



**DESARROLLO INTEGRAL DE UN ELEVADOR HIDRÁULICO DE ALTA
RESISTENCIA PARA WMC: UN ENFOQUE EN DISEÑO, SIMULACIÓN Y
MANUFACTURA**

Cristian Camilo Herrera Altare

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Tutor

Silvio Andrés Salazar Martínez, Magíster (MSc) en Área de formación del asesor interno

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita	(Cristian Camilo Herrera Altare, 2024)
Referencia	(Cristian Camilo Herrera Altare, 2024). Desarrollo integral de un elevador hidráulico de alta resistencia para WMC: un enfoque en diseño, simulación y manufactura [Informe de práctica]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación de Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mi amada familia, mis pilares inquebrantables, María Olga Altare y Benjamín Herrera. Su constante apoyo y amor han iluminado cada paso de mi camino. A Juan Sebastián, mi hermano, compañero y fuente de inspiración, gracias por compartir este viaje conmigo. A mi querida mamita, María Olinda Vanegas de Altare, quien, aunque no pudo presenciar el final de esta etapa, siempre fue mi fuente de aliento desde el cielo.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a los profesores en la Universidad de Antioquia. Su dedicación a la enseñanza y su estímulo constante han sido fundamentales para mi formación. A la Universidad de Antioquia, mi alma mater, por brindarme un entorno propicio para el aprendizaje y el crecimiento personal y profesional.

A cada uno de los profesionales de SAMCO, gracias por confiar en mí y proporcionarme la oportunidad de aplicar mis conocimientos en un entorno laboral real.

A mi madre, mi padre, mi hermano y mi mamita María Olinda, su apoyo incondicional ha sido mi mayor motivación. Cada logro es también su triunfo. Gracias por ser mi fuente de fortaleza y amor en este viaje.

Este logro no es solo mío, sino de todos los que han creído en mí y me han acompañado en este recorrido. A cada persona que ha sido parte de mi camino, ¡gracias!

Tabla de contenido

Resumen	10
Abstract	11
Introducción	12
1 Planteamiento del problema	13
1.1 Antecedentes	14
2 Justificación.....	15
3 Objetivos	16
3.1 Objetivo general	16
3.2 Objetivos específicos.....	16
4 Marco teórico	18
5 Metodología	19
5.1 Fase de Investigación y Análisis Preliminar	19
5.2 Fase de Cálculos de Ingeniería.....	21
5.2.1 Cálculos estáticos.....	21
5.2.2 Cálculos hidráulicos.....	28
5.3 Fase de Diseño Conceptual y Simulaciones.....	32
5.3.1 Diseño conceptual.....	32
5.3.2 Análisis por elementos finitos FEA	45
5.4. Planos	49
5.5 Fase de Fabricación y Ensamble	51
5.5.1 Corte de Perfilería y Soldadura.....	51
5.5.2 Mecanizado de ejes, bujes y ruedas	51
5.5.3 Corte laser	52

5.5.4 Hidráulica a Medida.....	53
5.5.5 Piezas comerciales	54
5.5.6 Montaje y pintura.....	55
5.6 Fase de Pruebas y Validación.....	55
5.7 Fase de Documentación y Entrega	56
6 Resultados	58
7 Discusión	60
8 Conclusiones	62
Referencias	64

Lista de tablas

Tabla 1. Valores de variables conocidas	26
Tabla 2. Resultados de la solución del sistema de ecuaciones	28
Tabla 3. Resultados del estudio FEA en el eje crítico con diferentes materiales	46
Tabla 4. Resultados del estudio FEA del refuerzo superior	48
Tabla 5. Descripción unidad hidráulica y de cilindros hidráulicos	53

Lista de figuras

Figura 1. Paletizadora industrial.....	19
Figura 2. Entorno de trabajo y proceso de alineamiento, empaque y almacenamiento de "rack decks"	20
Figura 3 Esquema elevador hidráulico.....	21
Figura 4. Diagrama de cuerpo libre de la plataforma y ecuaciones	22
Figura 5 Diagrama de cuerpo libre barra AI y ecuaciones.....	22
Figura 6. Diagrama de cuerpo libre barra BJ y ecuaciones.....	23
Figura 7. Diagrama de cuerpo libre barra JC y ecuaciones.....	24
Figura 8. Diagrama de cuerpo libre barra ID y ecuaciones.....	25
Figura 9. Sistema de ecuaciones	27
Figura 10. Código Python para la solución del sistema de ecuaciones.....	27
Figura 11. Calculos hidraulicos.....	30
Figura 12. Grafica de la potencia del motor vs tiempo	31
Figura 13. Vista en isométrico superior e inferior de la plataforma	32
Figura 14. Parametrización en el software Inventor	33
Figura 15. Marco fijo superior	34
Figura 16. Marco móvil superior.....	35
Figura 17. Marco móvil inferior.....	36
Figura 18. Marco fijo inferior	36
Figura 19. Base.....	37
Figura 20. Bujes de acero.....	37
Figura 21. Buje de latón	38
Figura 22. Eje para pivotes fijos.....	39
Figura 23. Eje para Ruedas	39

Figura 24. Ejes pivotantes	40
Figura 25. Vista en seccionado y vista en isométrico de la Rueda	41
Figura 26. Flanche para pasador del pistón hidráulico.....	42
Figura 27. Pivotes fijos.....	42
Figura 28. Diseños finales: PTS verticales y canales de refuerzo en la base y sistema de bloqueo mecánico.....	43
Figura 29. Elevador hidráulico: modelo 3D.....	44
Figura 30. Análisis FEA en el eje critico	47
Figura 31. Análisis FEA del refuerzo superior	49
Figura 32 Plano Ensamble Elevador Hidráulico	50
Figura 33. Corte de perfilería y soldadura de plataforma.....	51
Figura 34. Mecanizado de ejes, ruedas y bujes	52
Figura 35. Pivotes fijos soldados.....	53
Figura 36. Ensamble eje pivotante, junto a tuercas KM y sus respectivas arandelas.	54
Figura 37. Rodamiento rígido de bolas SKF6307	54
Figura 38. Ensamble antes y después de aplicar la pintura electrostática.....	55

Siglas, acrónimos y abreviaturas

UdeA	Universidad de Antioquia
WMC	Wire Mesh Corp
CNC	Control Numérico por Computador
PTS	Perfil estructural cuadrado
PTR	Perfil estructural rectangular
NumPy	Numerical Python
SymPy	Symbolic Python
Pandas	Panel Data
SKF	Fabrica Sueca de Rodamientos
FEA	Análisis de Elementos Finitos
mm	milímetro
N	Newton
Kg	Kilogramo
m	metro
rad	radianes
in	pulgadas
SAE	Society of Automotive Engineers
MPa	Mega Pascal
DXF	Drawing Exchange Format
RPM	Revolución por minuto
VAC	Voltaje de Corriente Alterna
HP	Horse Power

Resumen

Este proyecto representa el resultado de un esfuerzo meticuloso para diseñar y desarrollar un elevador hidráulico robusto para la empresa WMC. El objetivo central fue crear un dispositivo capaz de manejar cargas de hasta tres toneladas, diseñado específicamente para la manipulación y empacado eficiente de estanterías "rack deck". La metodología adoptada integró enfoques cualitativos y cuantitativos, desde la investigación exhaustiva de requisitos hasta el diseño conceptual, simulaciones avanzadas y optimización mediante técnicas de programación.

En la fase de fabricación, se optó por el corte láser en lugar del mecanizado CNC, lo que permitió una mayor precisión en la producción de componentes. Las reuniones y la visita a las instalaciones de WMC facilitaron un levantamiento preciso de medidas, y la investigación detallada definió las necesidades específicas del foso donde se instalaría el elevador.

Los resultados obtenidos tras las pruebas rigurosas validaron el rendimiento del elevador bajo condiciones reales de operación. La utilización del corte láser en la fabricación aseguró una mayor eficiencia en la producción de componentes y una integración más efectiva en el diseño final.

Este proyecto no solo representa la culminación de un diseño innovador sino también la colaboración exitosa entre SAMCO y WMC. El elevador hidráulico, desarrollado con precisión y adaptabilidad, responde a las necesidades específicas de WMC, estableciendo así un estándar en el sector. Este proceso demuestra la efectividad de la metodología aplicada, respaldada por resultados tangibles y una comprensión más profunda de los desafíos de ingeniería involucrados.

Palabras clave: elevador hidráulico, corte láser, diseño conceptual, simulaciones avanzadas, optimización, estanterías "rack deck", investigación de requisitos, prueba rigurosa, eficiencia de producción, colaboración empresarial, ingeniería de precisión, adaptabilidad, estándares industriales.

Abstract

This project represents the outcome of meticulous efforts to design and develop a robust hydraulic lift for WMC. The objective was to create a device capable of handling loads up to three tons, specifically tailored for the efficient handling and packing of "rack deck" shelves. The methodology integrated qualitative and quantitative approaches, ranging from exhaustive requirement research to conceptual design, advanced simulations, and optimization through programming techniques.

In the manufacturing phase, laser cutting was chosen over CNC machining, ensuring higher precision in component production. Meetings and a visit to WMC's facilities facilitated precise measurements, and detailed research defined the specific needs of the pit where the lift would be installed.

Results from rigorous testing validated the lift's performance under real operational conditions. The use of laser cutting in manufacturing ensured greater efficiency in component production and more effective integration into the final design.

This project not only signifies the culmination of an innovative design but also successful collaboration between SAMCO and WMC. The hydraulic lift, developed with precision and adaptability, addresses the specific needs of WMC, establishing a standard in the industry. This process demonstrates the effectiveness of the applied methodology, supported by tangible results and a deeper understanding of the engineering challenges involved.

