otro. Los sistemas más usados son los puentes grúas y grúas de pórtico⁷.

3.2.2 Tornillos de potencia: Los tornillos de potencia son elementos mecánicos cuya principal característica es que son usados no como elementos de sujeción sino elementos de transmisión de potencia mediante una rosca, suelen usarse en sistemas de elevación, sistemas de extrusión y desplazamiento preciso.

⁶ CRANE MANUFACTURING ASSOCIATION OF AMERICA. Specifications for top running & under running single girder electric traveling cranes utilizing under running trolley hoist. CMAA #74. Charlotte, USA. 2010. 78 P.

⁷ ANONIMO. Overhead and gantry crane safety and requirements | EMC [Anónimo]. EMC Insurance: Business, Loss Control, Bonds, Surety and Fidelity [página web]. [Consultado el 3, abril, 2025]. Disponible en Internet: <<https://www.emcinsurance.com/losscontrol/techsheet/overhead-and-gantry-crane-safety-and-requirements>>.

3.2.3 Ruedas mecanum o suecas: Son un tipo de ruedas especiales que cuentan con un juego de platos unidos por tornillos a lo largo de su circunferencia, con la particularidad de que estos tornillos están inclinados a 45° respecto a ambos platos, en estos tornillos se montan cilindros de material sintético, al recibir torque la rueda la fuerza que se genera en los rodillos es dividida en sus componentes axial y transversal dando como resultado que únicamente la fuerza axial haga trabajo útil generando así una resultante a 45 grados respecto al eje motriz, gracias a esto es posible realizar una variedad de movimientos y maniobras que no son posibles con ruedas normales que son de bastante utilidad en espacios confinados o reducidos para la maniobrabilidad.

3.2.4 Sistemas eléctricos y electrónicos: En esta sección, se detallan los componentes fundamentales que integran el sistema de elevación, justificando su selección en función de criterios técnicos y operativos específicos.

Se describen elementos clave como los motores de accionamiento, los drivers de control, el microcontrolador principal y la fuente de alimentación del sistema. La elección de cada componente se basa en un análisis de sus características para el desempeño del sistema, incluyendo su capacidad de carga, eficiencia energética, compatibilidad con la infraestructura existente y otros parámetros operativos relevantes.

4.2.5 Motores de Reducción Planetaria: La selección de los dispositivos de accionamiento para el sistema de elevación se basó en criterios clave como la capacidad de carga, la velocidad de desplazamiento y el espacio ocupado por los componentes, por tal motivo se optó por motores de reducción planetaria debido a su eficiencia y compacidad.

Estos motores, que transmiten potencia a través de múltiples engranajes, ofrecen altas reducciones en un espacio compacto. Según Pérez González (2015), en su libro

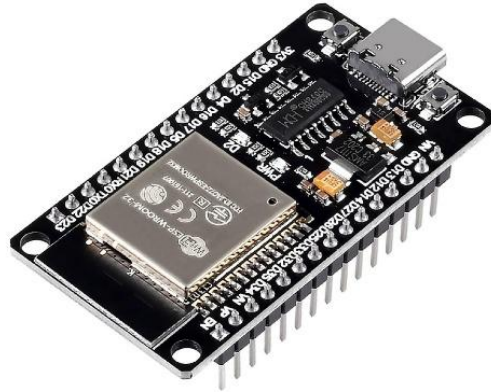
*Mantenimiento mecánico de máquinas*⁸: "Los trenes planetarios transmiten la potencia a través de múltiples engranes, permitiendo grandes reducciones en un espacio relativamente pequeño. Gracias a esta configuración, poseen un tamaño menor en comparación con los trenes fijos, manteniendo la misma capacidad de carga"

3.2.6 Microcontrolador: La selección del microcontrolador ESP32 para el sistema se fundamentó en una combinación de factores técnicos y operativos. Su alto rendimiento, junto con la conectividad inalámbrica integrada (Bluetooth y WiFi), fueron determinantes para cumplir con los requisitos de funcionalidad del proyecto. Si bien existen diversas alternativas en el mercado, el ESP32 sobresalió por su capacidad de ofrecer conectividad nativa, eliminando la necesidad de implementar módulos adicionales y simplificando la integración con interfaces de usuario móviles.

Adicionalmente, su tamaño compacto y la amplia disponibilidad de pines I/O lo convierten en una solución idónea para proyectos con limitaciones de espacio y que demandan múltiples conexiones con periféricos. La decisión también se vio influenciada por su precio competitivo, que permite optimizar los costos del sistema sin comprometer su rendimiento. Finalmente, el conocimiento previo del equipo en la programación del ESP32, utilizando el entorno de desarrollo Arduino IDE, facilitó la implementación y minimizó la curva de aprendizaje. En consecuencia, el ESP32 se presenta como una solución integral que equilibra rendimiento, conectividad, costo, facilidad de desarrollo y un sólido soporte técnico, posicionándose como la opción más adecuada para este proyecto.

⁸ GONZÁLEZ, Antonio Pérez; CERVANTES, Pablo Jesús Rodríguez y BRÚ, Joaquín Luís Sancho. *Mantenimiento mecánico de máquinas*. [s.l.]: Publicacions de la Universitat Jaume I, 2007. 388 p. ISBN 9788480216296.

Figura 2. Microcontrolador esp32.



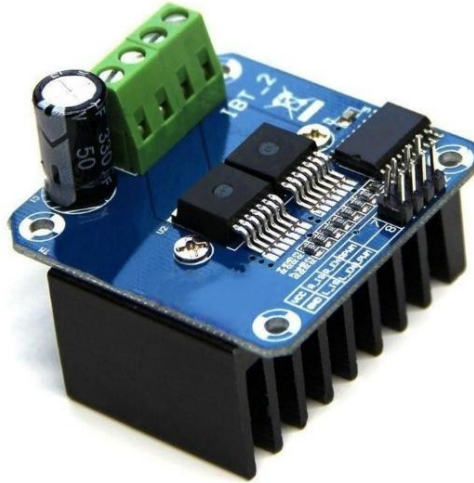
Fuente. <https://3dbots.co/producto/tarjeta-esp32-wroom-32-ch340c-nodemcu-wifi-bluetooth-usb-c/>

3.2.7 Driver BTS7960: El controlador BTS7960 43A es un puente en H que permite el control eficiente de motores de corriente continua de alta potencia. Este módulo se comunica fácilmente con microcontroladores e integrados de control, ya que incorpora funciones avanzadas de detección de corriente mediante resistencias de medición.

Además, ofrece protección contra sobre corriente, sobrecalentamiento, sobretensión, caída de presión y cortocircuito, lo que lo hace ideal para aplicaciones robustas. Su compatibilidad con el ESP32 lo convierte en una opción adecuada para proyectos de automatización y robótica, ya que puede ser controlado a través de PWM (Modulación por Ancho de Pulso), permitiendo una regulación precisa de la velocidad y dirección del motor⁹.

⁹ KUMAR, Raghvendra y HO QUANG, Nguyen. Research in Intelligence and Computing in Engineering. Singapur: Spring, 2021. 1006 p

Figura 3. Driver BTS7960



Fuente. https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-621115905-modulo-puente-h-bts7960-43a-alta-potencia-_JM

3.2.8 Alimentación del sistema: El sistema de elevación requiere una fuente de alimentación confiable que garantice un suministro estable de energía para los motores y los circuitos de control.

Para este propósito, se optó por una batería de 12V de automóvil para alimentar los motores, ya que ofrece una gran capacidad de almacenamiento de energía y proporciona una corriente estable durante largos periodos, asegurando un rendimiento óptimo del sistema. Además, su disponibilidad en el mercado facilita su reposición en caso de ser necesario. Por otro lado, el ESP32 se alimenta con pilas alcalinas, las cuales permiten una integración sencilla, reducen la complejidad del diseño eléctrico y brindan un suministro de energía estable sin necesidad de reguladores adicionales. Esta configuración permite un funcionamiento eficiente y autónomo del sistema, optimizando el consumo de energía según los requerimientos de cada componente.

3.2.9 Tecnología de comunicación Bluetooth

3.2.9.1 Bluetooth Classic vs. BLE: ¿Por qué se usó Bluetooth Classic?: Bluetooth Classic y Bluetooth Low Energy (BLE) están diseñados para diferentes aplicaciones. Bluetooth Classic alcanza velocidades de hasta 2.1 Mbps, lo que permite una transmisión continua de datos, ideal para el control en tiempo real de la grúa. En cambio, el bluetooth Low Energy (BLE) está optimizado para bajo consumo energético y transmisión esporádica de datos, lo que lo hace inadecuado para este proyecto. Dado que se requiere una respuesta inmediata y estable, se optó por Bluetooth Classic a pesar de su mayor consumo energético.

3.2.9.2 Funcionamiento del protocolo Bluetooth en ESP32: El ESP32 gestiona el emparejamiento, las conexiones y el envío de datos de forma integrada, simplificando la implementación, este microcontrolador es capaz de soportar los dos bluetooth, tanto el classic como el low energy

3.2.9.3 Comunicación entre la app Flutter y la grúa: La aplicación Flutter se comunica con la grúa mediante Bluetooth Classic utilizando el paquete "flutter_bluetooth_serial" brindado por la documentación de dart, que permite descubrir dispositivos, emparejarlos y enviar comandos al ESP32. Este plugin proporciona una interfaz sencilla para gestionar la conexión y recibir datos en tiempo real, garantizando un control eficiente de la grúa.

3.2.10 Normativas de seguridad industrial: El diseño de sistemas de manipulación de cargas debe cumplir con normativas como la ISO 12100¹⁰, que garantizan la seguridad en el control y la evaluación de riesgos en maquinaria y la norma CMAA 74¹¹, enfocada en grúas y sistemas de elevación, proporciona lineamientos para asegurar el rendimiento estructural y mecánico de los equipos. Estas normativas, junto con principios de ergonomía, buscan minimizar accidentes laborales y proteger a los usuarios que operen el equipo de elevación.

¹⁰ UNE-EN. Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación del riesgo y reducción del riesgo. ISO 12100. Madrid, España: AENOR, 2012. 88 p.

¹¹ CRANE MANUFACTURING ASSOCIATION OF AMERICA. Specifications for top running & under running single girder electric traveling cranes utilizing under running trolley hoist. CMAA #74. Charlotte, USA. 2010. 78 p.

4. METODOLOGIA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO

4.1 ENFOQUE DEL PROYECTO

Se decide un enfoque de diseño de ingeniería, apuntando a la solución práctica de un problema específico en el sector industrial en el área metropolitana de Bucaramanga. Este enfoque permite la integración de conocimientos técnicos y normativos para desarrollar un sistema de elevación y posicionamiento que presente una mejora en el movimiento de cargas pesadas en talleres con limitaciones de espacio con respecto a las soluciones populares hoy en día.

El proyecto busca entonces diseñar un sistema que combine funcionalidad, seguridad y eficiencia, considerando tanto los requisitos técnicos de carga y maniobrabilidad como los estándares internacionales ISO 12100 y CMAA 74, Ver anexo A. Este enfoque asegura que el proyecto no sólo cumpla con los estándares de calidad, sino que también contribuye al bienestar de los trabajadores y a la productividad de las empresas.

El proyecto abarca desde la conceptualización del proyecto hasta la construcción y prueba de un prototipo que permita validar las principales características del sistema. Se evaluarán su capacidad de carga, adaptabilidad a espacios reducidos y la efectividad del control remoto basado en ESP32.

El foco está en resolver problemas prácticos, reducir los riesgos laborales y optimizar el tiempo de operación, contribuyendo a la modernización de las pequeñas y medianas empresas (PYME) del sector industrial. Ofreciendo una alternativa más tecnificada y practica con respecto a las soluciones que ofrece el mercado.

4.2 RECURSOS PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO

Para el desarrollo de este proyecto se utilizan distintos materiales y software, dentro de los materiales se encuentran los utilizados para la construcción del prototipo (escala 1:5), estos son:

- Set ruedas mecanum NM305 x 2.
- Barra roscada M10 x 1 metro.
- Microcontrolador esp32.
- Tarjetas drivers BTS7960 x 6 unidades.
- Batería AA x 2.
- Porta baterías x 2.
- Motorreductor 3w, 280 RPM x 2 unidades
- Motorreductor 3w, 16 RPM x 4 unidades.
- Platinas de 2cm x 0,2cm x 50cm x 3.
- Tuercas M10 x 2
- Tubería 1/2" Sch 40
- Estaño y cautín
- Juego de poleas y elásticos
- Cables y jumpers.
- Set de acoples x 1
- Tornillería
- Cera para soldar.
- Set protoboard y leds
- Tuercas M10.
- Empaque tipo anillo x 2
- Termoformables x 8.

Mientras que por el lado del software se tienen:

- Ansys, versión para estudiantes 2024, para realizar análisis mecánicos de varios componentes estructurales del diseño mediante el uso del análisis de elementos finitos.
- Solidworks, versión 2021, suministrada por la Universidad Industrial de Santander para realizar modelos CAD de las piezas de la máquina y sus respectivos planos.
- Flutter, versión 2025, para desarrollar la aplicación que permite la comunicación entre el microcontrolador y el dispositivo móvil que servirá de interfase para el operario de la grúa.
- Arduino IDE, Para la programación del microcontrolador, una plataforma de desarrollo que permite escribir, compilar y cargar el código en la tarjeta de control. Esta herramienta facilita la implementación de la lógica necesaria para la comunicación con la aplicación desarrollada en **Flutter**, garantizando una interacción eficiente entre el dispositivo móvil y la grúa.