Keywords: hydraulic lift, laser cutting, conceptual design, advanced simulations, optimization, "rack deck" shelves, requirement research, rigorous testing, production efficiency, business collaboration, precision engineering, adaptability, industry standards.

Introducción

En la búsqueda constante de soluciones innovadoras en el ámbito industrial, este documento desentraña los pormenores de un proyecto gestado en la colaboración entre SAMCO y WMC. En un entorno donde la innovación y la eficiencia son imperativos, el propósito fundamental fue la concepción y desarrollo de un elevador hidráulico adaptado a las exigencias específicas de WMC. A lo largo de este relato, se explorarán los fundamentos de esta colaboración estratégica, desde los objetivos fundamentales hasta la metodología aplicada, enmarcados en la realidad de los resultados obtenidos.

El paisaje industrial contemporáneo demanda soluciones que no solo cumplan, sino que superen los estándares establecidos. Así, la génesis de este proyecto se basa en la necesidad imperante de diseñar un elevador hidráulico capaz de manejar cargas sustanciales, especialmente adaptado para la manipulación y embalaje de estanterías "rack deck". Este emprendimiento se desarrolló en el contexto de la experiencia consolidada de SAMCO en soluciones electromecánicas y automatización, sentando las bases para una colaboración sinérgica con WMC.

Los objetivos trascienden la mera funcionalidad; aspiran a liderar un diseño que no solo cumpla con los criterios establecidos, sino que establezca nuevos estándares en la ingeniería de elevadores hidráulicos. La metodología abrazada integra sin fisuras enfoques cualitativos y cuantitativos. Desde la minuciosa investigación de los requisitos de WMC hasta la fase de diseño conceptual, las simulaciones avanzadas y la adopción del corte láser en la fabricación; cada paso ha sido una elección consciente en pos de la precisión y la innovación.

1 Planteamiento del problema

En la esencia de este proyecto yace una pregunta fundamental: ¿Cómo diseñar y desarrollar un elevador hidráulico que satisfaga las exigentes necesidades de WMC, permitiendo la manipulación eficiente y segura de estanterías "rack deck" con cargas de hasta tres toneladas? Esta interrogante, lejos de ser simplemente retórica, dirige la mirada hacia un desafío técnico y conceptual que impulsa la búsqueda de soluciones ingenieriles avanzadas.

La complejidad del problema se despliega en varios aspectos. En primer lugar, se requiere un diseño que garantice la estabilidad y resistencia estructural del elevador, soportando las considerables cargas asociadas con el movimiento y la disposición de las estanterías. Además, la necesidad de ubicar el elevador en un foso plantea desafíos adicionales, no solo en términos de diseño estructural, sino también en la gestión eficiente del desplazamiento vertical, alcanzando una profundidad de 6 pies.

La conjunción de estos elementos pone de manifiesto la necesidad de integrar de manera armoniosa aspectos mecánicos, hidráulicos y de control en el diseño final. La pregunta se torna, entonces, en una búsqueda por la optimización de estos elementos para garantizar un rendimiento sobresaliente y seguro del elevador en el entorno operativo de WMC.

Este planteamiento del problema no solo delimita el alcance del trabajo práctico, sino que también proporciona el marco conceptual que guiará las decisiones de diseño, la aplicación de la metodología y la evaluación de resultados. La resolución efectiva de este interrogante se traducirá en la creación de un elevador hidráulico que no solo cumple con los requisitos técnicos, sino que establece un estándar de excelencia en la manipulación de estanterías en el contexto específico de WMC.

1.1 Antecedentes

SAMCO, como empresa especializada en soluciones electromecánicas, ha desplegado previamente esfuerzos en el diseño y construcción de elevadores, específicamente utilizando un sistema de elevación por tornillo sin fin y láminas en lugar de perfiles rectangulares (PTS). Estos antecedentes, si bien representan un paso significativo en el ámbito de elevadores industriales, sirven como punto de partida para la evolución y mejora sustancial del diseño en cuestión.

Los elevadores anteriores de SAMCO, con su sistema de tornillo sin fin, han demostrado eficacia en ciertos contextos, pero presentan limitaciones que este nuevo proyecto busca superar. La elección de láminas en lugar de PTS también representa un elemento diferenciador en los diseños anteriores.

La inspiración adicional proviene de la observación de elevadores hidráulicos comúnmente utilizados en la industria. Este enfoque, respaldado por prácticas establecidas en el ámbito industrial, proporciona una referencia valiosa para la mejora del diseño. La experiencia acumulada en proyectos anteriores, combinada con la observación de soluciones existentes, ha forjado una base de conocimientos sobre la cual construir un elevador hidráulico innovador y mejorado.

Los antecedentes, por lo tanto, no solo representan las investigaciones previas realizadas por SAMCO, sino que también reflejan la convergencia de conocimientos históricos y prácticas actuales en la ingeniería de elevadores. Este proyecto se presenta como una oportunidad para avanzar más allá de los límites conocidos, incorporando nuevas tecnologías y enfoques para crear un elevador hidráulico que no solo cumpla con los estándares actuales, sino que defina nuevos paradigmas en la manipulación eficiente de cargas pesadas.

2 Justificación

La elección de abordar el diseño y desarrollo de un elevador hidráulico para la manipulación eficiente de estanterías "rack deck" en colaboración con WMC no es fortuita; responde a una serie de motivaciones y necesidades que se contextualizan en la realidad industrial actual y en el compromiso de SAMCO con la innovación continua.

En primer lugar, la industria está experimentando una creciente demanda de soluciones que integren eficiencia operativa y seguridad, especialmente en el ámbito de manipulación de cargas pesadas. La evolución de los sistemas de almacenamiento y distribución requiere elevadores especializados que no solo cumplan con los estándares de resistencia, sino que optimicen los procesos de manipulación y almacenamiento. Este proyecto se justifica como una respuesta directa a este contexto, buscando ir más allá de las soluciones convencionales y proporcionar a WMC un equipo que se ajuste perfectamente a sus necesidades específicas.

La elección de un elevador hidráulico se sustenta en la versatilidad y eficiencia demostradas por este tipo de sistemas en diversas aplicaciones industriales. El deseo de mejorar el diseño existente de SAMCO, basado en un sistema de tornillo sin fin y láminas, encuentra su justificación en la búsqueda de mayores niveles de rendimiento, confiabilidad y adaptabilidad a las demandas cambiantes de la industria.

Este proyecto no solo busca satisfacer necesidades inmediatas, sino que aspira a contribuir al avance de la ingeniería en el campo de elevadores hidráulicos. La innovación propuesta no solo beneficiará a WMC, sino que establecerá un precedente para futuros desarrollos en SAMCO y posiblemente en la industria en general. Este esfuerzo no solo busca resolver un problema específico, sino que tiene el potencial de influir en la dirección futura de la ingeniería de elevadores, explorando nuevos enfoques y tecnologías.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

El propósito principal de esta iniciativa práctica consiste en concebir y materializar un elevador hidráulico robusto y eficiente para la empresa estadounidense WMC. Este elevador está destinado a satisfacer exigentes criterios de calidad y durabilidad, específicamente diseñado para facilitar la manipulación y empacado de las estanterías "rack deck" durante su proceso de almacenamiento.

3.2 Objetivos específicos

- Concretar el diseño y modelado de un elevador hidráulico eficiente y seguro mediante el empleo del software Inventor de Autodesk. Este diseño será elaborado en estricta conformidad con los requisitos y especificaciones detallados por WMC.
- Ejecutar simulaciones exhaustivas mediante el método de elementos finitos, con el propósito de evaluar el comportamiento del elevador en diversas condiciones de carga y operación. Este enfoque garantizará un rendimiento óptimo y confiable del elevador.
- Realizar cálculos de ingeniería detallados, incluyendo análisis estático y de resistencia de materiales, para asegurar que el elevador pueda soportar sin inconvenientes la carga de 3000 kg y cumplir con las condiciones operativas dentro del foso.
- Implementar técnicas avanzadas, como la parametrización en Inventor y la programación en Python, con el fin de optimizar el diseño del elevador. Esto permitirá la adaptabilidad del equipo a futuras necesidades de WMC u otros proyectos similares.
- Generar una documentación integral que abarque todo el proceso, desde el diseño hasta la fabricación, plasmada en planos y reportes técnicos. Esta medida asegurará la trazabilidad del proyecto y facilitará la posibilidad de replicarlo en el futuro.

- Coordinar y colaborar estrechamente con el equipo de ingenieros tanto de SAMCO como de WMC. Esta colaboración se orienta a garantizar una comunicación fluida y una transferencia efectiva de conocimientos a lo largo de todas las fases del proyecto.

4 Marco teórico

El desarrollo del elevador hidráulico propuesto se fundamenta en una amalgama de conocimientos provenientes de diversas disciplinas de la ingeniería mecánica. A continuación, se detallan las fuentes y teorías que han influido directamente en la concepción y materialización de este proyecto.

- **Modelamiento 3D con Inventor de Autodesk:** La base conceptual y la representación visual del elevador se lograron mediante el software Inventor de Autodesk. Esta herramienta proporcionó la capacidad para realizar diseños tridimensionales, simular el movimiento y evaluar la estabilidad estructural del elevador.
- **Librerías de Python (NumPy, SymPy y Pandas):** Para el análisis numérico y la implementación de cálculos matemáticos, se emplearon librerías de Python como NumPy y Pandas. SymPy se utilizó para la manipulación simbólica, facilitando los cálculos algebraicos necesarios en la fase de diseño.
- **Catálogo SKF para la Selección de Rodamientos:** La elección de rodamientos críticos se fundamentó en el catálogo SKF (Grupo SKF, 2019). Este recurso proporcionó datos detallados sobre capacidades de carga, velocidades límite y dimensiones, asegurando la selección adecuada para garantizar la eficiencia y durabilidad del elevador.
- **Mecánica Vectorial para Ingenieros:** La teoría estática se fundamentó en "Mecánica Vectorial para Ingenieros: Estática" de Ferdinand P. Beer, E. Russell Jhonson y Elliot R. Eisenberg, octava edición (Ferdinand P. Beer, 2007). Este libro proporcionó los principios esenciales para el análisis estructural, especialmente en cuanto a resistencia de materiales y análisis estático.