4.3 DESARROLLO DEL PROYECTO

La metodología utilizada para el desarrollo del proyecto será la siguiente:

4.3.1 Documentación del proyecto: Se procederá a recopilar y organizar toda la información relevante generada durante la ejecución del proyecto. Los documentos e información capturada será leída y se realizarán síntesis y resúmenes para tener presente la información relevante para el proyecto. Entre lo que se busca se incluye detalles sobre el diseño del sistema de manipulación, los prototipos desarrollados, las pruebas realizadas y los análisis económicos efectuados. Esta documentación servirá como un registro del proyecto, proporcionando información detallada para futuras referencias, investigaciones y posibles mejoras al sistema de elevación.

4.3.2 Reconocimiento de requerimientos: Se llevará a cabo una recopilación de los requerimientos pertinentes para la máquina a la hora de cumplir con nuestros objetivos planteados anteriormente. Para recoger estos requerimientos se realiza entrevista al taller Tornolíneas en Bucaramanga y se hace observaciones de la operación en los talleres de Tornolíneas y de Trienergy SA. Los requerimientos recogidos serán procesados mediante el método QFD para asignar importancia a los requerimientos y convertir estos requerimientos se traducen a variables ingenieriles.

Como resultado del QFD se tiene que la máquina: debe tener capacidad de manejar hasta 2 toneladas, debe permitir un ajuste en altura de entre 1.75 y 3 metros, capacidad de realizar giros de 90°, movilidad ampliada y funcionar con una batería de 12V. Así mismo deben tenerse en cuenta las recomendaciones y sugerencias en las normas ISO 12100¹² y CMAA 74¹³ a la hora de realizar el diseño final y tomar decisiones de diseño.

4.3.3 Diseño conceptual: Se evaluarán distintas alternativas propuesta mediante lluvia de ideas para satisfacer las necesidades ingenieriles previamente planteadas al usar el QFD. Entre las alternativas se encuentran 3 categorías, Tipo de estructura de grúa (Tipo pluma, tipo pórtico y tipo puente), sistema de control (PLC y esp32) y sistema de elevación (Sistema telescópico, niveles por juego de poleas y tornillo de potencia). Para cada una de estas categorías se seleccionará la que consiga mejor puntuación para incluirla en el diseño final dando como resultado la alternativa ganadora del diseño conceptual.

¹² UNE-EN. Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación del riesgo y reducción del riesgo. ISO 12100. Madrid, España: AENOR, 2012. 88 p.

¹³ CRANE MANUFACTURING ASSOCIATION OF AMERICA. Specifications for top running & under running single girder electric traveling cranes utilizing under running trolley hoist. CMAA #74. Charlotte, USA. 2010. 78 p.

4.3.4 Diseño de detalle y dimensionamiento: De acuerdo con los requerimientos establecidos se procederá a realizar el diseño de detalle mediante los cálculos ingenieriles pertinentes que desemboquen en el dimensionamiento de la máquina final, todo esto asistido por el software Ansys para realizar la validación mecánica de los componentes garantizando que puedan desempeñarse correctamente en las condiciones de trabajo límites. Al finalizar se generan de igual manera los planos de las piezas y la máquina para su debida construcción.

4.3.5 Prototipado y pruebas: Con las dimensiones calculadas anteriormente se realiza la conversión volumétrica disminuyendo todas las dimensiones 5 veces para dar la construcción del prototipo, por limitaciones de los materiales ofrecidos en el mercado resulta imposible realizar un modelo a escala por lo que se decidió por conseguir un prototipo de media fidelidad que permita evaluar las funciones básicas, las funciones que serán puestas a prueba serán esencialmente el control remoto, el sistema de elevación, la maniobrabilidad del diseño y por ultimo su capacidad de carga, lo cual culmina con la recopilación de resultados.

4.3.6 Análisis económico: Partiendo del diseño de detalle de la máquina se conseguirá el costo total de construir el dispositivo, este valor se usará como base para realizar un análisis económico que indicará la viabilidad de implementar la solución propuesta.

5. DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA

5.1 DISEÑO CONCEPTUAL





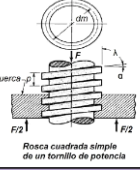
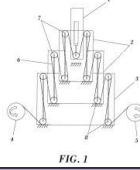




El primer paso es recopilar los requerimientos del cliente, para esto se realizaron entrevistas y visitas de observación para conocer las necesidades, condiciones de operación y uso de las grúas en algunos talleres del área metropolitana de Bucaramanga (Tornolneas y Trienergy). De esta etapa se consiguieron las siguientes necesidades del cliente:

- Capacidad de carga de hasta 2 toneladas.
- Maniobrabilidad para sortear obstáculos y montar piezas.
- Compactibilidad o capacidad de almacenarse sin ocupar mucho espacio.
- Bajo costo.
- Fácil de fabricar.
- Poco mantenimiento.
- Seguridad.
- Sin conexión a la red eléctrica.

Estos requerimientos del cliente fueron debidamente condensados en 5 categorías: Funcionalidad, comodidad, economía, mantenibilidad y seguridad. De acuerdo con lo observado y recopilado de las entrevistas los pesos relativos de las categorías son los siguientes: 33% para funcionalidad, 7% para comodidad, 20% para economía, 13% para mantenibilidad y 27% para seguridad.

Dados los requerimientos y lo recopilado en la fase de documentación se proponen alternativas para: tipo de estructura de la grúa, sistema de elevación y sistema de control.

Tabla 1. Alternativas propuestas para dar solución al problema.

Tipo de estructura de la grúa	Sistema de elevación			Sistema de control	
<p>Puente grúa</p> 	<p>Diferencial electrica</p> 			<p>PLC</p>	<p>esp32</p>
<p>Grúa Portico</p> 	<p>Hidraulica/pneumatica</p> 	<p>Tornillo de potencia</p> 	<p>Niveles por poleas</p> 		
<p>Pluma grúa</p> 	<p>Hidraulica/pneumatica</p> 				

Se procede a realizar la definición de los requerimientos ingenieriles tomando como base los requerimientos del cliente y aplicando el QFD. Se realizaron 2 QFDs uno para la parte del sistema de control y otro para la parte mecánica del dispositivo según como se muestran a continuación.

Para realizar la calificación entre la relación de los criterios ingenieriles y los requerimientos o necesidades del cliente se usa un sistema de valores dividido en valores de fuertemente relacionados, moderadamente relacionados y débilmente relacionados. A estas relaciones les corresponden, respectivamente, valores de 9, 3 y 1. Al mismo tiempo estarán representados por figuras geométricas, para facilitar la visualización de las relaciones, las figuras escogidas son: un círculo sombreado para una relación fuerte, una circunferencia sin relleno para una relación moderada y un triángulo invertido para una correlación débil.

Luego de asignar las relaciones se hace una suma y se realiza una ponderación para determinar la importancia relativa de cada criterio ingenieril según la necesidad del cliente.

Figura 4. Despliegue de la función calidad para los requerimientos de la estructura.

Peso relativo	Importancia para el cliente	Maxima relación	Requerimientos del cliente (explícitos e implícitos)	Columna #					
				1	2	3	4	5	6
			Requerimientos ingenieriles	Capacidad de carga	Maniobrabilidad	Materiales de construcción locales	Complejidad geométrica estructural	Altura máxima alcanzable	Procesos de fabricación
33%	5	9	Funcional	●	●	▽	▽	●	
7%	1	9	Comodo		●	●	●	●	
20%	3	9	Economico	●	○	●	▽	●	●
13%	2	9	Facil mantenimiento		●	▽	●	○	○
27%	4	9	Seguro	●	▽	○	○	●	●
			Maxima relación	9	9	9	9	9	9
			Puntaje de importancia técnica	720	566,7	366,7	313,3	820	460
			Peso relativo	22%	17%	11%	10%	25%	14%

Figura 5. Despliegue de la función calidad para los requerimientos del sistema de control.

Peso relativo	Importancia para el cliente	Maxima relación	Requerimientos del cliente (explícitos e implícitos)	Columna #				
				1	2	3	4	5
			Requerimientos ingenieriles	Tamaño	Costos	Consumo energético	Portabilidad	Conectividad
33%	5	9	Funcional	○	●		●	●
7%	1	9	Comodo	●	●	○	●	●
20%	3	9	Economico	●	●	●	●	○
13%	2	9	Facil mantenimiento	●	○			
27%	4	9	Seguro		●	○		●
			Maxima relación	9	9	9	9	9
			Puntaje de importancia técnica	460	820	280	540	660
			Peso relativo	17%	30%	10%	20%	24%

Se obtienen como resultado de esto las siguientes tablas:

Tabla 2. Requerimientos ingenieriles y peso relativo para la estructura.

Requerimiento ingenieril	Peso relativo
Altura máxima alcanzable	25%
Capacidad de carga	22%
Maniobrabilidad	17%
Procesos de fabricación	14%
Materiales de construcción locales	11%
Complejidad geométrica estructural	10%

Tabla 3. Requerimientos ingenieriles y peso relativo para el sistema de control.

Requerimiento ingenieril	Peso relativo
Costos	30%
Conectividad	24%
Portabilidad	20%
Tamaño	17%
Consumo energético	10%

Con los requerimientos ingenieriles calificados se procede a realizar la evaluación de alternativas, dando como resultado un diseño de grúa tipo pórtico con un sistema de control mediante controlador esp32.

Tabla 4. Evaluación de alternativas para el tipo de grúa a usar.

		Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
		Puntuación	Ponderado	Puntuación	Ponderado	Puntuación	Ponderado
Altura máxima alcanzable	25%	4	1,01	5	1,26	3	0,76
Capacidad de carga	22%	4	0,89	4	0,89	1	0,22
Maniobrabilidad	17%	5	0,87	5	0,87	3	0,52
Procesos de fabricación	14%	2	0,28	5	0,71	5	0,71
Materiales de construcción locales	11%	1	0,11	3	0,34	4	0,45
Complejidad geométrica estructural	10%	5	0,48	4	0,39	5	0,48
		3,65		4,46		3,15	

Tabla 5. Evaluación de alternativas para el sistema de control.

		PLC		esp32	
		Puntuación	Ponderado	Puntuación	Ponderado
Costos	30%	1	0,30	5	1,49
Conectividad	24%	3	0,72	5	1,20
Portabilidad	20%	3	0,59	4	0,78
Tamaño	17%	3	0,50	4	0,67
Consumo energético	10%	3	0,30	5	0,51
		2,41		4,64	

La alternativa ganadora fue un diseño de grúa pórtico modificado que permite desplegarse verticalmente mediante un juego de tornillos de potencia accionados por motorreductores, capacidad de girar sus patas para mejorar su capacidad de adaptarse a distintas configuraciones de talleres, cuenta 6 motorreductores, 2 de ellos se encargan del sistema de elevación y los 4 restantes transmiten potencia a ruedas mecanum para permitir desplazamiento omnidireccional, cuenta con un módulo esp32 que habilita a los operarios controlar remotamente los motorreductores mediante un aplicativo móvil haciendo uso de su conectividad vía Bluetooth. No existe mecanismo de retención de carga, para solucionar este problema los tornillos de potencia serán diseñados como tornillos autobloqueantes lo que implica que no cederán ante ninguna carga a menos que existe un torque para que se muevan.

5.2 DISEÑO DE DETALLE Y DIMENSIONAMIENTO

En esta etapa se implementaron cálculos ingenieriles con el fin de dar dimensiones a los componentes estructurales y de potencia, entre los elementos calculados y seleccionados están:

- Polipasto y carrito. (Ver anexo B)
- Viga principal. (Ver anexo C)

- Tornillos de potencia del sistema telescópico. (Ver anexo D y E)
- Armadura de soporte de la estructura. (Ver anexo F)
- Eje de transmisión de potencia. (Ver anexo G)
- Bujes. (Ver anexo H)
- Anillos retenedores. (Ver anexo I)
- Motorreductores. (Ver anexo J)
- Piñones. (Ver anexo K)
- Soldadura (Ver anexo L)

En la tabla 6 se observa el resumen de los resultados obtenidos para los elementos diseñados.

Tabla 6. Resultados de esfuerzos y deformaciones obtenidos en elementos diseñados.

Elemento	Esfuerzo máximo (Mpa)	FS de esfuerzos	Deformación máxima	Deformación máxima admisible	Expuesto a fatiga
Viga principal	134,02	2,57	1,18 E-3	1,33 E-3	No
Patas soporte	45,48	5,4	5,84 E-5		No
Tornillo de potencia	46,93	5,11	-		No
Eje de transmisión de ruedas	38,33	3,15	1,94 E-4		Sí

En la tabla anterior se observan los valores de deformaciones, factor de seguridad de esfuerzos, si se encuentra expuesto a fallar por fatiga y esfuerzos para cada elemento diseñado, de acuerdo con la bibliografía se recomiendan valores de seguridad entre 2 y 4 para máquinas similares a la que se diseña en este proyecto. Según la norma DIN 120¹⁴ el valor máximo admisible en deformaciones es de 1/750 (0.00133) bajo este criterio todos los elementos cumplen con la condición. En cuanto a la fatiga, el eje de las ruedas es el único elemento expuesto a fatiga, debido a que su velocidad de rotación provoca una inversión de las cargas mientras que trabaja bajo carga combinada. El tornillo de

¹⁴ ARISMENDI PINZÓN, Jerson Yamid; BRAVO CORREDOR, Alexander. Diseño y construcción de una plataforma elevadora de carrocerías de camiones en la empresa Ninox S.A.S. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2020. 147 p.

potencia no presenta deformación máxima ya que es irrelevante debido a la configuración del sistema, el parámetro importante es el pandeo, ya que actúa como columna, la carga crítica se encuentra 2.57 veces por encima de la carga de operación, por lo que es seguro.

5.2.1 Viga central: Se hace la selección del polipasto y el carrito teniendo en mente que deben soportar al menos dos veces la carga máxima de diseño, por esto se escoge un polipasto con capacidad de cargar hasta cinco toneladas y un carrito trolley que soporta hasta 6 toneladas, luego, con esta información se procede a determinar los factores de carga que actuarán sobre la viga, carrito, polipasto, carga de elevación, factor de carga muerta, factores de carga e inercia del polipasto consiguiendo así una carga total de 23935.52 N, con esta carga se decide usar un factor de seguridad de 2.0 por recomendación de Mott¹⁵, y de esta manera se consiguen tanto el material como las dimensiones de la viga (Viga IPE 180 de acero ASTM A52 G-50 NTC1985 con 2.5 metros de largo) dada estas características se evalúan los esfuerzos en los puntos críticos recomendados en la norma CMAA #74¹⁶ dando como resultado que en el punto más crítico se presenta un esfuerzo de 134 MPa, esto da que el factor de seguridad de operación resulta en 2.57 para esta viga, asegurando que la viga cumplirá satisfactoriamente con su función. Se propone usar la viga ofrecida por el proveedor AGOFER. Para más detalles ver anexo C.

¹⁵ MOTT, Robert L. Diseño de elementos de máquinas - 2 edición. [s.l.]: Prentice Hall, 2000. ISBN 9789688805756.

¹⁶ CRANE MANUFACTURING ASSOCIATION OF AMERICA. Specifications for top running & under running single girder electric traveling cranes utilizing under running trolley hoist. CMAA #74. Charlotte, USA. 2010. 78 p.

Tabla 7. Selección de Viga

Selección Viga			
Variables de entrada			
W	23,93	kN	Carga total
Resultado			
IPE	180		IPE de la viga
L	2.5	m	Longitud de la viga
N	2.57		Factor de seguridad

5.2.2 Tornillos de potencia: Se asume como carga máxima 24 kN transmitida desde la viga a 2 apoyos, cada apoyo soportará 12 kN y en cada uno de estos apoyos se encuentra un tornillo de potencia, se usa el proceso de diseño sugerido en el *diseño de Budynas*¹⁷ y en el libro de *Mott*¹⁸, primeramente, se evalúa la estabilidad del tornillo ante el caso más crítico obteniendo que es estable para las condiciones de trabajo, se obtiene un diámetro de 1,5 pulgadas, con rosca cuadrada de paso 0,8 cm con rosca derecha y 1.5 metros de altura, además se obtienen los torques de subida y bajada, el ángulo de avance se escogió para que fuera un tornillo autobloqueante. Para más detalles ver anexos D y E. El elemento fue rediseñado, ya que inicialmente se tenía un factor de seguridad mínimo de 6 para pandeo, esto resultaba en un elemento sobredimensionado,

¹⁷ BUDYNAS, R. Diseño en ingeniería mecánica de shigley - 9 edición. [s.l.]: McGraw-Hill Educación, 2012. 1039 p. ISBN 9786071507716.

¹⁸ MOTT, Robert L. Diseño de elementos de máquinas - 2 edición. [s.l.]: Prentice Hall, 2000. ISBN 9789688805756.

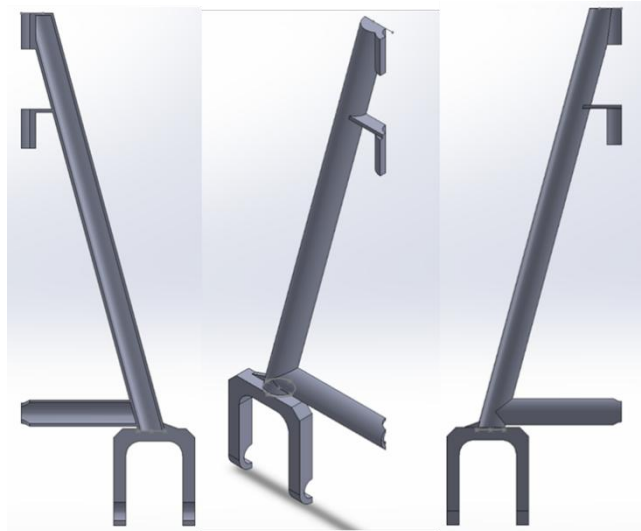
finalmente se obtiene que para su diseño definitivo el factor de seguridad mínimo será el de pandeo (comparado con el de esfuerzos) con un valor de 2.43, este esta dentro del rango recomendado en el libro de Mott (entre 2 y 4).

Tabla 8. Diseño Tornillo de potencia.

Diseño Tornillo de potencia			
Variables de entrada			
F	12	kN	Carga total
Resultado			
P	0,8	cm	Paso de la rosca
L	1.5	m	Longitud roscada
D_{ext}	3,81	cm	Diámetro exterior
D_{int}	3,01	cm	Diámetro interno
N	2.43		Factor de seguridad de pandeo
N	5.11		Factor de seguridad de esfuerzos

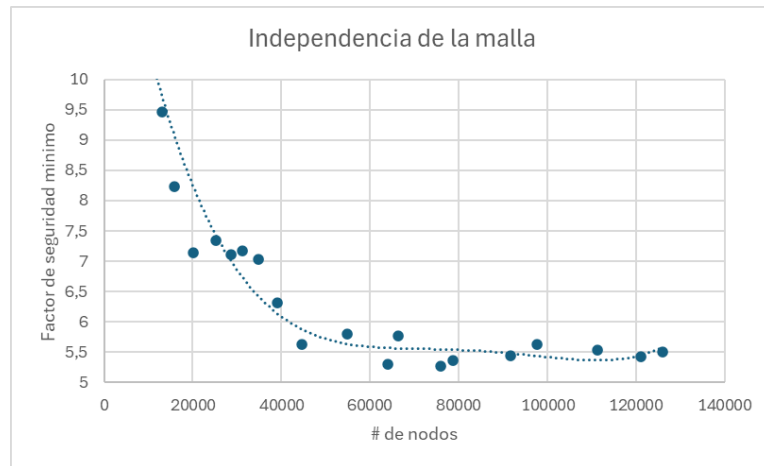
5.2.3 Armadura de la estructura: Con las cargas previamente calculadas se hace un diseño de tal manera que garantiza un grado coherente de estabilidad, en este caso las dimensiones fueron calculadas exclusivamente mediante un proceso iterativo en el software Ansys debido a la complejidad matemática que implicaba la naturaleza del problema, de este proceso se decidió usar tubería de acero de 2.5 pulgadas de diámetro y 7 milímetros de espesor con una forma como se muestra a continuación en la figura 4. Para más detalles ver anexo F.

Figura 6. Modelo CAD para análisis de esfuerzos en Ansys



Al realizar el análisis en Ansys se efectuó el respectivo análisis de independencia de la malla para garantizar la fiabilidad de los resultados ofrecidos por la simulación.

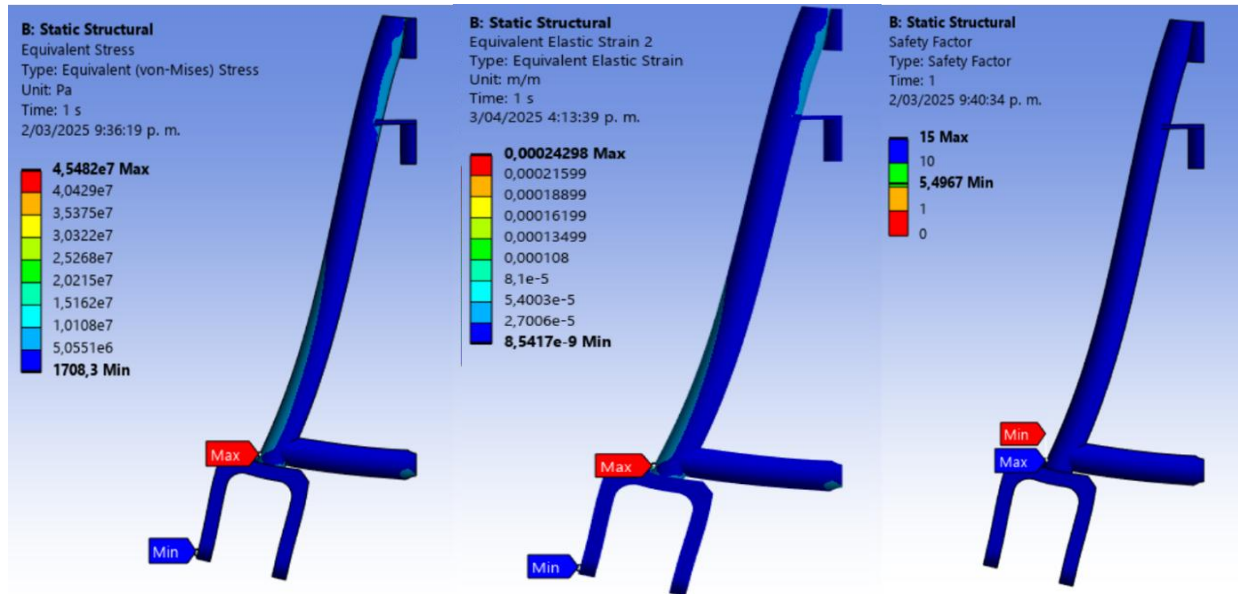
Figura 7. Estudio de independencia de la malla para los soportes.



De este proceso se obtuvieron los siguientes mapas de desplazamientos, esfuerzos y de factores de seguridad, dando como resultado un factor de seguridad de 5,4 en la parte más crítica de la estructura. Aunque este valor pueda estar un poco por encima de lo recomendado (entre 2.0 y 4.0) no se rediseña el elemento debido a que cumple satisfactoriamente el criterio de deformación. Según la norma DIN 120¹⁹ para elementos mecánicos la deformación sea igual o inferior a 1/750 (0.00133) mientras que en el diseño se consigue un valor de 0.0002.

¹⁹ ARISMENDI PINZÓN, Jerson Yamid; BRAVO CORREDOR, Alexander. Diseño y construcción de una plataforma elevadora de carrocerías de camiones en la empresa Ninox S.A.S. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2020. 147 p.

Figura 8. Resultados de la simulación del elemento de soporte.



5.2.4 Eje de transmisión: Partiendo de que cada eje debe soportar un cuarto de la carga total se designa una carga de 6 kN que actúa en el centro y un torque de 21 Nm, es importante denotar que, aunque la condición de trabajo del eje sea difícilmente considerada dinámica el elemento será diseñado asumiendo condición de fatiga y proyectado para vida infinita. Además, se calculan para que permitan un fácil montaje y desmontaje de las ruedas sin comprometer la seguridad del sistema que complementan, por esta razón se decidió usar un eje de diámetro constante asistido por un juego de bujes y otro juego de anillos retenedores. Para más detalles ver anexo G.

Tabla 9. Diseño eje de las ruedas

Diseño eje de las ruedas			
Variables de entrada			
Torque	21	Nm	Torque a transmitir
w	6	kN	Carga transversal
Resultado			
D	4.5	cm	Diámetro del eje
L	25	cm	Longitud del eje
M	Acero AISI 1020		Material
N	3,15		Factor de seguridad

5.2.5 Motorreductores: Los motorreductores fueron calculados primeramente según la especificación de que pudieran funcionar a partir de una batería de 12 voltios, luego de esto se escogieron según la exigencia de torque para cada aplicación, es decir se parte de que el motor de las ruedas debe poder acelerar la estructura y el del tornillo debe producir suficiente torque para su elevación. Para más detalles ver anexo J.

Tabla 10. Selección motor de las ruedas.

Selección motor de las ruedas										
42GP-775 Original Speed(before deceleration): 6,000RPM										
Voltage (V)	Reduction Ratio	L (mm)	No-load		Rated Load				Locked-rotor	
			Rotate Speed (RPM)	Current (A)	Rotate Speed (RPM)	Current (A)	Torque (kg cm)	Power (W)	Current (A)	Torque (kg cm)
368.8	63.6		16	0.5	13	3.2	120	15		
515.6			12	0.5	10	3.2	168	15		
721.0			8	0.5	6.8	3.2	235	15		

Variables de entrada			
M	2446	kg	Masa de la máquina
a	0.04	$\frac{m}{s^2}$	Aceleración máxima de la grúa
T	10.55	$N*m$	Torque mínimo necesario

Resultado			
T	11.77	Nm	Torque de salida
w	13	rpm	Velocidad del motor
R	368		Relación de torques

Tabla 11. Selección motor de elevación.

Selección motor de elevación										
42GP-775 Original Speed(before deceleration): 6,000RPM										
Voltage (V)	Reduction Ratio	L (mm)	No-load		Rated Load				Locked-rotor	
			Rotate Speed (RPM)	Current (A)	Rotate Speed (RPM)	Current (A)	Torque (kg cm)	Power (W)	Current (A)	Torque (kg cm)
13.7			440	0.5	335	3.2	3.8	15	19	18.3
19.0	42.0		310	0.5	260	3.2	7.0	15	19	30
27.0			220	0.5	180	3.2	10.0	15	19	44

Variables de entrada			
T	0,53	$N*m$	Torque mínimo necesario

Resultado			
T	0,69	Nm	Torque de salida
w	260	rpm	Velocidad del motor
R	19		Relación de torques

5.2.6 Modelado y Planos: Ya con el dimensionamiento de todos los elementos se procede a elaborar sus modelos CAD y realizar los planos, en la imagen siguiente se observa el ensamble final de la máquina, con todos sus elementos y componentes esenciales. Los planos pueden ser consultados en el anexo L. En la figura 7 se observa el modelo del dispositivo con una carga de ejemplo.

Figura 9. Modelo CAD de la grúa remota con una carga ejemplo.



5.2.7 Análisis de vibraciones: Como paso final al diseño del dispositivo se realizará un análisis modal de vibraciones para determinar sus modos naturales de vibración y sus frecuencias naturales con el fin de tenerlas identificadas y corroborar que, por ejemplo, no exista posibilidad de que la estructura entre en resonancia con las vibraciones producidas por los motorreductores.