El enfoque metodológico adoptado para el desarrollo del proyecto del elevador hidráulico se estructuró de manera integral, combinando elementos cualitativos y cuantitativos para abordar de manera eficiente los distintos aspectos del diseño y fabricación.

5.1 Fase de Investigación y Análisis Preliminar

- Se llevó a cabo una investigación exhaustiva de las necesidades y especificaciones proporcionadas por WMC.
- Reuniones y visitas a la planta de WMC para comprender a fondo el entorno operativo.
- Levantamiento de medidas en planta para ubicar el elevador de forma óptima.

Para iniciar el desarrollo del elevador hidráulico, se basó en el cálculo de las dimensiones y características de la paletizadora industrial [1] que WMC tenía la intención de ubicar en la plataforma superior del elevador. Este cálculo se realizó utilizando las medidas proporcionadas por WMC y se complementó con fotografías suministradas por la empresa. Además, durante una visita a las instalaciones de WMC, se capturaron fotografías adicionales y videos que proporcionaron una visión más completa del entorno de trabajo y del proceso que WMC buscaba mejorar.

Figura 1. *Paletizadora industrial*



Nota: Fuente <https://verpacken.com.co/marca-verpacken/paletizadoras/>

La información detallada recopilada durante esta fase fue de vital importancia para fundamentar el diseño del elevador. Las medidas precisas del entorno de trabajo, la maquinaria específica a utilizar y el proceso a optimizar permitieron un enfoque detallado y veraz en el desarrollo del proyecto. La colaboración estrecha con el personal de WMC durante la visita garantizó la comprensión completa de sus necesidades y requisitos, sentando así las bases para el diseño y simulaciones subsiguientes.

Figura 2. *Entorno de trabajo y proceso de alineamiento, empaque y almacenamiento de "rack decks"*



Nota: Fuente Archivo SAMCO

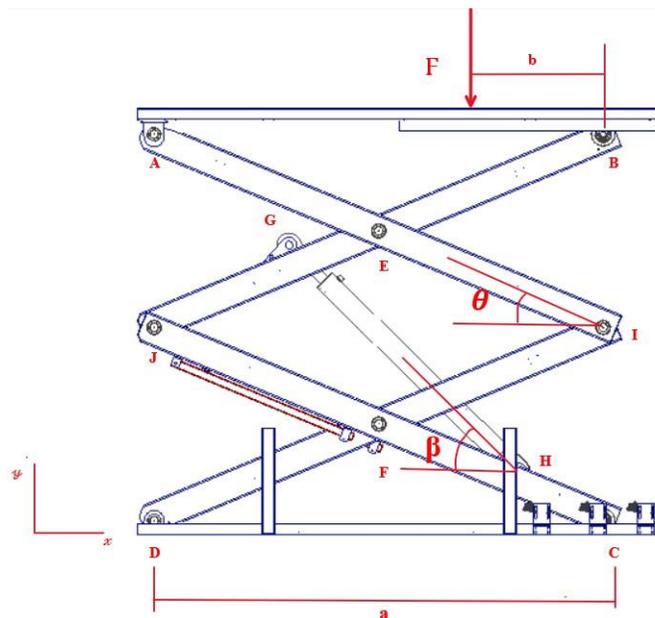
5.2 Fase de Cálculos de Ingeniería

5.2.1 Cálculos estáticos

Inicialmente, se consideraron dos situaciones para el análisis estático de la estructura: la primera correspondía a la extensión completa, y la segunda, a la contracción total. Sin embargo, se tomó la decisión de enfocarse únicamente en la posición crítica, que es cuando la estructura está contraída. Esta elección se fundamenta en que en este punto se experimenta el esfuerzo máximo al iniciar el levantamiento del peso.

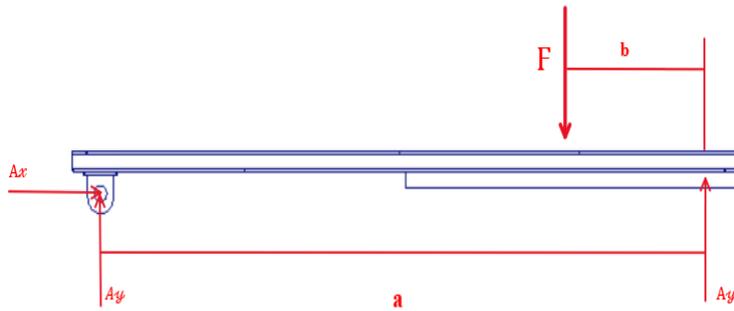
Con las condiciones iniciales establecidas, se determinó el punto de aplicación del peso dentro de la estructura, la altura mínima cuando el elevador está contraído y la longitud de los perfiles rectangulares (PTR). Además, se designaron los pivotes y se les asignaron variables específicas. Se introdujeron las variables beta y theta para representar el ángulo del pistón hidráulico con respecto al eje x, y theta para describir el ángulo formado entre la PTR y el eje x, respectivamente.

Figura 3 Esquema elevador hidráulico



Con el esquema general establecido, se inicia el análisis desde la parte superior, la plataforma [4], donde se encuentran dos soportes: uno fijo y otro móvil, representado por la rueda.

Figura 4. Diagrama de cuerpo libre de la plataforma y ecuaciones



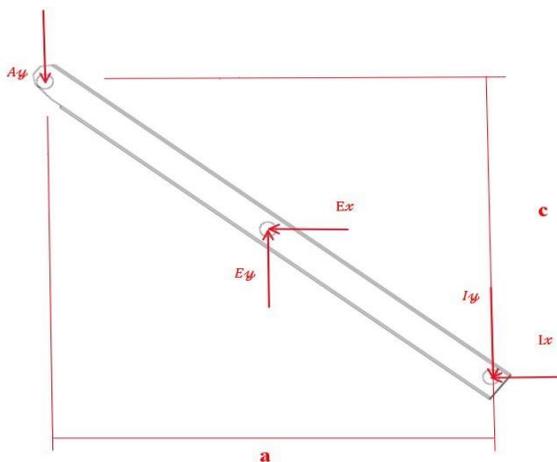
$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0 = A_x \\ \sum F_y &= 0 = A_y + B_y - F \\ A_y &= -B_y + F \\ \sum M_A &= 0 = B_y a - F(a - b) \\ B_y &= \frac{F(a - b)}{A} \end{aligned}$$

Debido a la simetría inherente al sistema, se puede establecer que las reacciones en la base del elevador tienen igual magnitud, pero en sentido opuesto a las de la plataforma teniendo que:

$$\begin{aligned} D_y &= A_y \\ C_y &= B_y \end{aligned}$$

A continuación, se realiza un desglose detallado del elevador con el objetivo de analizar los perfiles como barras individuales. La primera barra que se aborda en este análisis es la denominada barra AI [5], donde hay que tener en cuenta que el pivote del medio en todas las barras se encuentra exactamente en la mitad de la longitud.

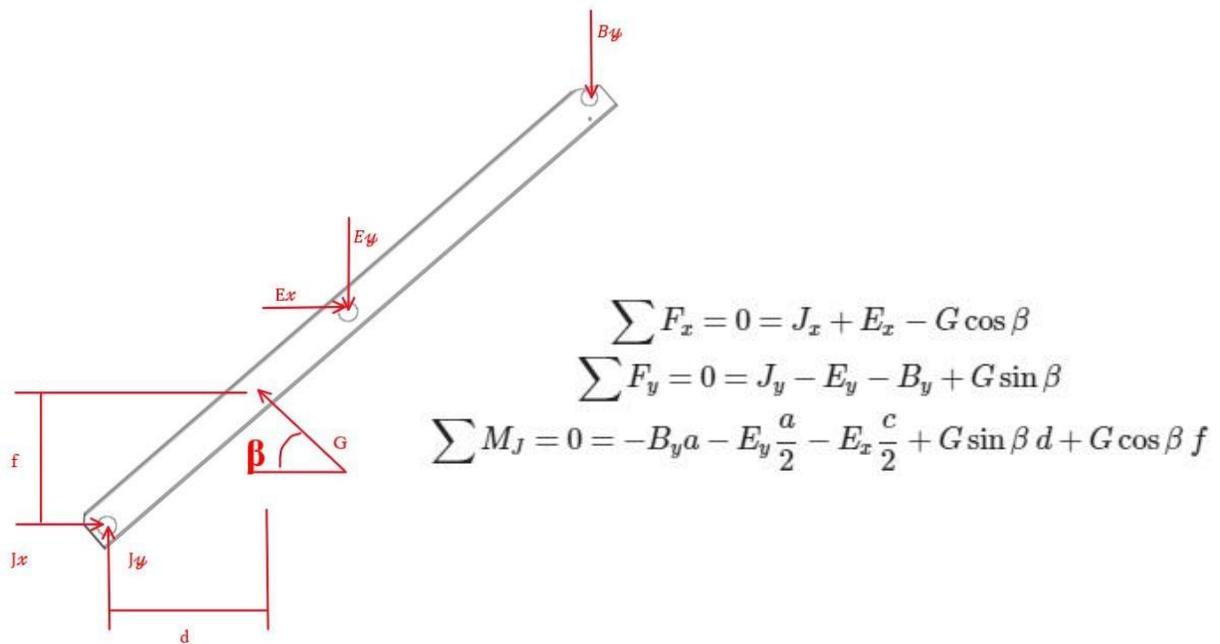
Figura 5 Diagrama de cuerpo libre barra AI y ecuaciones