Para esto se hará uso nuevamente del software Ansys y un análisis modal²⁰, implementando la ecuación general de vibraciones libres no amortiguadas. Donde M representa la masa del sistema, k la rigidez, u(t) la función de posición en función de tiempo.

Al ingresar la estructura en Ansys y desarrollar el análisis se consiguen los siguientes resultados, apreciados en la tabla 6.

Tabla 12. Análisis modal

Análisis modal	
$M\ddot{u}(t) + Ku(t) = 0$	
Modo de vibración	Frecuencia natural de modo (Hz)
1	4,89
2	7,68
3	9,04
4	26,98
5	32,17
6	33,69

Con estas frecuencias se procede a comparar estos datos con las frecuencias de operación de los motorreductores.

²⁰ ANSYS LEARNING. Performing Modal Analysis Using Ansys Mechanical – Lesson 1 [video]. YouTube. (20, noviembre, 2020). [Consultado el 10, marzo, 2025]. 11:14 min. Disponible en Internet: <<https://www.youtube.com/watch?v=CGpNf1Zi9AI>>.

Tabla 13. Frecuencias de operación de motorreductores.

Frecuencias de operación motorreductores	
Motorreductor	Frecuencia de operación (Hz)
Ruedas	0,22
Elevación	4,33

Acá se puede observar que, para las frecuencias de operación, en el caso más crítico, se tiene una relación de frecuencias del 88% respecto al modo 1, este resultado se toma como adecuado, teniendo en consideración los siguientes puntos^{21 22}:

- Empieza a considerarse inadecuado, como regla general, cuando esta relación es mayor 90%.
- Se hace el análisis suponiendo una estructura rígida, pero en este tipo de estructuras siempre resulta con un amortiguamiento de entre 1% y 5% cuando son aplicados, dando así que la relación de frecuencias, en el peor de los casos, será de 87%.
- Para incrementar la seguridad se propone implementar una espuma amortiguadora entre la montura de los motores elevadores y la estructura, con el fin amortiguar la vibración, estas espumas consiguen amortiguamientos de entre el 2% y 5%.
- También es importante tener en cuenta la relación de masa efectiva a masa total, esta indica la cantidad de masa que tiene influencia en cada modo de vibración, discriminada por dirección. Para el modo 1 la dirección predominante es la del eje Z, con un 23%. Mientras que las vibraciones producidas por los motores se encontrarán actuando en el eje X donde la relación de masas está en el orden de la millonésima parte.

²¹ RAO, Singiresu. Mechanical vibrations. Pearson, 2016. ISBN 9780134361925.

²² ROSSAS SARMIENTO, Guillermo. Estudio de vibraciones mecánicas en máquinas reciprocantes. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2004. 390 p.

Al tener presentes estas consideraciones es posible afirmar que la máquina no va a tener problemas relacionados con resonancia.

A continuación, se muestra la figura 10 donde se aprecia la tasa de masa efectiva con respecto a la masa total. Para más detalles en el análisis modal referirse al Anexo M.

Figura 10. Relación entre masa efectiva y masa total para los modos de vibración.

Ratio of Effective Mass to Total Mass

Mode	Frequency [Hz]	X Direction	Y Direction	Z Direction	Rotation X	Rotation Y	Rotation Z
1	4,886	2,088e-007	6,8146e-012	0,23182	4,6704e-003	1,4897e-005	2,2042e-009
2	7,6827	0,34785	6,2288e-010	4,3476e-010	3,4975e-008	0,28391	1,3769e-003
3	9,0373	9,2905e-006	5,8576e-011	1,4293e-005	3,6441e-007	2,443e-002	7,3814e-009
4	26,977	1,0715e-005	1,7133e-010	9,038e-003	1,5048e-004	6,629e-006	3,6974e-006
5	32,169	5,4563e-004	2,0624e-004	5,9125e-007	1,4059e-004	4,5996e-004	3,1924e-004
6	33,694	0,1893	6,1216e-007	2,6261e-006	2,5127e-008	0,15473	0,11082
Sum		0,53772	2,0685e-004	0,24087	4,9618e-003	0,46355	0,11252

6. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL REMOTO

En este capítulo se detalla el proceso de implementación del control remoto para el sistema de manipulación de cargas pesadas. Se describe la configuración del microcontrolador ESP32, el desarrollo del firmware necesario para gestionar la comunicación mediante Bluetooth Classic y la construcción de la aplicación móvil en Flutter que permite la interacción con el sistema.

El desarrollo de este sistema implicó la selección y configuración del hardware, la implementación del software tanto en el ESP32 como en la aplicación móvil y la realización de pruebas para validar su correcto funcionamiento. A lo largo de este capítulo, se presentan los esquemas de conexión, fragmentos de código clave y los resultados obtenidos en la integración de ambos componentes.

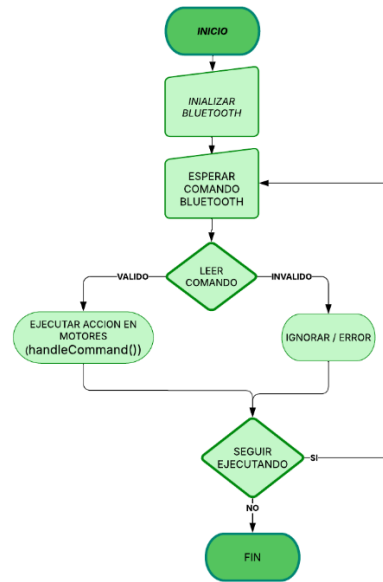
Se resalta que el diseño del control remoto, el diagrama eléctrico y la aplicación están siendo diseñados para ser usados tanto en la máquina real como en el prototipo- en el diseño real se usará el mismo microcontrolador, los mismos drivers y el mismo algoritmo, la única diferencia es que en el prototipo se controlan motores más pequeños.

6.1 CONFIGURACIÓN DEL ESP32

A continuación, se detalla la implementación del control remoto del sistema de manipulación de cargas mediante un módulo Bluetooth y un ESP32. El sistema permite recibir comandos desde un dispositivo móvil para controlar el movimiento de la estructura, tanto en desplazamiento horizontal como en elevación. Para lograrlo, se emplea la biblioteca del ESP32, la cual facilita la comunicación Bluetooth, junto con el uso de pines de salida digital para controlar motores de corriente continua (DC).

A continuación, se describe el funcionamiento del flujo del programa y las distintas formas en que se mueven los motores (ver Figura 10).

Figura 11. Diagrama de flujo programa esp32



Cuando el comando es válido, se ejecuta la función handleCommand, la cual contiene estructuras condicionales if y else if para gestionar diferentes escenarios. A continuación, se presenta la Tabla 8, que resume todos los casos contemplados en la función. Los motores están distribuidos según los tres posibles estados del sistema, lo que facilita su comprensión en las Figuras de los casos 1, 2 y 3 (ver Figura 11).

Figura 12. Caso #1, Caso #2 y Caso #3

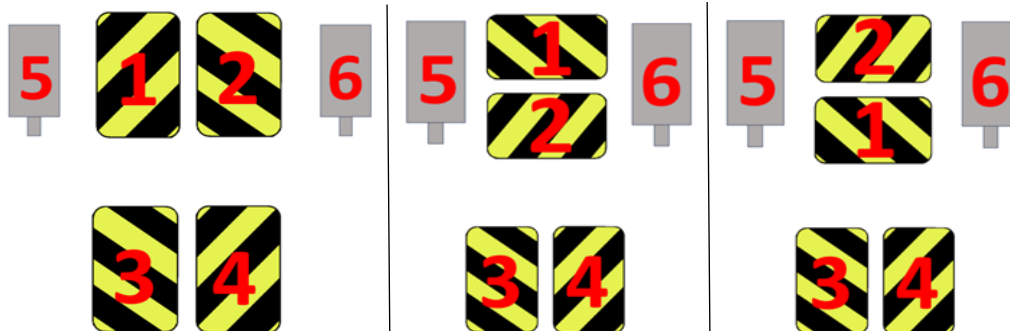
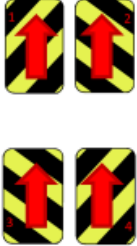



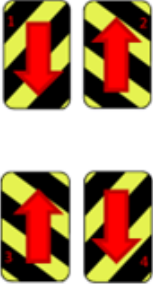

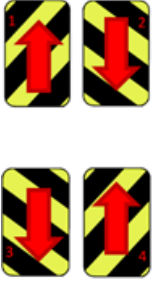

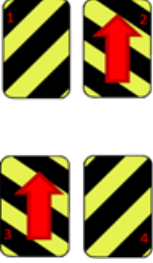

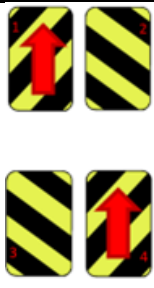











Tabla 14. Movimientos Caso #1

Comando	Descripción	Descripción gráfica	Movimiento final
CASO #1			
10	Adelante		
11	Atrás		
12	Izquierda		
13	Derecha		
14	Diagonal- Izquierda- Superior		

15	Diagonal-Derecha-Superior		
16	Diagonal-Izquierda-Inferior		
17	Diagonal-Derecha-Inferior		
18	Giro derecha manecillas del reloj		
19	Giro izquierda contra manecillas del reloj		

En el Anexo O, se pueden observar los diferentes tipos de casos junto con sus movimientos específicos, detallando el comportamiento del sistema en cada situación y facilitando su comprensión.

A continuación, se presenta el código desarrollado, explicando en detalle cada una de sus secciones.

6.1.1. Inclusión de Bibliotecas y Definición de Pines: El código comienza con la inclusión de la biblioteca *BluetoothSerial.h*, que permite establecer una comunicación Bluetooth entre el ESP32 y un dispositivo externo. Posteriormente, se declara un objeto *SerialBT* de la clase *BluetoothSerial*, el cual se utilizará para gestionar la comunicación. Posterior a esto se asignan unos pines a los motores que controlan el desplazamiento del sistema. Cada motor posee dos pines de control (IN1 e IN2), los cuales permiten definir la dirección de giro al establecer diferentes combinaciones de niveles lógicos (HIGH o LOW). los motores se nombraron dependiendo de su función.

```
#include "BluetoothSerial.h"
BluetoothSerial SerialBT;

const int motor1_IN1 = 32;
const int motor1_IN2 = 33;
const int motor2_IN1 = 25;
const int motor2_IN2 = 26;
const int motor3_IN1 = 27;
const int motor3_IN2 = 21;
const int motor4_IN1 = 12;
const int motor4_IN2 = 13;
const int lift1_IN1 = 18;
const int lift1_IN2 = 17;
const int lift2_IN1 = 4;
const int lift2_IN2 = 16;
```

6.1.2. Configuración del Sistema: El método *setup()* inicializa la comunicación serial a 115200 baudios, debido a que es una velocidad estándar y comúnmente soportada por microcontroladores y softwares permitiendo la depuración y monitoreo del sistema a través del puerto serie, se configuran los pines de los motores como salidas digitales, lo que permitirá enviar señales de control para activar y desactivar los motores, y finalmente, se inicializa la comunicación Bluetooth con el nombre "*ESP32_Bluetooth_crane*", lo que permitirá que el dispositivo sea detectado por otros dispositivos Bluetooth.

```
void setup() {  
  Serial.begin(115200);  
  pinMode(motor1_IN1, OUTPUT);  
  pinMode(motor1_IN2, OUTPUT);  
  pinMode(motor2_IN1, OUTPUT);  
  pinMode(motor2_IN2, OUTPUT);  
  pinMode(motor3_IN1, OUTPUT);  
  pinMode(motor3_IN2, OUTPUT);  
  pinMode(motor4_IN1, OUTPUT);  
  pinMode(motor4_IN2, OUTPUT);  
  pinMode(lift1_IN1, OUTPUT);  
  pinMode(lift1_IN2, OUTPUT);  
  pinMode(lift2_IN1, OUTPUT);  
  pinMode(lift2_IN2, OUTPUT);  
  SerialBT.begin("ESP32_Bluetooth_crane");  
  Serial.println("Bluetooth iniciado");}
```

6.1.3. Bucle Principal: En el bucle principal, el sistema espera la recepción de datos a través del puerto Bluetooth previamente iniciado. Cuando se detecta un dato, este se almacena en una cadena de caracteres llamada *command*, la cual se inicializa como una cadena vacía. A continuación, se realizan validaciones para verificar que el dato recibido sea un dígito. Si cumple con esta condición, se concatena en la variable *command* y luego se convierte en un número entero, el cual se envía como parámetro a la función *handleCommand()*.

```

void loop() {
  String command = "";

  while (SerialBT.available()) {
    delay(10);
    char c = SerialBT.read();
    if (isDigit(c)) {
      command += c;
    }
  }

  if (command.length() > 0) {
    int commandNum = command.toInt();
    Serial.print("Comando recibido: ");
    Serial.println(commandNum);
    handleCommand(commandNum);
  }
}

```

6.1.4 Funciones de Control: El programa cuenta con 4 funciones principales, dos encargadas a mover y detener los motores encargados de las ruedas y las otras dos encargadas de activar y detener el tornillo de potencia.

6.1.4.1 Movimiento y detención de Ruedas

```

void moveWheels(int m1_IN1, int m1_IN2, int m2_IN1, int m2_IN2, int m3_IN1, int
m3_IN2, int m4_IN1, int m4_IN2) {
  digitalWrite(motor1_IN1, m1_IN1);
  digitalWrite(motor1_IN2, m1_IN2);
  digitalWrite(motor2_IN1, m2_IN1);
  digitalWrite(motor2_IN2, m2_IN2);
  digitalWrite(motor3_IN1, m3_IN1);
  digitalWrite(motor3_IN2, m3_IN2);
  digitalWrite(motor4_IN1, m4_IN1);
  digitalWrite(motor4_IN2, m4_IN2);
}

```

```

void stopAllWheels() {
    moveWheels(LOW, LOW, LOW, LOW, LOW, LOW, LOW, LOW);
}

```

6.1.4.2 Control de Elevación

```

void moveLifter(int dir1, int dir2) {
    digitalWrite(lift1_IN1, dir1);
    digitalWrite(lift1_IN2, dir2);
    digitalWrite(lift2_IN1, dir1);
    digitalWrite(lift2_IN2, dir2);
}

void stopLifter() {
    digitalWrite(lift1_IN1, LOW);
    digitalWrite(lift1_IN2, LOW);
    digitalWrite(lift2_IN1, LOW);
    digitalWrite(lift2_IN2, LOW);}

```

6.1.5. Procesamiento de Comandos: La función *handleCommand()* recibe un número entero que representa un comando y lo procesa según su valor con un condicional *if()*.

```

void handleCommand(int command) {
    Serial.print("Procesando comando: ");
    Serial.println(command);
    if (command == 10) { // Adelante
        moveWheels(HIGH, LOW, HIGH, LOW, HIGH, LOW, HIGH, LOW);
    } else if (command == 11) { // Atrás
        moveWheels(LOW, HIGH, LOW, HIGH, LOW, HIGH, LOW, HIGH);
    }...
    ...} else if (command == 52) { // Detener elevación
        stopLifter();
    }
}

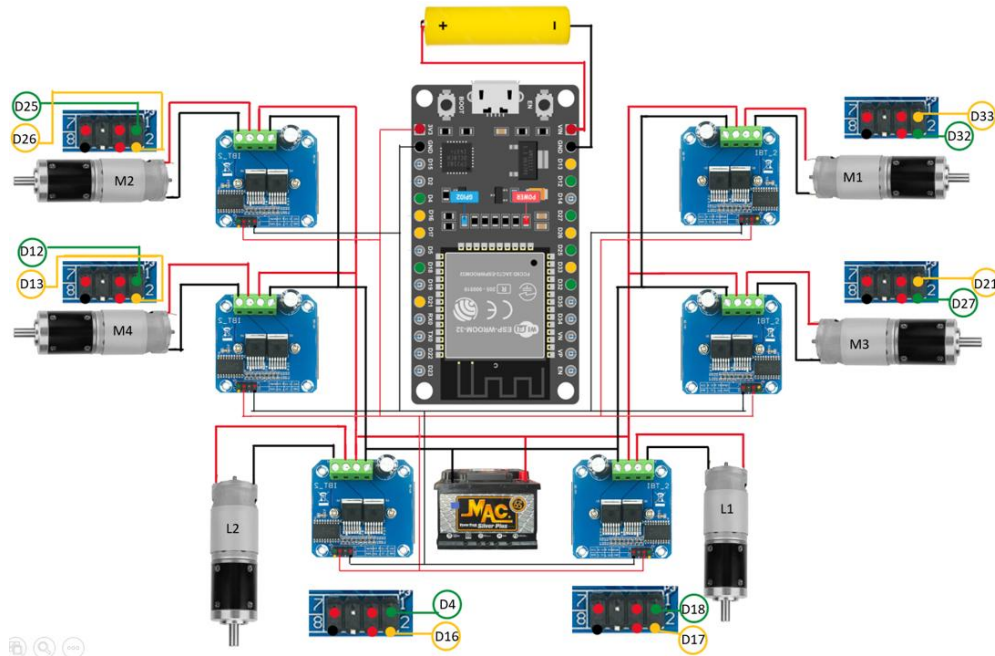
```

Por ejemplo, el comando 10 mueve el sistema hacia adelante activando los motores con la secuencia (HIGH, LOW, HIGH, LOW, HIGH, LOW, HIGH, LOW). El comando 11 invierte la dirección de los motores para retroceder. Adicionalmente se incluyen otras combinaciones para moverse en diagonal, girar en el sentido de las manecillas del reloj, en sentido contrario o elevar, bajar y detener la altura del sistema. (ver anexo Q)

6.2. DIAGRAMA DE CONEXIÓN ELÉCTRICA

El esquema mostrado anteriormente (ver figura 10) muestra la distribución del cableado, asegurando la correcta alimentación y control de los motores a través del ESP32. Cada motor está conectado a un driver BTS7960, el cual permite manejar la dirección de los motores mediante señales PWM enviadas desde el microcontrolador. Además, se han asignado pines específicos del ESP32 para cada conexión, optimizando la gestión del sistema. La batería suministra la energía necesaria para los motores, mientras que las conexiones a tierra garantizan la estabilidad del circuito y previenen posibles fallos por diferencias de voltaje.

Figura 13. Diagrama conexiones esp32



6.3. ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE CONTROL

Se desarrolló un programa en Flutter debido al conocimiento previo en este framework, el cual utiliza Dart como lenguaje de programación. Se adoptó una arquitectura modular, lo que facilita su lectura, mantenimiento y futuras modificaciones. Además, esta estructura permite la reutilización de módulos en otros proyectos y la adaptación a nuevas funcionalidades. El proyecto se dividió en los siguientes módulos:

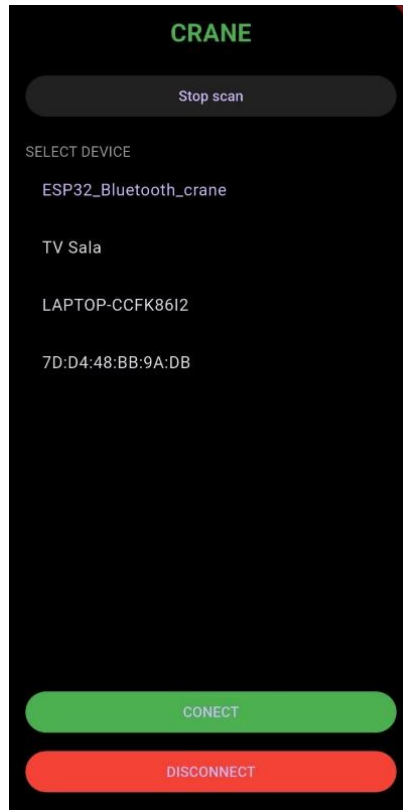
6.3.1 Módulo: MyApp (Aplicación Principal): Este módulo establece la configuración global de la aplicación y su estructura visual, encargándose de la inicialización en Flutter de igual forma establece la ruta inicial hacia la pantalla principal (HomePage).

6.3.2 Módulo: HomePage (Pantalla Principal): Este módulo gestiona la conexión Bluetooth en la aplicación, permitiendo descubrir, seleccionar y conectar dispositivos Bluetooth Classic. Para ello, utiliza el plugin `bluetooth_classic`, que interactúa con la API Bluetooth del sistema. Además, proporciona una interfaz intuitiva con un botón de escaneo, una lista de dispositivos disponibles y controles para conectar o desconectar fácilmente.

Funcionalidades principales:

- Solicitud y gestión de permisos Bluetooth.
- Escaneo y detección automática de dispositivos Bluetooth disponibles.
- Visualización de una lista interactiva de dispositivos encontrados.
- Selección y conexión a dispositivos específicos.
- Navegación a la pantalla del dispositivo conectado.
- Gestión de desconexión de dispositivos.

Figura 14. Menú bluetooth del aplicativo.

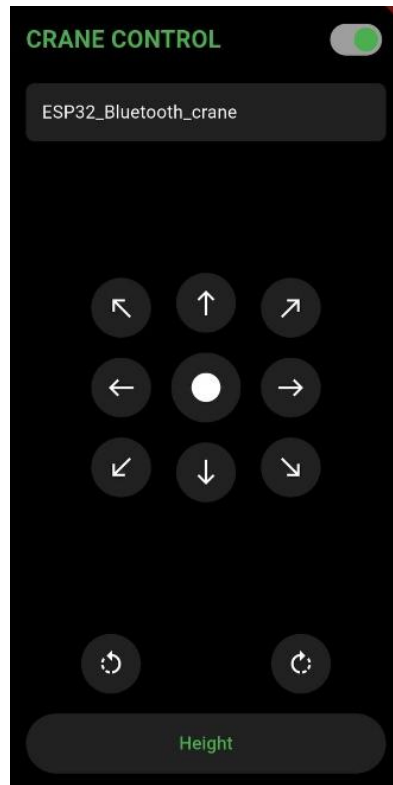


6.3.3 Módulo: ConnectedScreen (Pantalla de Control del Dispositivo): Este módulo permite interactuar con un dispositivo Bluetooth conectado a la aplicación. Proporciona una interfaz intuitiva para controlar el movimiento de la grúa mediante comandos específicos. Los controles táctiles garantizan una respuesta inmediata del dispositivo, enviando comandos específicos en eventos de presión y liberación.

Funcionalidades principales:

- Interfaz direccional con nueve botones para movimientos precisos (norte, sur, este, oeste y diagonales).
- Envío de comandos en tiempo real al dispositivo Bluetooth conectado.
- Control de rotación mediante botones dedicados (izquierda/derecha).
- Gestión de desconexión con confirmación visual mediante un interruptor.

Figura 15. Modulo control móvil del aplicativo.

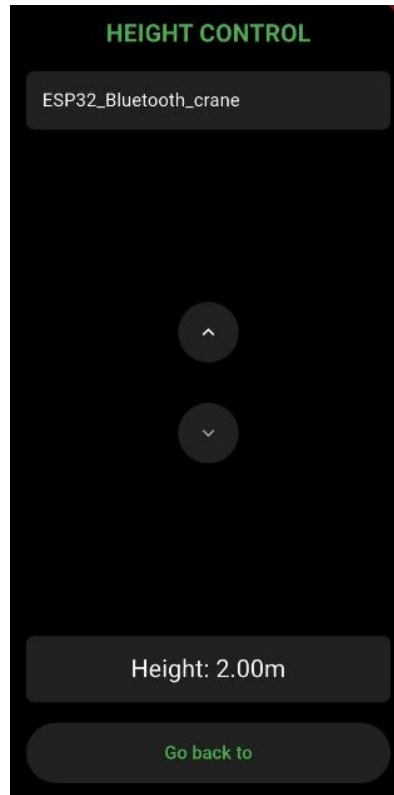


6.3.4 Módulo: HeightScreen (Control de Altura): Este módulo permite ajustar la altura de la grúa dentro de rangos predefinidos mediante una interfaz intuitiva. El diseño minimalista ofrece retroalimentación visual clara sobre los límites operativos y el estado actual, asegurando una operación precisa y segura.

Funcionalidades principales:

- Control de elevación vertical con botones (subir/bajar).
- Sistema de limitación automática para mantener la altura dentro de parámetros seguros (2.00m - 3.00m).
- Visualización en tiempo real de la altura actual con precisión de dos decimales.
- Desactivación automática de controles al alcanzar los límites de altura.
- Envío de comandos específicos al dispositivo Bluetooth.
- Mantenimiento del estado global de altura entre navegaciones.

Figura 16. Modulo control de altura del aplicativo.

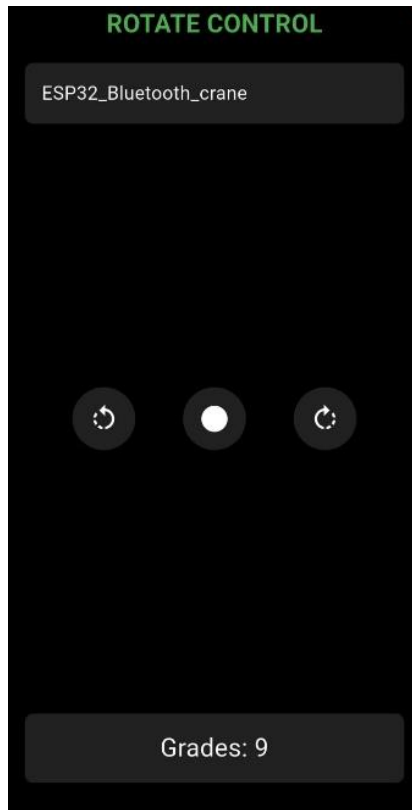


6.3.5 Módulo: TwistScreen (Control de Rotación): Este módulo permite ajustar la rotación de la grúa en un rango de ángulos controlados. Los controles se ajustan dinámicamente a los límites actuales para garantizar seguridad y precisión en la operación.

Funcionalidades principales:

- Control bidireccional de rotación (izquierda/derecha).
- Limitación automática de rotación dentro de un rango seguro (-90° a 90°).
- Visualización en tiempo real del ángulo actual en grados.
- Desactivación automática de controles al alcanzar los límites de rotación.

Figura 17. Modulo control de rotación del aplicativo.

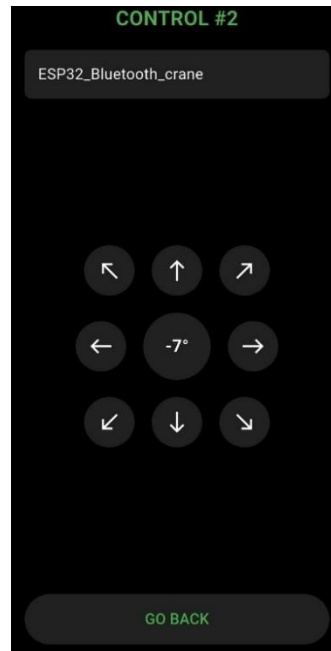


6.3.6 Módulo: RotateDirectionScreen (Control Avanzado de Dirección): Este módulo proporciona un control omnidireccional de la grúa, ajustando automáticamente los comandos según el estado de rotación. Este módulo ajusta los comandos según el ángulo actual, permitiendo maniobras complejas con una interfaz intuitiva y de alto contraste.

Funcionalidades principales:

- Control multidireccional con ocho puntos de navegación (norte, sur, este, oeste y diagonales).
- Generación dinámica de comandos según el contexto de rotación.
- Visualización prominente del ángulo de rotación actual.
- Transmisión instantánea de comandos al dispositivo Bluetooth.