$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0 = -E_x - I_x \\ \sum F_y &= 0 = -A_y + E_y - I_y \\ \sum M_I &= 0 = A_y a + E_x \frac{c}{2} - E_y \frac{a}{2} \end{aligned}$$

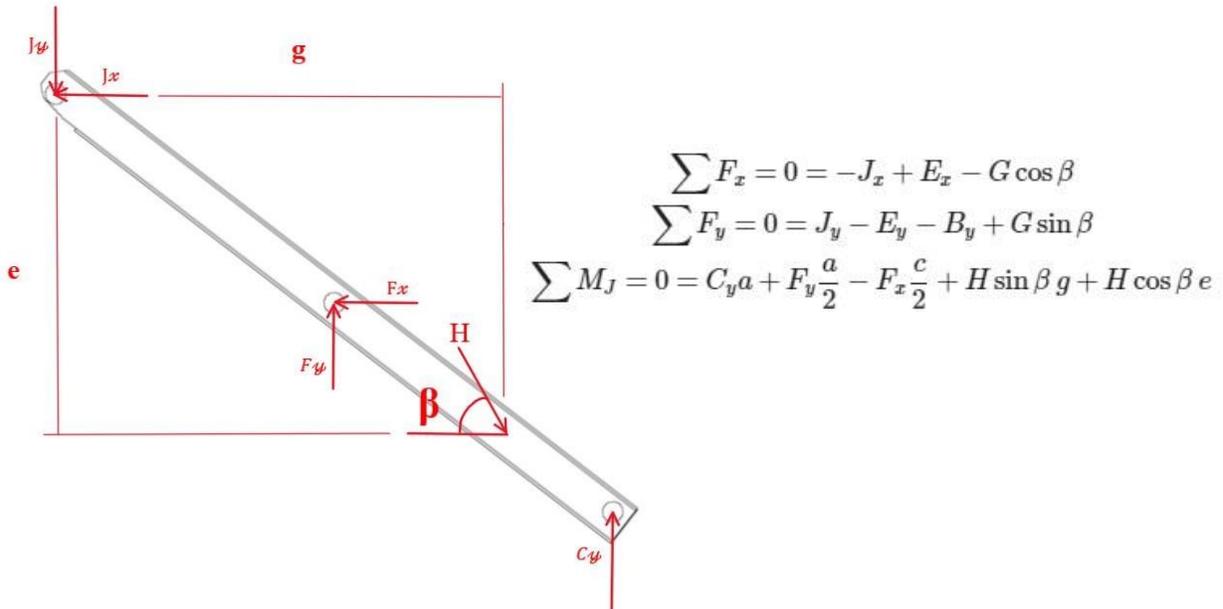
La barra AI, que fue previamente analizada, constituye la primera tijera en conjunto con la barra BJ [6]. Esta configuración estructural es fundamental, ya que en ella se integra y conecta el pistón hidráulico, desempeñando un papel clave en el mecanismo y la funcionalidad general del elevador.

Figura 6. Diagrama de cuerpo libre barra BJ y ecuaciones



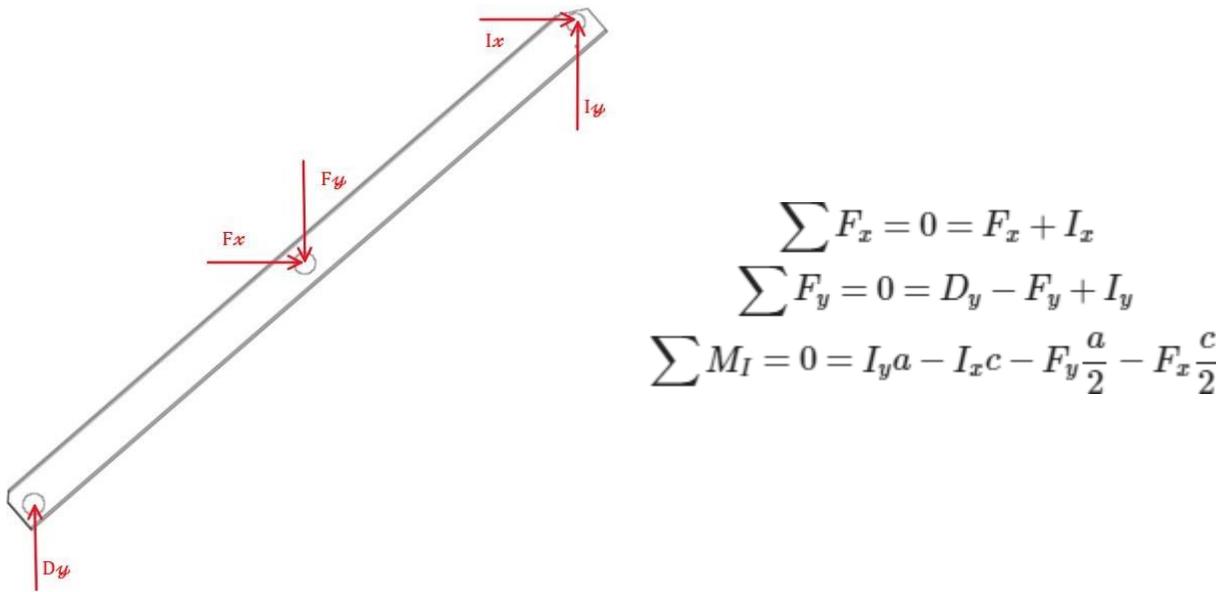
Continuando con el análisis, se avanza hacia la tijera inferior. Siguiendo un orden lógico, se aborda el examen de la conexión del pistón en la barra JC [7].

Figura 7. Diagrama de cuerpo libre barra JC y ecuaciones



Con el objetivo de concluir el análisis y obtener las ecuaciones necesarias para resolver el sistema, se procede al examen detallado de la barra ID [8]. De esta manera, se logra completar un sistema de 10 ecuaciones con sus respectivas incógnitas. Para la resolución de este sistema, se empleará el lenguaje Python, haciendo uso de las bibliotecas SymPy y NumPy. Este enfoque computacional permitirá una solución eficiente y precisa en el marco del análisis estructural del elevador hidráulico.

Figura 8. Diagrama de cuerpo libre barra ID y ecuaciones



En la Tabla 1 se presentan los valores de las variables conocidas, los cuales fueron determinados gracias a las condiciones iniciales del elevador en posición comprimida. Las longitudes específicas fueron obtenidas a partir del diseño tridimensional realizado en el software Inventor.

Es importante destacar que, para los cálculos y análisis realizados, se considera la carga de tres toneladas, pero se toma la mitad de este peso. Esto se debe a que el análisis se está llevando a cabo desde un solo lado de la estructura, teniendo en cuenta un enfoque específico para evaluar la capacidad de carga y la resistencia de la misma.

Tabla 1. *Valores de variables conocidas*

Variable	Valor	Unidad
Masa	3000	<i>Kg</i>
<i>F</i>	14715	<i>N</i>
<i>a</i>	2.409	<i>m</i>
<i>b</i>	1.6256	<i>m</i>
<i>c</i>	0.191	<i>m</i>
<i>d</i>	0.7789	<i>m</i>
<i>e</i>	0.14444	<i>m</i>
<i>f</i>	0.1532	<i>m</i>
<i>g</i>	2.0621	<i>m</i>
β	1.6256	<i>rad</i>
A_x	0	<i>N</i>
A_y	998.6264	<i>N</i>
B_y	4786.3760	<i>N</i>
C_y	4786.3760	<i>N</i>
D_x	0	<i>N</i>
D_y	998.6264	<i>N</i>

A continuación, se presenta el código en Python [10] utilizado para resolver el sistema de ecuaciones 10x10 [9] que modela el comportamiento del elevador hidráulico. Este código se implementó utilizando la biblioteca SymPy para manipulación simbólica y NumPy para operaciones numéricas

Figura 9. Sistema de ecuaciones

$$\begin{bmatrix}
 -E_x - I_x \\
 E_y - I_j - 9928.62640085185 \\
 0.095504E_x - 1.2046331E_y + 23920.704 \\
 E_x - 0.974370064785235G + J_x \\
 -E_y + 0.224951054343865G + J_y - 4786.37359914815 \\
 -0.095504E_x - 1.2046331E_y + 0.315885665654225G - 11531.648133 \\
 -F_x + 0.974370064785235H - J_x \\
 F_y - 0.224951054343865H - J_y + 4786.37359914815 \\
 -0.095504F_x + 1.2046331F_y - 0.315958573949307H + 11531.648133 \\
 F_x + I_x
 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}$$