Figura 18. Modulo control móvil avanzado del aplicativo.



6.3.7 Widgets: En el desarrollo de la aplicación, se han implementado diversos widgets para optimizar la interacción del usuario con los dispositivos Bluetooth. Un widget es un componente de la interfaz gráfica que encapsula una funcionalidad específica, permitiendo una experiencia de usuario modular, intuitiva y eficiente. Estos widgets han sido diseñados de manera modular, lo que facilita su reutilización en otros proyectos, garantizando una integración flexible y escalable. A continuación, se describen los principales widgets implementados en la aplicación.

ConnectionButtons: Este módulo corresponde a un conjunto de botones de control diseñados para gestionar la conexión y desconexión de dispositivos Bluetooth.

DeviceList: Este widget permite la visualización dinámica de los dispositivos Bluetooth detectados, proporcionando una interfaz interactiva para la selección de dispositivos.

ScanButton: El módulo ScanButton proporciona un control de escaneo de dispositivos Bluetooth.

Para visualizar el código completo del aplicativo móvil ver anexo R

7. IMPLEMENTACIÓN DE LA NORMA ISO 12100

La seguridad en el diseño de sistemas mecánicos, especialmente aquellos destinados a la manipulación de cargas elevadas en entornos operativos restringidos, constituye una responsabilidad primordial en la ingeniería. Este capítulo detalla la aplicación de los principios fundamentales establecidos en la norma ISO 12100:2010²³. El enfoque principal radica en la identificación exhaustiva de peligros, la evaluación rigurosa de los riesgos asociados y la implementación estratégica de medidas preventivas para garantizar la seguridad del sistema de elevación móvil tipo pórtico con polipasto de cadena desarrollado.

7.1 DETERMINACION DE LIMITES OPERACIONALES

De acuerdo con el numeral 5.3.3 de la ISO 12100:2010, se definieron los límites operacionales de la máquina en función de las características del comportamiento mecánico de los componentes. Estos límites son:

- **Límite de altura máxima de elevación:** Se estableció un recorrido máximo para los tornillos de potencia. Si se excede este límite, se corre el riesgo de que los tornillos salgan de su alojamiento, generando pérdida de estabilidad y fallos estructurales.
- **Límite de altura mínima:** Se definió también un límite inferior para evitar que Los tornillos descendan más allá de lo permitido, lo cual podría ocasionar daños a componentes estructurales.
- **Límites de giro de las ruedas:** Se restringió el ángulo de giro a un rango controlado de 0° a 90°, con el fin de evitar enredos de cables, desalineación de componentes y pérdida de estabilidad. Así mismo se puso una restricción para el ángulo formado entre los dos soportes el cual como mínimo será de 20°

²³ UNE-EN. Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación del riesgo y reducción del riesgo. ISO 12100. Madrid, España: AENOR, 2012. 88 p.

7.2 IDENTIFICACION DE PELIGROS

Siguiendo la sección 5.4 de la ISO 12100²⁴, se identificaron los siguientes peligros razonablemente previsibles:

- **Salida accidental de tornillos de potencia**, lo cual puede ocurrir si se excede la altura máxima de elevación, generando riesgo de colapso del sistema.
- **Vuelco de la estructura**, causado por giros descontrolados, pérdida de alineación o uso en superficies irregulares.
- **Daño en conexiones eléctricas**, derivado del giro excesivo o de condiciones ambientales adversas.
- **Bloqueo del sistema por mal posicionamiento**, tanto de la plataforma como de los soportes, lo que podría ocasionar trabamiento mecánico o fallo funcional.

7.3 ESTIMACION DE RIESGOS

La estimación del riesgo se basó en la gravedad del daño potencial (muerte o lesiones graves), la frecuencia de exposición al peligro y la posibilidad de evitar o limitar el daño. Según la sección 5.5.2.2 de la ISO 12100, se identificó un nivel de riesgo elevado debido a:

- La posible presencia de múltiples personas durante la operación (operadores, supervisores, personal de mantenimiento).
- El tipo de daño esperado: caída de cargas, atrapamientos, lesiones por componentes mecánicos.
- La imposibilidad de evitar el daño en caso de que ocurra un fallo, ya que la progresión del accidente puede ser rápida o súbita.

²⁴ UNE-EN. Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación del riesgo y reducción del riesgo. ISO 12100. Madrid, España: AENOR, 2012. 88 p.

7.4 MEDIDAS DE PREVENCION

Como resultado del análisis, se aplicaron medidas preventivas de carácter técnico y de control. Estas se describen en la siguiente tabla:

Tabla 15. Implementación norma ISO 12100

Medida Implementada	Descripción	Riesgo Mitigado	Referencia en ISO 12100
Seguro en los tornillos de elevación	Se ubican dispositivos de bloqueo en los tornillos para evitar desajustes accidentales que comprometan la estabilidad.	Bloqueo de giro en los tornillos de potencia, evitando giros inesperados y el volcamiento.	6.3.3 – Prevención de fallos mecánicos
Restricción de giro de ruedas a 90°	Se impide el giro excesivo para evitar inestabilidad o pérdida de control del equipo.	Un giro descontrolado puede enredar los cables y desalinear los tornillos de potencia, trabando la máquina.	6.2.4 – Medidas para evitar movimientos no deseados
Bloqueo de navegación en la aplicación	Solo se permite acceder a ciertas funciones cuando las ruedas están en posición neutral (0°), garantizando un uso seguro.	Si la máquina cambia de modo en movimiento, puede volcarse o estrellarse por movimientos inesperados.	6.2.5 – Medidas de control para garantizar un uso seguro
Desactivación de botones en límites de elevación	Se bloquean los controles cuando el sistema alcanza los topes superior e inferior, evitando sobrecargas y fallos estructurales.	Evita que los tornillos de potencia se giren fuera de control, lo que podría hacer que la máquina pierda estabilidad.	6.2.6 – Principios para la estabilidad

8. PROTOTIPADO Y PRUEBAS

El proceso de manufactura del sistema se desarrolló en varias etapas, priorizando la precisión en la construcción y la fidelidad con el diseño final. Se utilizaron materiales y métodos de fabricación que permitieron replicar de manera efectiva la funcionalidad del sistema real, teniendo en cuenta que el prototipo cumple una escala de 1:5.

8.1 MATERIALES UTILIZADOS

Para la construcción del prototipo, se emplearon los siguientes materiales:

8.1.1 Estructura mecánica:

- o Tubos de acero estructural para la fabricación de las columnas principales.
- o Platinas de acero para la conformación de una viga tipo IPE, los soportes de los motores y las ruedas.
- o Varilla de tornillo mecanizada en sus extremos para facilitar el acople con el sistema de ajuste.
- o Tuercas soldadas en las columnas para guiar los tornillos de ajuste.
- o Bujes fabricados con el fin de proporcionar un soporte adecuado para los tornillos y minimizar el desgaste por fricción.

8.1.2 Sistema eléctrico y de control:

- o **Motores eléctricos:** Seis motores de corriente continua de 6V; dos con una velocidad de 250 RPM y cuatro con una velocidad de 11 RPM.
- o **Drivers BTS7960:** Seis controladores, uno por cada motor, seleccionados por su compatibilidad con la versión final del sistema.
- o **Microcontrolador ESP32:** Unidad central encargada de la gestión y control del sistema.
- o **Sistemas de alimentación:** Se utilizaron dos portapilas: uno con cuatro baterías para alimentar los motores y otro con tres baterías para el ESP32, buscando asemejarse al sistema original.

- o **Conexiones eléctricas:** Cables tipo jumper hembra, los cuales fueron alargados mediante soldadura con cautín y estaño, y posteriormente recubiertos con tubos termoencogibles para mejorar la aislación y reducir interferencias.

8.2 FABRICACIÓN DE COMPONENTES

El proceso de manufactura se llevó a cabo en varias fases, empleando técnicas de fabricación adecuadas para cada componente:

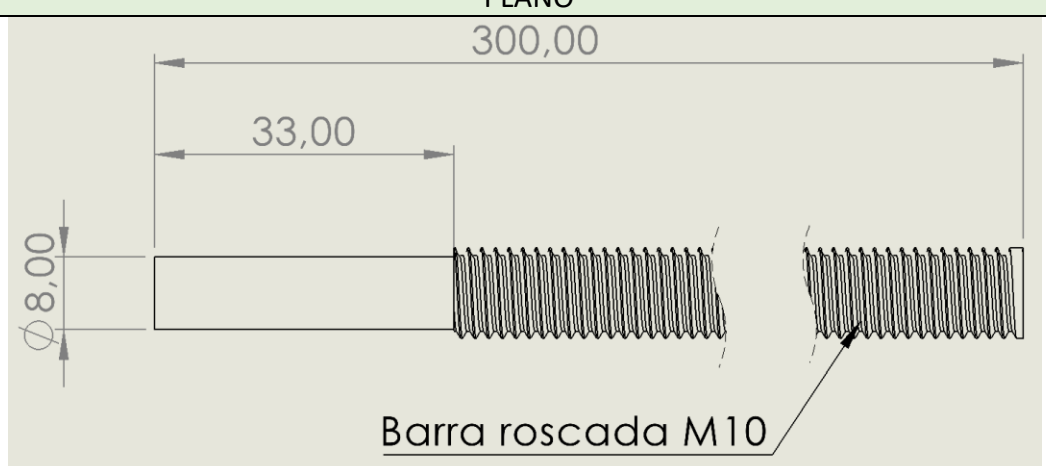
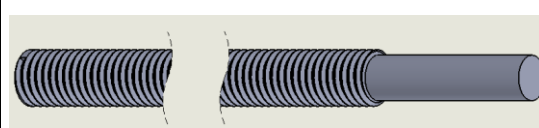

8.2.1 Soldadura: Se utilizaron procesos de soldadura para la unión de las platinas conformando la viga tipo IPE, la fabricación de los soportes y accesorios, asegurando un ensamblaje resistente. A continuación, se puede observar mediante una tabla de fabricación, uno de los procesos en los cuales se requirió soldadura (ver tabla 10).

Tabla 16. Fabricación apoyo ruedas

NOMBRE	Apoyo ruedas	MATERIAL	Lamina HR
OPERACION		DETALLE	
Doblez		Doblez a lamina para tomar la forma de u en la rueda	
Soldadura		Se une mediante soldadura al soporte principal	
PLANO			
DISEÑO CAD		RESULTADO	

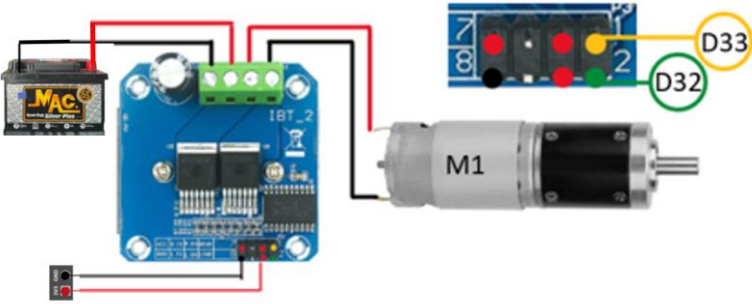
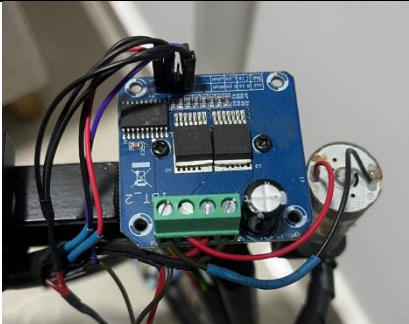
8.2.2 Mecanizado: Se llevaron a cabo procesos de mecanizado en los extremos de la varilla de tornillo para garantizar su compatibilidad con los bujes y mejorar su desempeño en el sistema. Del mismo modo, se mecanizaron los bujes y los acoples utilizados en la unión entre las llantas, asegurando un ajuste preciso y un funcionamiento óptimo. A continuación, se evidencia la tabla de fabricación del tornillo de potencia empleado en el prototipo (ver tabla 11)

Tabla 17. Mecanizado del tornillo

NOMBRE	Tornillo de potencia	MATERIA L	Barra roscada grado 2
OPERACION		DETALLE	
Mecanizado		Se mecanizan las puntas para su aseguramiento en el buje	
PLANO			
 <p>Barra roscada M10</p>			
DISEÑO CAD		RESULTADO	
			

8.2.3 Ensamblaje eléctrico: Se realizaron las conexiones entre los motores, los controladores BTS7960 y el ESP32, asegurando una correcta distribución de la señal y la alimentación. A continuación, se muestra el proceso de conexión de un driver al microcontrolador (ver tabla 18).

Tabla 18. Conexión ejemplo drivers

NOMBRE	Conexiones drivers BTS7960
OPERACION	DETALLE
Conexiones	Se conectan los drivers BTS7960 al microcontrolador esp32
PLANO	
	
RESULTADO	
	

En el Anexo N se pueden obtener más información acerca de las tablas de fabricación del prototipo.

8.3 PROCESO DE ENSAMBLAJE

El ensamblaje del prototipo se realizó siguiendo un enfoque modular, permitiendo la integración de los diferentes subsistemas de manera eficiente:

8.3.1 Montaje de la estructura mecánica: Se ensamblaron las columnas con la viga soldada, garantizando su alineación y estabilidad. Además, se instalaron los tornillos en los soportes con bujes para permitir el ajuste de altura y la correcta ubicación de las llantas.

Figura 19. Montaje de estructura metálica



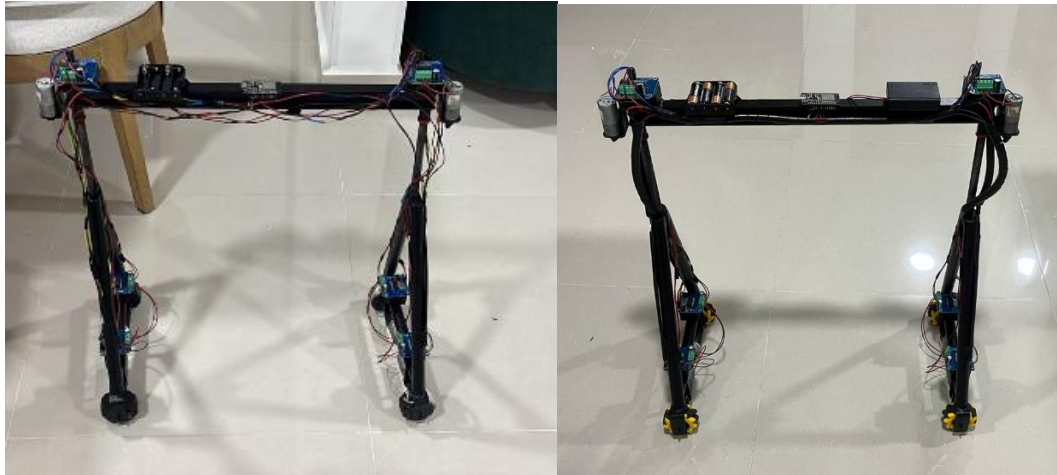
8.3.2 Integración del sistema de motorización: Fijación de los motores en sus posiciones correspondientes, alineándolos con los ejes de transmisión.

Figura 20. Integración del sistema de motorización



8.3.3 Conexión del sistema de control: Se realizó el cableado de los drivers BTS7960 a cada motor y su posterior conexión con el ESP32. Además, se configuró la alimentación mediante los portapilas, ubicando los componentes de manera estética y permitiendo una mejor visualización del sistema.

Figura 21. Conexión del sistema de control



8.4 PRUEBAS FUNCIONALES

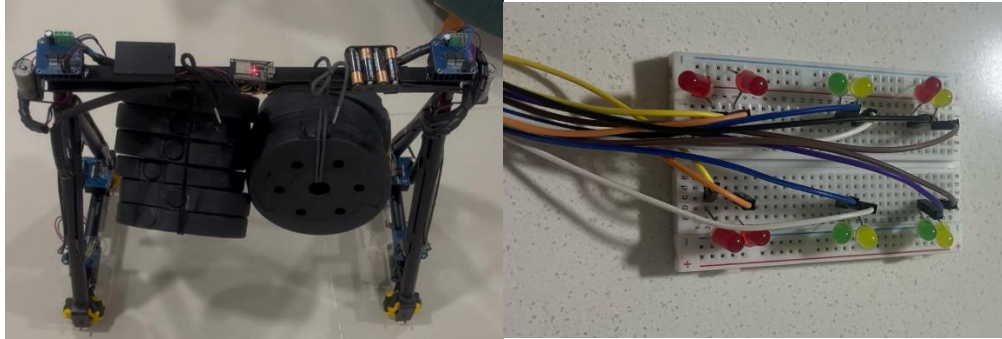
Con el prototipo ensamblado, se llevaron a cabo diversas pruebas para evaluar su desempeño y garantizar el cumplimiento de los requisitos de diseño:

8.4.1 Validación del circuito en protoboard: Antes del montaje definitivo, el circuito fue implementado en una protoboard, utilizando LEDs para simular la activación de los motores. Esta prueba permitió verificar la correcta ejecución del código en la esp32 y de la aplicación móvil.

8.4.2 Pruebas mecánicas: Se evaluó el desplazamiento de los tornillos dentro de las tuercas soldadas, verificando que el ajuste de altura se realizara sin bloqueos ni desviaciones. Además, se comprobó el correcto funcionamiento de las llantas dentro del sistema.

8.4.3 Pruebas de resistencia: Se sometió el sistema a una carga de 16 kg, acorde al escalado del prototipo, para verificar su capacidad de soportar peso de manera segura.

Figura 22 . Pruebas



8.4.4 Resultados de pruebas: En la tabla 13 se pueden observar los resultados obtenidos al realizar todas las pruebas hechas al prototipo. En general los resultados fueron satisfactorios y todas las funciones se desempeñan según lo esperado.

Tabla 19. Resultados de pruebas ejecutadas.

FUNCIONAMIENTO CON CARGA (16 KG)		FUNCIONAMIENTO SIN CARGA		FUNCIONAMIENTO PROGRAMA	
FECHA	3/04/2025	FECHA	3/04/2025	FECHA	3/04/2025
PRUEBA	Encendido y arranque	PRUEBA	Encendido y arranque	PRUEBA	Conexión Esp32 a el aplicativo movil
ESPECIFICACIONES		ESPECIFICACIONES		ESPECIFICACIONES	
Funcion	Resultados	Funcion	Resultados	Funcion	Resultados
Conexion bluetooth	Un poco lenta a la hora de scanear los dispositivos y realizar la conexion, sin embargo despues de esto es segura y manda los comandos de una forma correcta	Conexion bluetooth	Un poco lenta a la hora de scanear los dispositivos y realizar la conexion, sin embargo despues de esto es segura y manda los comandos de una forma correcta	DESCRIPCION	Se realizó una prueba mediante luces leds en una protoboard comprobando el correcto envio de los comandos desde el aplicativo movil al esp32
Elevacion	No aplica	Elevacion	vibra un poco, sin embargo logra elevarse correctamente y los condicionales de seguridad implementados funcionan de manera optima	Movimientos ruedas	Funciona correctamente
Direccion	Todo funciona correctamente	Direccion	Todo funciona correctamente	Movimiento tornillos de elevacion	Funciona correctamente
Giros	Todo funciona correctamente	Giros	Todo funciona correctamente	Condional de altura	Funciona correctamente
Seguros	Todo funciona correctamente	Seguros	Todo funciona correctamente	Condional de grados	Funciona correctamente

9. ANÁLISIS ECONÓMICO

En este capítulo se realizará un análisis de viabilidad económica y financiera de la grúa remota, diseñada para mejorar los tiempos de manipulación de cargas, la seguridad de operarios y optimizar el espacio en talleres del área metropolitana de Bucaramanga. Se estimarán los costos operativos y de inversión inicial, así como los beneficios que proporcionaría el dispositivo al ser empleado por una empresa²⁵.

Para la evaluación económica del presente proyecto de grado, se considera su implementación en un taller del área metropolitana de Bucaramanga con limitaciones de espacio. Actualmente, estos talleres emplean grúas de fabricación propia o hechizas para sus operaciones. Dado que la alternativa actual, constituida por estas grúas de fabricación propia, varía significativamente entre talleres y no implica una inversión inicial en un nuevo dispositivo o máquina, al ya contar con las existentes, el costo de inversión inicial de esta alternativa actual no se incluirá en el análisis económico comparativo.

9.1 ANÁLISIS DE COSTOS

Para el análisis de costos se tendrán en cuenta los costos y gastos generados tanto por la fabricación como la operación de la grúa, en la tabla 14 se observan los costos de inversión inicial, correspondientes a materiales y servicios necesarios.

²⁵ PALOMO, Ahmed; LOZADA, Natalia. ESTRUCTURACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE SEGURIDAD, SALUD EN EL TRABAJO Y AMBIENTE (SG-SSTA) BAJO LOS LINEAMIENTOS DEL RUC PARA LAS EMPRESAS DE PERFORACIÓN DEL SECTOR PETROLERO. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2018. 209 p.

Tabla 20. Desglose de inversión inicial.

Material	Costo unitario	Cantidad	Total
Microcontrolador esp32	\$ 20.000	1	\$ 20.000
Bateria MAC de 12 V	\$ 265.000	1	\$ 265.000
Drivers BTS7960	\$ 15.000	6	\$ 90.000
Motorreductor 42GP-775 I	\$ 139.926	2	\$ 279.852
Motorreductor 42GP-775 I	\$ 139.926	4	\$ 559.704
Tubería SCH80 2,5 pulgac	\$ 31.000	7	\$ 217.000
Viga IPE 180	\$ 114.000	2,5	\$ 285.000
Tornillo M3x10	\$ 200	2	\$ 400
Tornillo M4x5	\$ 200	20	\$ 4.000
Piñon 06B13	\$ 34.000	1	\$ 34.000
Piñon 06B26	\$ 37.000	1	\$ 37.000
Cadena 06B	\$ 20.000	1	\$ 20.000
Platina AISI 1020 20x3,5	\$ 10.000	2	\$ 20.000
Platina AISI 1020 1x7x5	\$ 20.000	1	\$ 20.000
Barra AISI 1020 D7	\$ 5.000	1	\$ 5.000
Barra AISI 1020 D4,5	\$ 5.000	1	\$ 5.000
Chaveta 1/2" x 3/8" x 0,47	\$ 30.000	4	\$ 120.000
Buje de bronce 10x9,1x7x	\$ 70.000	2	\$ 140.000
Barra de acero 1,5" x 165	\$ 75.000	3	\$ 225.000
Set ruedas mecanum MW	\$ 1.094.800	2	\$ 2.189.600
Buje PSM 455535 A1	\$ 1.000	8	\$ 8.000
Anillos retenedores DC-45	\$ 800	4	\$ 3.200
Servicio de soldadura	\$ 500.000	1	\$ 500.000
Servicio de mecanizado	\$ 1.500.000	1	\$ 1.500.000
Total			\$ 6.547.756

Dando así un total de \$ 6.547.756 (COP) para la inversión inicial, para calcular los gastos operacionales diarios se tiene en cuenta los insumos necesarios para mantener en funcionamiento normal el dispositivo, estos gastos se muestran en la tabla 20.

Se realiza un desglose detallado de los gastos que implica la alternativa propuesta contra una alternativa comercial que suele ser la preferida por los talleres de PYMEs en el área metropolitana de Bucaramanga. Obteniendo el costo de ambas alternativas y asumiendo como ahorro el gasto de relacionado a la alternativa comercial, para más información referirse al anexo P.

9.2 VALOR PRESENTE NETO

Ya con todos los datos obtenidos en el capítulo 9.1 se procede a realizar la evaluación de estos utilizando el método de valor presente neto (VPN) que permite llevar al presente los ingresos y egresos futuros con el fin de realizar una comparación justa y objetiva, para

hacerlo se debe tener en cuenta la inflación, se tomara el valor promedio de los últimos meses, esto es 5.225%, así mismo, se tiene que la tasa de interés usada será la promedio de los últimos meses (enero, febrero y marzo de 2025) esta es 16.91%.

Por practicidad los ingresos y egresos diarios son convertidos a mensuales, como se observa en la tabla 21. En este caso se tomará como egreso el costo operativo de la grúa remota y se tomará como ingreso el ahorro que le genera a la empresa el no usar la alternativa comercial.

Tabla 21. Costo mensual de las alternativas.

Alternativa	Gasto diario	Gasto mensual
Grúa remota	\$ 2.450	\$ 73.500
Comercial	\$ 8.670	\$ 362.700

Se tiene entonces que cada mes se generarían gastos de \$ 73.500 (COP) mientras se ahorran \$ 362.700 (COP), Correspondientes a salario de operarios y alquiler ocasional de montacargas, dando un total de ingresos por \$ 289.200 (COP) Cada mes.

La viabilidad económica se evaluó mediante el Valor Presente Neto (VPN), comparando la inversión propuesta con alternativas comerciales. Se descontaron los flujos de efectivo con una tasa del 16.91% efectivo anual es decir una tasa de 1.31% efectivo mensual, promedio de las principales entidades bancarias colombianas²⁶.

Aunque se espera una vida útil mayor a diez años, este análisis se centra en los tres primeros años de operación del equipo para obtener una evaluación inicial de su rentabilidad. Ver tabla 22.

²⁶ UMAÑA MEJÍA, Fernando. Tasa de usura abril 2025: ¿Cómo quedó y cómo afectará las compras? El Tiempo [página web]. (1, abril, 2025). [Consultado el 4, abril, 2025]. Disponible en Internet: <<https://www.eltiempo.com/economia/finanzas-personales/tasa-de-usura-abril-2025-como-queda-y-como-afectara-las-compras-3440411>>.

Tabla 22. Cálculo VPN.

Calculo VPN			
$P = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right]$			
Variables de entrada			
A_g	-73.892	\$	Renta periódica gasto
A_a	357.875	\$	Renta periódica ahorro
i	1.31	%	<i>Tasa de interés mensual</i>
n	36	<i>meses</i>	<i>Periodo de evaluación</i>
Resultado			
P_g	- 2.098.699	\$	Valor presente gastos
P_a	10.356.437	\$	Valor presente ahorro
VPN	1.709.982	\$	Valor presente neto

Se obtiene entonces un VPN de \$ 1,709,982 (COP) dando una rentabilidad considerable, así mismo se hizo una relación costo beneficio en el periodo de 3 años y significa un valor de 1.20, corroborando que el proyecto es viable.

9.3 TASA INTERNA DE RETORNO

Para este análisis se tomaron los valores de las anualidades y se trajeron al presente para así hacer uso de una función nativa de Excel la cual calcula el valor del TIR o también conocido como IRR²⁷. Ver tabla 23.

²⁷ OROZCO, Edwin; Palencia Brayan. Desarrollo de un CAPP para la fabricación de válvulas de compuerta en la empresa industrias IMR. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2025. 125 p.

Tabla 23. Cálculo TIR.

Calculo TIR			
$TIR = \sum_{t=0}^n \frac{Fn}{(1+i)^t} = 0$			
Variables de entrada			
<i>n</i>	3	<i>años</i>	Periodo de evaluación
<i>i</i>	16.91	%	<i>Tasa de interés EA</i>
<i>f_n</i>	3.134.433	\$	<i>Flujo de caja anual</i>
Resultado			
<i>TIR</i>	20.53	%	TIR

Consiguiendo un interés de 21.71% efectivo anual, lo cual es comparativamente mejor alternativa comparada con las inversiones de renta fija que ofrecen los bancos actualmente²⁸ (~ 10% EA), evidenciando nuevamente la viabilidad de ejecutar el proyecto.