Figura 10. Código Python para la solución del sistema de ecuaciones

```

import numpy as np
import sympy as sp
from sympy import *

m = 3000 #[Kg]
F_t = m*9.81 #[N]
F = F_t/2
a = (94.853*25.4)/1000
b = 1625.6/1000
c = (7.52*25.4)/1000

d = (30.665*25.4)/1000
e = (6.031*25.4)/1000
f = (5.684*25.4)/1000
g = (81.421*25.4)/1000

beta = np.radians(13)

A_x = 0
B_y = F*(a-b)/a
A_y = -B_y+F
D_y = A_y
C_y = B_y

E_x,E_y,F_x,F_y,G,H,I_x,I_y,J_x,J_y = symbols("E_x,E_y,F_x,F_y,G,H,I_x,I_j,I_x,I_y")

#Barra AI
eq_1 = -E_x-I_x #Sumatoria de fuerzas en X
eq_2 = -A_y + E_y - I_y #Sumatoria de fuerzas en Y
eq_3 = A_y*a + E_x*(c/2) - E_y*(a/2) #Sumatoria de momentos con respecto a I
#Barra BJ
eq_4 = J_x + E_x - G*cos(beta) #Sumatoria de fuerzas en X
eq_5 = J_y - E_y - B_y + G*sin(beta) #Sumatoria de fuerzas en Y
eq_6 = -B_y*a - E_y*(a/2) - E_x*(c/2) + G*sin(beta)*d + G*cos(beta)*f #Sumatoria de momentos con respecto a J
#Barra JC
eq_7 = -J_x - F_x + H*cos(beta) #Sumatoria de fuerzas en X
eq_8 = -J_y + F_y + C_y - H*sin(beta) #Sumatoria de fuerzas en Y
eq_9 = C_y*a + F_y*(a/2) - F_x*(c/2) - H*sin(beta)*g + H*cos(beta)*e #Sumatoria de momentos con respecto a J
#Barra ID
eq_10 = F_x + I_x #Sumatoria de fuerzas en X
eq_11 = D_y - F_y + I_y #Sumatoria de fuerzas en Y
eq_12 = I_y*a - I_x*c - F_x*(c/2) - F_y*(a/2) #Sumatoria de momentos con respecto a D

VAR = [E_x,E_y,F_x,F_y,G,H,I_x,I_y,J_x,J_y]
EQS = [eq_1,eq_2,eq_3,eq_4,eq_5,eq_6,eq_7,eq_8,eq_9,eq_10]

solucion_comp= solve(EQS,VAR)

```

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos del análisis estructural del elevador hidráulico. La Fuerza G representa la fuerza que debe ejercer el pistón hidráulico para levantar la carga, mientras que la Fuerza H es la fuerza que actúa en sentido contrario. Se verifica que estas fuerzas son iguales en magnitud, pero opuestas en dirección, lo cual confirma que el análisis se desarrolló de manera correcta.

Es importante destacar que los valores de otras variables obtenidas durante el análisis, como ángulos y longitudes, son fundamentales para comprender el comportamiento detallado del elevador en diferentes posiciones. Estos resultados son esenciales para garantizar la seguridad y eficiencia del diseño final del elevador hidráulico.

Tabla 2. Resultados de la solución del sistema de ecuaciones

Variable	Valor	Unidad
E_x	-42.8292	N
E_y	19853	N
F_x	-42.8292	N
F_y	19853.8572	N
G	112205.6973	N
H	112205.6973	N
I_x	42.8292	N
I_y	9925.2308	N
J_x	109372.7018	N
J_y	-600.5590	N

Según los resultados obtenidos, se identificó que la carga máxima del sistema se localiza en el pivote J. Este hallazgo se considerará como un parámetro crucial para llevar a cabo el análisis de elementos finitos (FEA).

5.2.2 Cálculos hidráulicos

Una vez obtenidas las fuerzas críticas en los pivotes mediante el análisis estático, el siguiente paso es integrar estos resultados en el diseño del sistema hidráulico. La carga máxima

identificada en el pistón 'G', con un valor de 109372.7 N, se convierte en un parámetro clave para el diseño del pistón hidráulico. Esta fuerza proporciona la información necesaria para dimensionar y seleccionar adecuadamente los componentes del sistema hidráulico, garantizando que el elevador cumpla con los requisitos de carga y resistencia establecidos por WMC. La integración de estos dos aspectos del diseño asegura una sinergia entre la estructura mecánica y el sistema hidráulico, optimizando así el rendimiento y la eficiencia del elevador hidráulico desarrollado.

Aplicando el principio de Pascal, la fuerza obtenida se utiliza para determinar el diámetro necesario del cilindro hidráulico. Se adopta una presión estándar de 2500 psi, comúnmente utilizada en la industria. Este valor de presión permite calcular de manera aproximada el área necesaria en el pistón hidráulico para ejercer la fuerza identificada en el análisis estático. Este enfoque garantiza una adecuada distribución de la presión en el sistema, contribuyendo a la eficiencia y estabilidad del elevador hidráulico.

Dado que el sistema de unidades utilizado es el Sistema Internacional (SI), procedemos a realizar la conversión de la presión de psi a kPa. La presión de 2500 psi se convierte a kilopascales, utilizando la relación 1 psi = 6.89476 kPa. Por lo tanto, la presión de 2500 psi equivale a aproximadamente 17237.9 kPa en el sistema métrico.

$$P = \frac{F}{A}$$
$$D = \sqrt{\frac{F}{\frac{\pi}{4}P}}$$

Resolviendo la ecuación y despejando el diámetro, obtenemos un valor aproximado de 9.1 cm y un área de 65.1 cm² que facilita la determinación del tamaño adecuado del pistón. A continuación, procederemos al cálculo de la potencia necesaria del motor para llevar a cabo eficientemente este trabajo.

Para lograrlo, es esencial calcular tanto el caudal del cilindro como el caudal de la manguera [11]. Se llevó a cabo una iteración, variando el tiempo en un rango de 10 a 60 segundos, con el objetivo de observar en qué intervalo de potencias podríamos trabajar y determinar los tiempos necesarios para ejecutar el movimiento de la estructura de manera eficiente. Cabe destacar que el caudal del cilindro se calculó considerando el doble del caudal del cilindro, ya que se incorpora un segundo pistón en el sistema.

Figura 11. *Calculos hidraulicos*

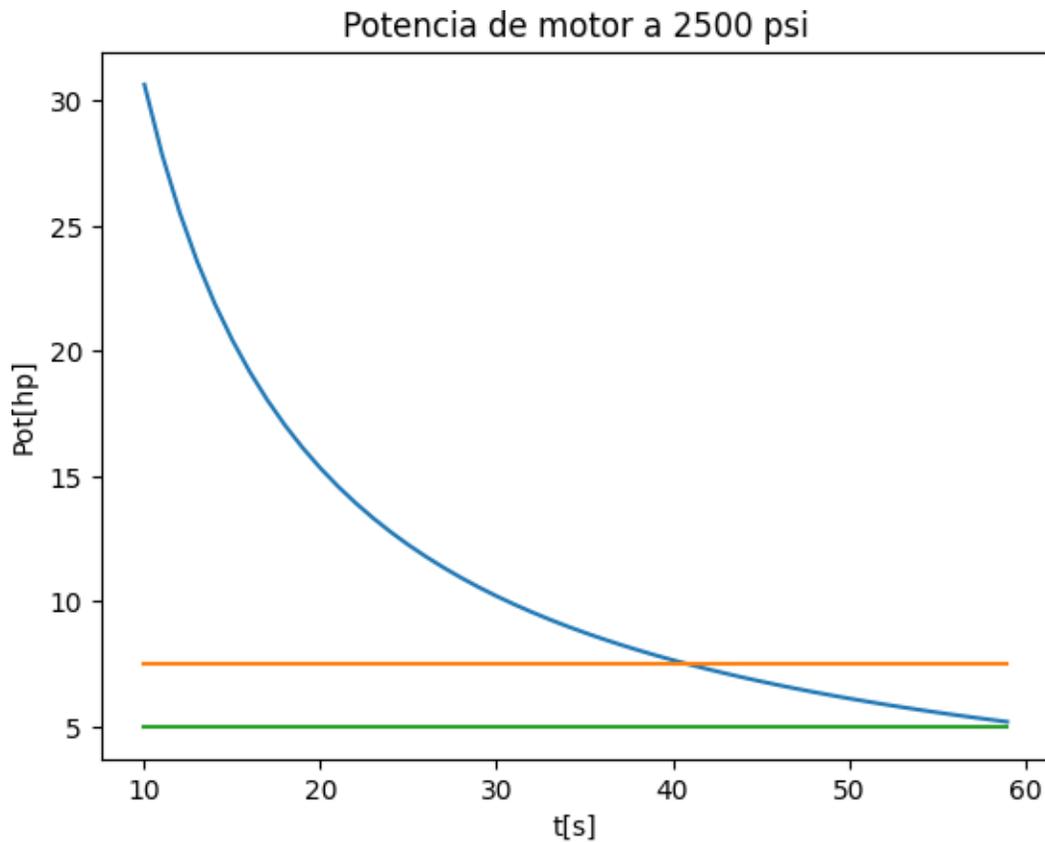
$$Q_c = \frac{A_{cil} * L_{carrera}}{t} \quad \text{Caudal del cilindro}$$
$$A_{man} = \frac{A_{cil} * L_{carrera}}{t} \quad \text{Área de la manguera}$$
$$Q_m = \frac{L_m * A_{man}}{t} \quad \text{Caudal en la manguera}$$
$$Q_T = 2 * Q_c + Q_m \quad \text{Caudal total}$$
$$POT_{HP} = (P Q_T) \frac{1000}{745.7} \quad \text{Potencia [HP]}$$

Donde,

$$A_{cil} = 65.10 \text{ cm}^2 = 0.00651 \text{ m}^2 \quad \text{Área del cilindro}$$
$$L_{carrera} = 1 \text{ m} \quad \text{Carrera del cilindro}$$
$$L_{manguera} = 3 \text{ m} \quad \text{Longitud de la manguera}$$
$$t = [10, 60] \text{ s} \quad \text{Tiempo}$$
$$P = 17237.9 \text{ kPa} \quad \text{Presión}$$

En la figura 12 adjunta se presenta el gráfico que ilustra los resultados de la iteración realizada. Este análisis, que abarca un rango de 10 a 60 segundos, proporciona una visión clara de las potencias posibles y los tiempos asociados para ejecutar el movimiento de la estructura con eficacia.

Figura 12. *Grafica de la potencia del motor vs tiempo*



El análisis de la gráfica revela que, dentro del rango de motores evaluados entre 5 HP y 7.5 HP, se obtienen tiempos de operación que oscilan entre 40 segundos y superiores a 60 segundos. Estos resultados son significativamente adecuados, considerando la carga sustancial de tres toneladas que se maneja en la superficie de la estructura. Este rango de potencias ofrece tiempos prudentes para ejecutar el desplazamiento de las tijeras de manera eficiente y segura.

5.3 Fase de Diseño Conceptual y Simulaciones

5.3.1 Diseño conceptual

En esta fase de diseño conceptual, se abordará la creación y simulación del modelo 3D del elevador hidráulico, teniendo en cuenta la disponibilidad de materiales locales en la ciudad de Medellín. Este enfoque garantiza que las simulaciones se lleven a cabo de manera realista y aplicable

5.3.1.1 Plataforma

La parte superior del elevador se configura con una plataforma [13] construida mediante una estructura soldada de perfiles de acero estructural (PTS) de 60x60 mm de 3 mm de espesor, dispuestos en forma de malla para asegurar resistencia y estabilidad. En esta plataforma, se integran dos canales en C de 6 in, que desempeñarán el papel de guías para las ruedas superiores del elevador. La elección de estos componentes se fundamentó en las dimensiones específicas de la paletizadora que será ubicada en la parte superior del elevador, considerando tanto el ancho como el largo del equipo para garantizar un ajuste preciso y seguro.

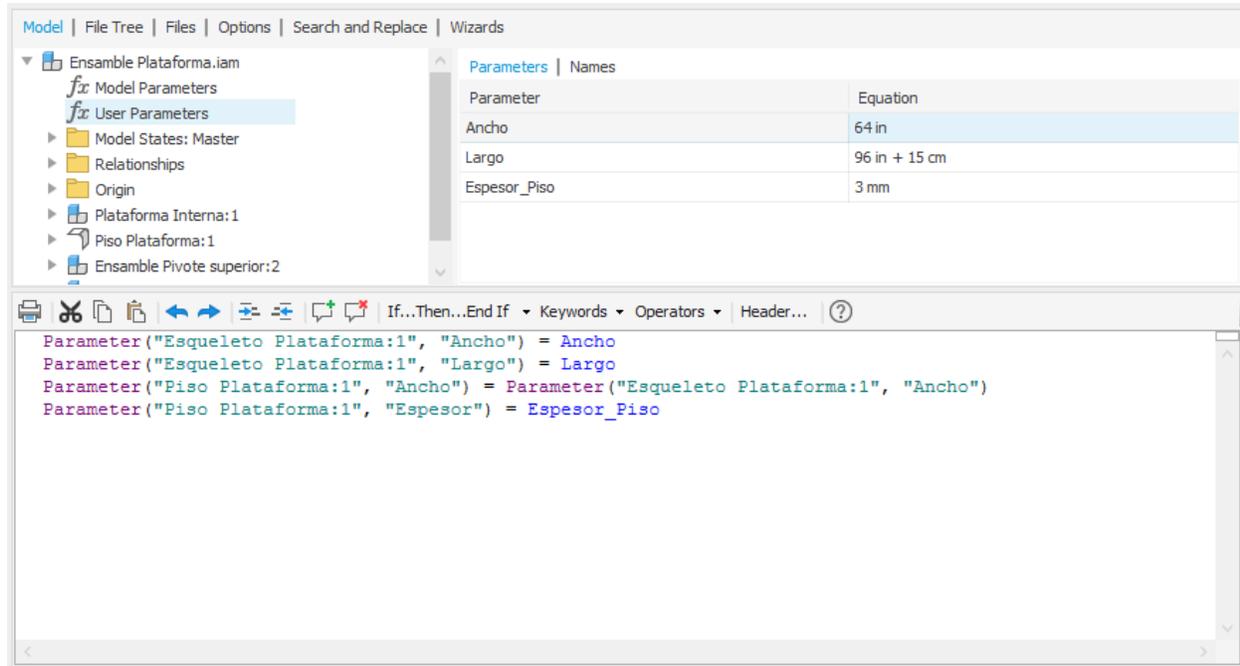
Adicionalmente, se incorporan de manera soldada los pivotes fijos, los cuales desempeñarán un papel crucial al asegurar la estabilidad y guiar el movimiento del elevador durante su funcionamiento. Estos pivotes, estratégicamente posicionados, contribuirán a mantener la integridad estructural y a garantizar un desplazamiento controlado y seguro del elevador hidráulico.

Figura 13. Vista en isométrico superior e inferior de la plataforma



Con el objetivo de lograr un diseño versátil y adaptable a posibles cambios o requerimientos futuros, se implementó el enfoque de diseño paramétrico utilizando el software Inventor [14]. En este ensamblaje, se consideró la posibilidad de ajustar dinámicamente el ancho y largo del elevador, brindando flexibilidad para adaptarse a diferentes necesidades y escenarios operativos.

Figura 14. Parametrización en el software Inventor



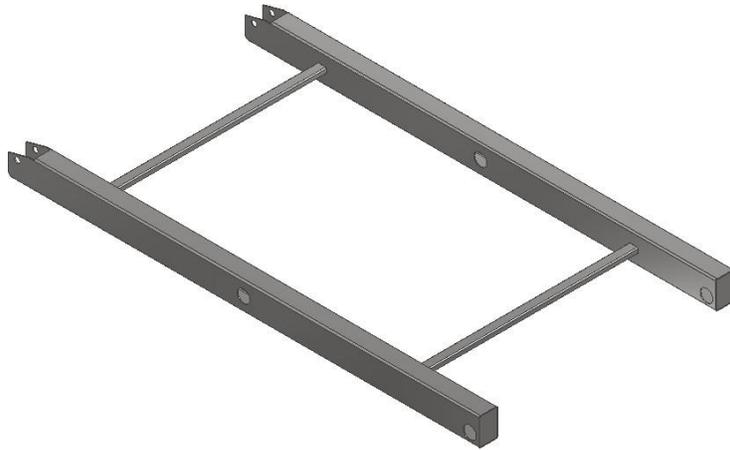
5.3.1.2 Marco Fijo Superior

La estructura denominada "Marco Fijo Superior" [15] ha sido concebida para brindar un soporte estable y resistente, albergando el pivote fijo que determina el movimiento del elevador. Se ha optado por utilizar perfiles estructurales PTR de 150x50 mm de 4 mm de espesor, proporcionando la solidez necesaria para resistir las cargas y mantener la integridad estructural. Estratégicamente se ubicaron perforaciones en los extremos y exactamente en la mitad de la longitud de estos perfiles, estos sirven como puntos de anclaje para los pivotes, asegurando una conexión robusta y permitiendo el movimiento deseado sin obstáculos.

Adicionalmente, se han incorporado elementos de refuerzo utilizando perfiles PTR de 50x30 mm de 2.5 mm de espesor para garantizar una mayor estabilidad y evitar posibles choques que podrían interferir con el desplazamiento correcto del elevador. Estos refuerzos se ubicaron en

un punto en el cual no interfiriera con el marco fijo superior cuando se contraiga por completo el elevador.

Figura 15. *Marco fijo superior*



5.3.1.3 Marco móvil superior

En el diseño del "Marco Móvil Superior" [16], se mantuvo la consistencia al utilizar perfiles similares a los del marco fijo superior. Sin embargo, se introdujo una modificación estratégica en los refuerzos internos. Dado que este marco estará ubicado entre los pivotes del marco fijo superior, se ajustaron las dimensiones de los refuerzos internos para garantizar una armonización perfecta con la estructura circundante. Específicamente, se acortaron los refuerzos internos para adaptarse a la disposición espacial dentro del sistema, asegurando así un ensamblaje fluido y eficiente entre el marco fijo superior y el marco móvil superior.

Figura 16. *Marco móvil superior*



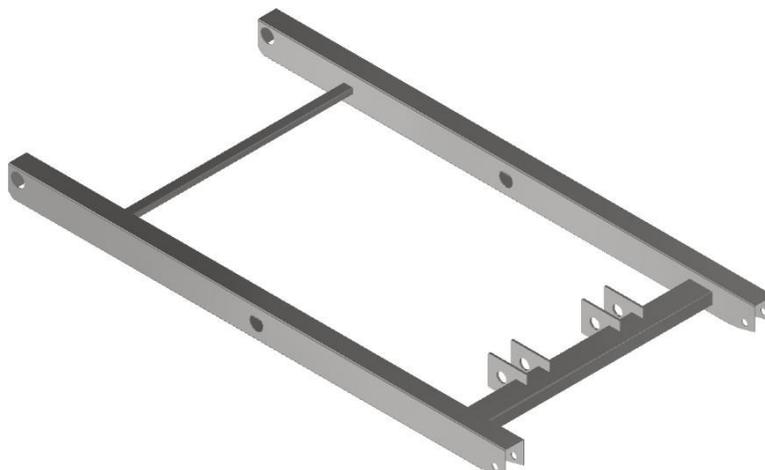
En uno de estos refuerzos estratégicos, se ha planificado la ubicación de los pivotes que sostendrán las horquillas de los pistones. Para garantizar la resistencia y estabilidad necesarias en esta área crítica, se seleccionó una pieza estructural específica: una PTR de dimensiones 150x50 mm con un espesor de 4 mm. Esta elección se fundamenta en la necesidad de proporcionar un soporte robusto y preciso para las horquillas, asegurando al mismo tiempo una integración sin problemas con los demás elementos del marco móvil superior.

Este refuerzo debe tener una inclinación para poder garantizar que los cilindros hidráulicos no choquen en la apertura del elevador con el mismo refuerzo.

5.3.1.4 Marco móvil inferior

En el marco móvil inferior [17], se han empleado los mismos perfiles rectangulares (PTR) utilizados en el marco móvil superior. Sin embargo, hay una distinción crucial en las dimensiones, ya que este marco debe adaptarse al ancho del marco fijo superior. Esta variación en las dimensiones es esencial debido a la intercalación que se produce en el sistema, garantizando una conexión precisa y fluida del cilindro hidráulico.