9.4 PERÍODO DE RECUPERACIÓN

Periodo de recuperación o payback se realiza para determinar el tiempo que le toma al dispositivo, máquina o proyecto en recuperar su inversión inicial, esto se realiza calcula según la tabla 24.

²⁸ PINTO, Karen. El banco de la República mantuvo inalterada su tasa de interés en 9,50% en marzo Diario La República [página web]. [Consultado el 3, abril, 2025]. Disponible en Internet: <<https://www.larepublica.co/economia/decision-de-tasa-de-la-junta-directiva-del-banco-de-la-republica-para-marzo-4098899>>.

Tabla 24. Cálculo de Payback.

Cálculo de Payback			
$Payback = a + \frac{I_0 - b}{f_t}$			
Variables de entrada			
I_0	- 6.547.756	\$	Inversión inicial
a	1		Periodo de evaluación
b	3.192.016	\$	Flujo de caja en a
f_t	3.192.016	\$	Flujo de caja anual
Resultado			
Pb	2.08	Años	Periodo de Payback

Como se puede observar, este proyecto tiene un payback poco mayor a 2 años, mostrando así que es un buen proyecto rentable, que se pagará en una cantidad razonable de tiempo debido al ahorro que genera.

En resumen, se obtiene que el Payback será de un poco más de 2 años, mientras que la TIR del proyecto se estima de 21.71%, estos datos pueden variar según el lugar donde se desee implementar, por lo que sería prudente realizar un análisis económico enfocado según donde se pretenda usar.

9.5 COSTOS DEL PROTOTIPO

A continuación, se presentan los costos de los implementos usados para la fabricación del prototipo, así mismo se incluyen costos de manufactura. Dentro de estos implementos están los drivers bts7960 y el microcontrolador, los cuales son los mismos que se necesitan para la fabricación del sistema de elevación final, se hizo uso de estos implementos con el fin de asemejar el prototipo lo más posible al diseño final, debido al tipo de conexiones que se tienen.

Tabla 25. Costos prototipo

Material	Costo unitario	Cantidad	Total
Microcontrolador esp32	\$ 16,000	1	\$ 16,000
Baterias AA 1.5 V	\$ 5,000	2	\$ 10,000
Drivers BTS7960	\$ 18,000	6	\$ 108,000
Motorreductor 16RPM 6V	\$ 17,600	2	\$ 35,200
Motorreductor 280 RPM 6V	\$ 17,600	4	\$ 70,400
Tuberia 1/2" sch 40	\$ 20,000	1	\$ 20,000
Platinas para viga y accesorios	\$ 20,000	1	\$ 20,000
Barra roscada grado 2 M10	\$ 10,000	1	\$ 10,000
Tuercas M10	\$ 3,000	4	\$ 12,000
Juego de poleas	\$ 200	2	\$ 400
Empaque tipo anillo	\$ 100	2	\$ 200
Portapilas	\$ 20,000	2	\$ 40,000
Set Protoboard	\$ 22,000	1	\$ 22,000
Jumpers y cables	\$ 12,000	1	\$ 12,000
Estaño	\$ 800	4	\$ 3,200
Cautin	\$ 20,000	1	\$ 20,000
Cera para soldar	\$ 19,900	1	\$ 19,900
Termoformables	\$ 200	8	\$ 1,600
Set ruedas mecanum	\$ 25,600	2	\$ 51,200
Tornilleria	\$ 4,000	1	\$ 4,000
Set acoples	\$ 10,000	1	\$ 10,000
Pegante	\$ 1,000	1	\$ 1,000
Servicio de soldadura	\$ 25,000	1	\$ 25,000
Servicio de mecanizado	\$ 50,000	1	\$ 50,000
Total			\$ 562,100

El costo total del prototipo fue de \$562,100 (COP) el cual fue asumido por los integrantes de este proyecto en su totalidad.

10. CONCLUSIONES

El desarrollo del presente proyecto “*DISEÑO DE UN SISTEMA DE ELEVACIÓN Y POSICIONAMIENTO PARA CARGAS PESADAS Y MONTAJE DE PIEZAS CON CAPACIDAD DE FUNCIONAR EN ESPACIOS DE DIFÍCIL ACCESO*” Permitió cumplir con los objetivos de diseñar un sistema de elevación adaptable y ajustable en altura (entre 2 y 3 metros), capaz de manipular cargas de hasta 2 toneladas mediante un polipasto de cadena permitiendo la rotación de piezas en ángulos de 90 grados. Aportando de esta manera a la problemática que presentan una gran cantidad de talleres del área metropolitana de Bucaramanga facilitando el montaje en máquinas herramienta dentro de talleres industriales con limitaciones de espacio. Todo esto siguiendo la metodología y criterios de la norma CMAA #74²⁹ así como evaluando y mitigando riesgos asociados según la norma ISO 12100³⁰. De ser implementada esta solución se garantiza entonces una mejora en las condiciones de seguridad y ergonomía de los operarios así como el incremento en la eficiencia del manejo de piezas pesadas.

Se consigue diseñar exitosamente una grúa de tipo pórtico que soporta de manera confiable y segura hasta 2 toneladas de carga, con capacidad de cambiar su altura entre 1.85 y 3, que permite rotaciones de 90 grados siguiendo los estándares propuestos por la norma CMAA #74.

Sé implemento un sistema de control remoto que permite operar el dispositivo a una velocidad de 0.11 m/s, este sistema fue puesto a prueba evaluando su funcionamiento y diseño para de acuerdo con la norma ISO 12100 dando resultados satisfactorios.

²⁹ CRANE MANUFACTURING ASSOCIATION OF AMERICA. Specifications for top running & under running single girder electric traveling cranes utilizing under running trolley hoist. CMAA #74. Charlotte, USA. 2010. 78 p.

³⁰ UNE-EN. Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación del riesgo y reducción del riesgo. ISO 12100. Madrid, España: AENOR, 2012. 88 p.

Un prototipo escalado (aproximadamente 1:5) fue construido a partir del sistema diseñado. Haciendo uso de materiales accesibles y componentes del mercado local, al cual le fueron realizadas pruebas físicas de funcionalidad demostrando su capacidad para ajustar la altura, dar giros de 90° y conseguir cargar 16 kg y funcionar adecuadamente con esta carga (que corresponden a escalar la carga de 2 ton).

Se realizó un análisis económico del proyecto, obteniendo como resultado un TIR de 20.53% y un payback de poco más de 2 años, por lo tanto, se dice que es un proyecto que puede llegar a resultar rentable, sin embargo, se debe realizar un análisis económico particular para cada lugar donde se desee implementar el diseño.

BIBLIOGRAFIA

ANONIMO. A SET of 12 inch heavy-duty industrial mecanum wheel with load capacity 3000kg – NM305A – oz robotics. Oz Robotics – Technology Company [página web]. [Consultado el 3, abril, 2025]. Disponible en Internet: <<https://ozrobotics.com/shop/a-set-of-12-inch-heavy-duty-industrial-mecanum-wheel-with-load-capacity-3000kg-nm305a/>>.

ANONIMO. BLUETOOTH_CLASSIC | Flutter package. Dart packages [página web]. [Consultado el 4, abril, 2025]. Disponible en Internet: <https://pub.dev/packages/bluetooth_classic>.

ANONIMO. COLOMBIA - tasa de inflación | 1955-2025 datos | 2026-2027 expectativa [Anónimo]. INDICADORES ECONÓMICOS | ES | TRADINGECONOMICS.COM [página web]. [Consultado el 3, abril, 2025]. Disponible en Internet: <<https://es.tradingeconomics.com/colombia/inflation-cpi>>.

ANONIMO. E-113SPROCKETS SPROCKETS MÉTRICOS ESTÁNDARES ISO Sprockets en existencia Tipos A, B y C. martinsprocket [página web]. [Consultado el 3, abril, 2025]. Disponible en Internet: <https://es.martinsprocket.com/docs//catalogs/power%20transmission/2_sprockets/seccion_e_metricos.pdf>.

ANONIMO. Gantry cranes: design and types. Gantry Crane [página web]. [Consultado el 3, abril, 2025]. Disponible en Internet: <<https://gantrycranesupplier.wordpress.com/2018/09/21/gantry-cranes-design-and-types/>>.

ANONIMO. Overhead and gantry crane safety and requirements | EMC [Anónimo]. EMC Insurance: Business, Loss Control, Bonds, Surety and Fidelity [página web]. [Consultado

el 3, abril, 2025]. Disponible en Internet: <<https://www.emcinsurance.com/losscontrol/techsheet/overhead-and-gantry-crane-safety-and-requirements>>.

ANONIMO. TALLER INTERIOR grúas puente sin riel 0.25 1 5 10 15 20 grúas móviles pequeñas portátiles de aluminio grúa de horquilla. Made-in-China.com [página web]. [Consultado el 3, abril, 2025]. Disponible en Internet: <https://es.made-in-china.com/co_delukecrane/product_Indoor-Workshop-Trackless-0-25-1-5-10-15-20-Tons-Bridge-Cranes-Mobile-Small-Portable-Aluminium-Gantry-Crane_uoohuneshy.html>.

ANONIMO. TARJETA ESP32 WROOM-32 CH340C NodeMCU WiFi Bluetooth USB-C. 3DBOTS – Filamento para impresión 3d [página web]. [Consultado el 3, abril, 2025]. Disponible en Internet: <<https://3dbots.co/producto/tarjeta-esp32-wroom-32-ch340c-nodemcu-wifi-bluetooth-usb-c/>>.

ANSYS LEARNING. Performing Modal Analysis Using Ansys Mechanical – Lesson 1 [video]. YouTube. (20, noviembre, 2020). [Consultado el 10, marzo, 2025]. 11:14 min. Disponible en Internet: <<https://www.youtube.com/watch?v=CGpNf1Zi9AI>>.

ARISMENDI PINZÓN, Jerson Yamid; BRAVO CORREDOR, Alexander. Diseño y construcción de una plataforma elevadora de carrocerías de camiones en la empresa Ninox S.A.S. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2020. 147 p.

BUDYNAS, R. Diseño en ingeniería mecánica de shigley - 9 edición. [s.l.]: McGraw-Hill Educación, 2012. 1039 p. ISBN 9786071507716.

CRANE MANUFACTURING ASSOCIATION OF AMERICA. Specifications for top

running & under running single girder electric traveling cranes utilizing under running trolley hoist. CMAA #74. Charlotte, USA. 2010. 78 P.

GONZÁLEZ, Antonio Pérez; CERVANTES, Pablo Jesús Rodríguez y BRÚ, Joaquín Luís Sancho. Mantenimiento mecánico de máquinas. [s.l.]: Publicacions de la Universitat Jaume I, 2007. 388 p. ISBN 9788480216296.

GUAMÁN GUAJALA, Luis Miguel y VEGA SEVILLA, Ángel Aurelio. Diseño y construcción de un elevador para la Facultad de Mecánica. Trabajo de grado. RIOBAMBA: ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, 2014. 173 p.

HUAYTA TICONA, Silver. Diseño de estructura para levante de carga de dos toneladas para taller de mantenimiento. Trabajo de grado. Arequipa: Universidad continental, 2019. 88 p.

JIMÉNEZ ERAZO, Diego Estuardo; PÉREZ PÉREZ Marcelo David. Diseño y construcción de un elevador dúplex con capacidad de 25 KG para la biblioteca del Campus El Girón de la Universidad Politecnica Salesiana, sede Quito. Trabajo de grado. Quito: Universidad politécnica Salesiana de Ecuador, 2012. 164 p.

KUMAR, Raghvendra y HO QUANG, Nguyen. Research in Intelligence and Computing in Engineering. Singapur: Spring, 2021. 1006 p

MOTT, Robert L. Diseño de elementos de máquinas - 2 edición. [s.l.]: Prentice Hall, 2000. ISBN 9789688805756.

OROZCO, Edwin; Palencia Brayan. Desarrollo de un CAPP para la fabricación de válvulas de compuerta en la empresa industrias IMR. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2025. 125 p.

PALOMO, Ahmed; LOZADA, Natalia. ESTRUCTURACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE SEGURIDAD, SALUD EN EL TRABAJO Y AMBIENTE (SG-SSTA) BAJO LOS LINEAMIENTOS DEL RUC PARA LAS EMPRESAS DE PERFORACIÓN DEL SECTOR PETROLERO. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2018. 209 p.

PINTO, Karen. El banco de la República mantuvo inalterada su tasa de interés en 9,50% en marzo Diario La República [página web]. [Consultado el 3, abril, 2025]. Disponible en Internet: <<https://www.larepublica.co/economia/decision-de-tasa-de-la-junta-directiva-del-banco-de-la-republica-para-marzo-4098899>>.

RAO, Singiresu. Mechanical vibrations. Pearson, 2016. ISBN 9780134361925.

ROBAYO, M. Sistemas mecánicos móviles de elevación de carga para descongestionar el área de embarque y desembarque del mercado mayorista de Ambato. 2016. [Tesis de pregrado]. Ambato: Universidad Técnica de Ambato.

ROSSAS SARMIENTO, Guillermo. Estudio de vibraciones mecánicas en máquinas reciprocantes. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2004. 390 p.

UMAÑA MEJÍA, Fernando. Tasa de usura abril 2025: ¿Cómo quedó y cómo afectará las compras? El Tiempo [página web]. (1, abril, 2025). [Consultado el 4, abril, 2025]. Disponible en Internet: <<https://www.eltiempo.com/economia/finanzas-personales/tasa-de-usura-abril-2025-como-queda-y-como-afectara-las-compras-3440411>>.

UNE-EN. Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación del riesgo y reducción del riesgo. ISO 12100. Madrid, España: AENOR, 2012. 88 p.