Figura 17. *Marco móvil inferior*



5.3.1.5 Marco fijo inferior

En el marco fijo inferior [18], se han empleado los mismos perfiles rectangulares (PTR) utilizados en el marco fijo superior. Sin embargo, las dimensiones de estos perfiles se ajustan al ancho del marco móvil superior, siguiendo la misma lógica previamente mencionada. Este diseño estructural garantiza la coherencia y cohesión en la interacción entre los marcos fijo y móvil, posibilitando un movimiento suave y controlado del elevador hidráulico.

Figura 18. *Marco fijo inferior*



5.3.1.6 Base

La base [19], un componente esencial del elevador hidráulico, ha sido diseñada con canales en C de 6 in. Estos canales no solo sirven como guía para las ruedas inferiores, sino que también alojan los pivotes fijos de la zona inferior del elevador. Para garantizar un movimiento suave y evitar posibles choques durante la contracción de la estructura, se han planificado cortes estratégicos en los canales.

Figura 19. *Base*



5.3.1.7 Bujes de acero

En complemento al diseño, se incorporan bujes de acero [20] estratégicamente soldados en las perforaciones de las PTR. La función principal de estos bujes es alojar componentes adicionales, específicamente bujes de latón, que servirán como puntos de pivote para los ejes del elevador hidráulico.

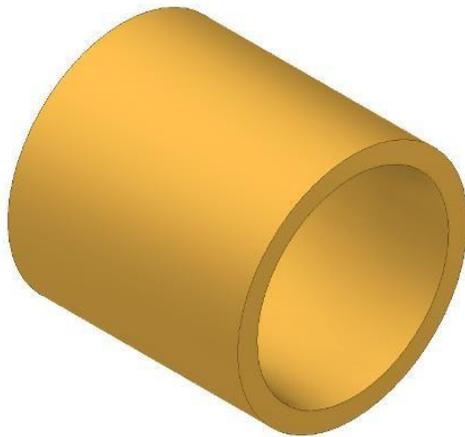
Figura 20. *Bujes de acero*



5.3.1.8 Bujes de Latón

Los bujes de latón [21] desempeñan un papel crucial al actuar como fusibles en el sistema. Gracias a su menor dureza en comparación con el acero, están diseñados para desgastarse preferiblemente en situaciones de fricción. Esta característica garantiza que, en casos de alta fricción entre componentes, los bujes de latón sean los elementos propensos al desgaste, actuando como piezas de repuesto que preservan la integridad de las partes estructurales más robustas, como las fabricadas en acero.

Figura 21. *Buje de latón*



5.3.1.9 Ejes para pivotes fijos

La fabricación de los ejes, actuando como pivotes fijos del sistema, implica un diseño cuidadoso. Estos ejes se construyen con una perforación central que se extiende hasta la mitad de su longitud, conectada radialmente con otra perforación en el centro del eje. Esta configuración facilita la lubricación de la superficie del eje en contacto con el buje de latón mediante una grasea. Además, se realiza un roscado en los extremos de los ejes para alojar arandelas MB y tuercas KM, garantizando una fijación segura que impide cualquier desplazamiento axial de los ejes. Este diseño integral no solo optimiza la funcionalidad del sistema, sino que también facilita el mantenimiento y prolonga la vida útil de los componentes.

Figura 22. *Eje para pivotes fijos*



5.3.1.10 Ejes para Ruedas

En el diseño de los ejes de las ruedas, se mantiene una característica similar a los ejes anteriores, incorporando roscas para alojar arandelas y tuercas KM. Sin embargo, a diferencia de los ejes anteriores, estos no requieren bujes de latón ya que interactúan con rodamientos de bolas. Estos rodamientos no solo facilitan el giro suave de las ruedas, sino que también cumplen la función crucial de transferir la carga al eje de manera eficiente. Este diseño específico garantiza una operación fluida y resistente al desgaste, mejorando la durabilidad y la capacidad de carga del sistema de elevación hidráulica.

Figura 23. *Eje para Ruedas*



5.3.1.11 Ejes pivotantes

En cuanto a los ejes pivotantes [24], se sigue un diseño análogo a los ejes fijos, pero con una longitud extendida. Estos ejes cumplen un papel crucial al conectar dos PTR y alojar un buje de latón posicionado en el centro de las PTR. Este buje, como se mencionó anteriormente, desempeña un papel vital al reducir la fricción entre los bujes de acero de las PTR. Similar a los ejes anteriores, el sistema de lubricación se mantiene, con dos perforaciones radiales que permiten llegar a ambos bujes de latón, uno en cada PTR.

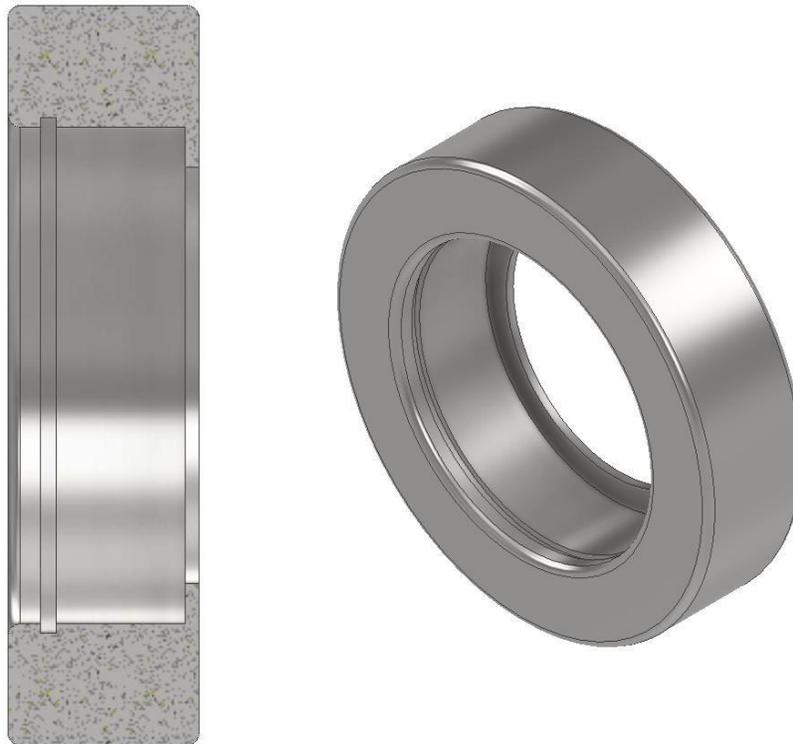
Figura 24. *Ejes pivotantes*



5.3.1.12 Ruedas

Las ruedas [25], en este diseño, fueron objeto de diversas propuestas. Se consideró la opción de utilizar una única rueda alojada en el centro de la PTR, así como la alternativa de emplear dos ruedas posicionadas a ambos lados de la PTR. La elección entre estas opciones se fundamentó en el uso del canal en C y en la generosa separación proporcionada por las PTR. Esto permitió la disposición de dos ruedas, distribuyendo así la carga en dos puntos mediante dos ruedas por eje. Este enfoque busca mejorar la distribución de la carga, reduciendo la presión puntual y promoviendo la estabilidad y eficiencia del sistema. Además, se consideró cuidadosamente el espacio para alojar el rodamiento, el cual, a su vez, debe contar con un pin candado para fijar de manera segura el rodamiento en su lugar.

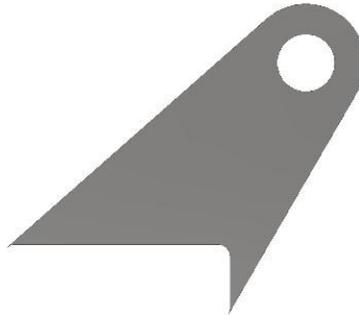
Figura 25. *Vista en seccionado y vista en isométrico de la Rueda*



5.3.1.13 Flanches para pasadores del pistón hidráulico

Los flanches [26] para los ejes que pivotarán los pasadores para los cilindros hidráulicos se diseñaron de manera estratégica para aprovechar al máximo el corte láser. Se configuraron con la forma precisa de la PTR, lo que simplifica la ubicación y facilita la soldadura al coincidir con su geometría. Además, se ubicó el pivote en un punto estratégico del sistema para garantizar el ángulo correcto de la plataforma cuando esté contraída. La elección de una lámina con un espesor de media pulgada se hizo con el propósito de asegurar la robustez necesaria, contribuyendo así a la estabilidad y resistencia general del conjunto.

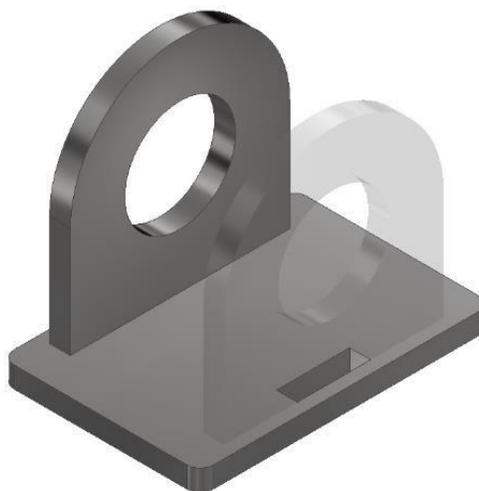
Figura 26. *Flanche para pasador del pistón hidráulico*



5.3.1.14 Pivotes fijos

Los pivotes fijos [27] se diseñaron utilizando láminas de acero de 3/8 de pulgada, las cuales fueron cortadas con precisión mediante el corte láser. En la pieza que desempeña la función de base, se realizaron cortes rectangulares que funcionan como hembra en mecánica, mientras que las láminas verticales tienen una configuración de macho que encajan perfectamente. Este diseño permite lograr una concentricidad precisa entre las perforaciones, facilitando al soldador el proceso de alineación crítica en la soldadura de estos componentes esenciales.

Figura 27. *Pivotes fijos*



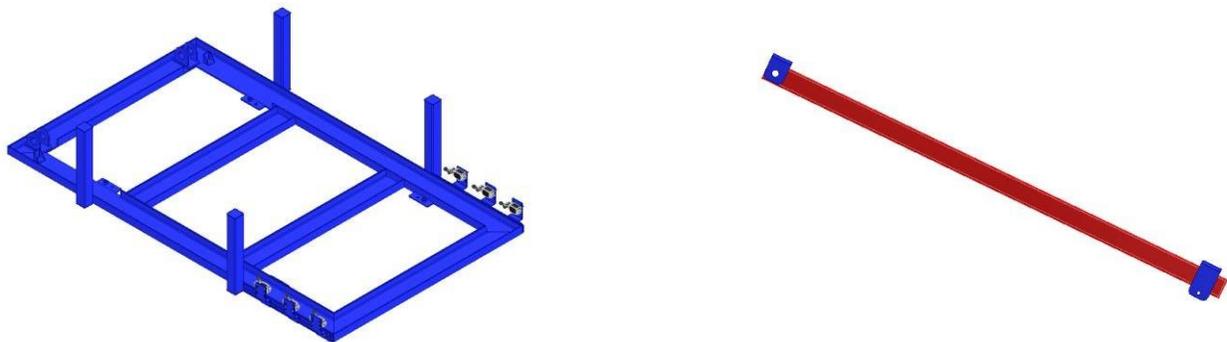
5.3.1.15 Diseños finales

Concluyendo el diseño, se realizaron cortes de perfiles cuadrados (PTS) de 70x70 de 2 mm de espesor con longitud estratégica. Estos cortes de PTS [28] se ubicaron en cuatro puntos en el perímetro de la base, asegurando el ángulo mínimo necesario para el correcto funcionamiento del elevador. Estos perfiles cumplen un papel crucial al proporcionarle a la estructura la rigidez requerida para sostener el sistema, garantizando al mismo tiempo la estabilidad y seguridad durante las operaciones del elevador hidráulico.

Considerando la seguridad durante las operaciones de mantenimiento debajo del elevador, se implementó un sistema de bloqueo mecánico [28]. Este sistema se compone de perfiles tubulares rectangulares (PTS) de 40x40 con un espesor de 2 mm, estratégicamente ubicados para proporcionar un bloqueo seguro. Este diseño asegura que el elevador permanezca de manera estable y fija durante cualquier tarea de mantenimiento, brindando un entorno de trabajo seguro y eficiente.

Finalmente, se incorporaron canales en C para reforzar la base [28], fortaleciendo aún más la estructura del elevador.

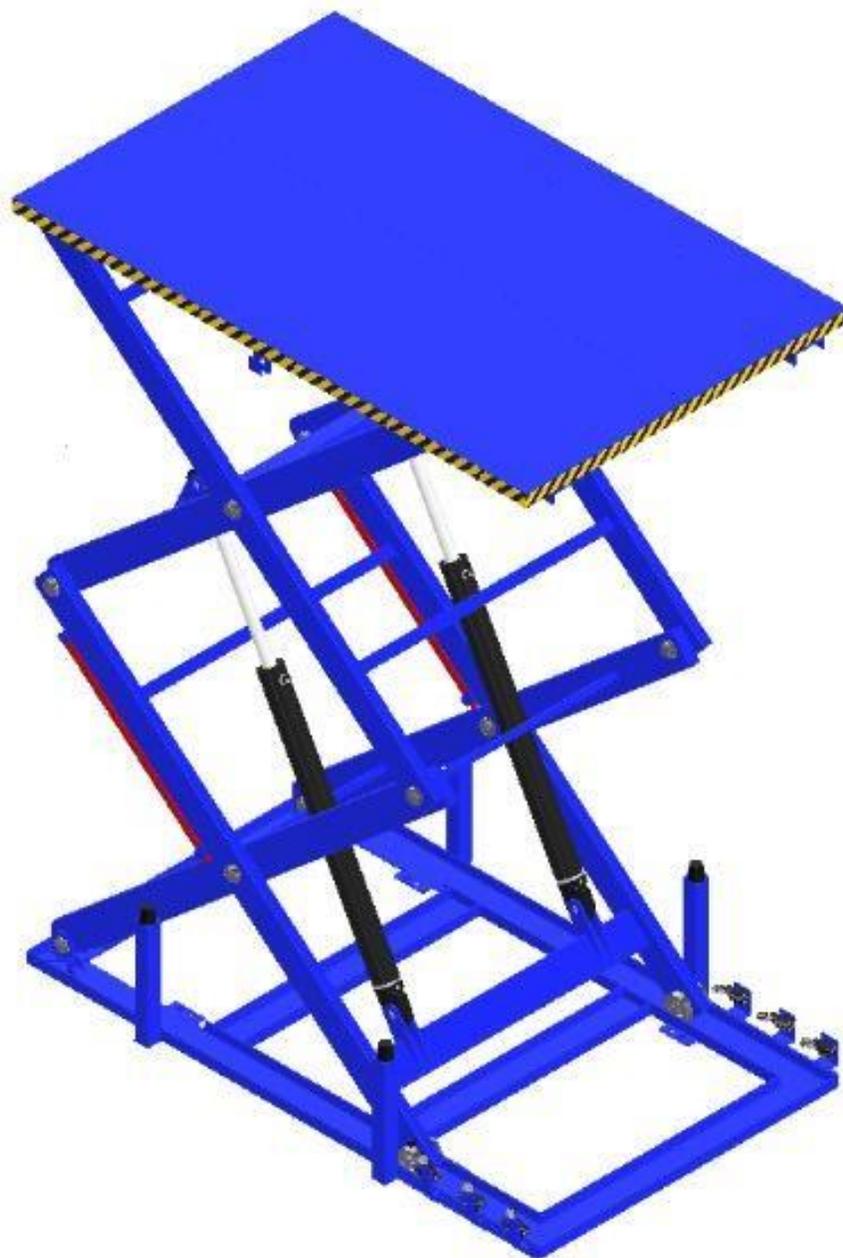
Figura 28. Diseños finales: PTS verticales y canales de refuerzo en la base y sistema de bloqueo mecánico



5.3.1.16 Ensamble final

Para concluir, todos estos componentes fueron ensamblados para dar forma a la estructura final en 3D. Únicamente resta determinar los diámetros específicos de los ejes, un detalle que se abordará mediante el análisis de elementos finitos (FEA), proporcionando así la información necesaria para completar el diseño final del elevador hidráulico.

Figura 29. *Elevador hidráulico: modelo 3D*



5.3.2 Análisis por elementos finitos FEA

Para el análisis por elementos finitos, se consideraron dos aspectos cruciales. En primer lugar, se identificó el eje crítico [30], cuyo cálculo influyó en el diseño de los demás ejes. Al asegurar un alto factor de seguridad en este eje, se garantizó una mayor seguridad en los demás. Por otro lado, se examinó el refuerzo superior [31], ya que la separación de los cilindros hidráulicos y la fuerza ejercida podrían provocar deflexiones y debilitar la estructura, afectando el movimiento de las tijeras. Con estos aspectos en mente, se comenzó con el análisis del eje crítico.

Para el análisis, se simplificó el diseño dividiendo el eje por la mitad y se fijó una de las secciones mientras se aplicaba la fuerza calculada en la otra sección, Asimismo, se estableció un criterio de parada con un umbral inferior al 1%, permitiendo un máximo de 7 refinamientos. Además, se varió el tamaño promedio de los elementos en la malla para asegurar la convergencia y obtener resultados óptimos en el análisis.

Los resultados indicaron que el material que mejor se ajustaba a las especificaciones para este eje era un ACERO SAE 4142, como se detalla en la tabla 3 que muestra la evaluación de diferentes tipos de acero.

Se consideraron diámetros cercanos a los 50 mm debido a las limitaciones de espacio impuestas por el diseño. Aunque el ACERO SAE 4142 mostraba mejores resultados, su falta de disponibilidad en el mercado local llevó a la elección del ACERO SAE 4340, que sí estaba disponible. Además, se definió un diámetro de 50 mm, ya que proporcionaba un factor de seguridad cercano a 1, sin tener en cuenta el buje de latón y el buje de acero que forman parte del sistema de pivote en las tijeras.

Tabla 3. Resultados del estudio FEA en el eje crítico con diferentes materiales

Material	Fluencia (MPa)	Diámetro (mm)	Von Mises (MPa)	Desplazamiento (mm)	FS	Convergencia (%)
Acero SAE 4130	460	46	757.8	0.5914	0.16	0.0
		48	638.2	0.5058	0.43	0.0
		50	565.2	0.4362	0.49	0.0
Acero SAE 4142	690	45	794.4	0.6160	1.82	0.0
		50	619.4	0.4226	2.33	0.0
		56	383.1	0.2171	3.77	0.0
Acero SAE 4340	689	48	682.5	0.0778	0.91	0.565
		50	686.3	0.0684	0.93	0.861
		51	474.4	0.0642	0.92	0.0

Tras una evaluación de costos, se tomó la decisión de emplear el mismo material, ACERO SAE 4340, no solo para el eje crítico sino también para los pasadores de los cilindros hidráulicos. Para los demás ejes, se optó por el ACERO SAE 4140, considerando que, dadas sus propiedades y la diferencia de magnitud en las fuerzas involucradas, proporcionaría un factor de seguridad significativamente mayor.

Figura 30. *Análisis FEA en el eje crítico*

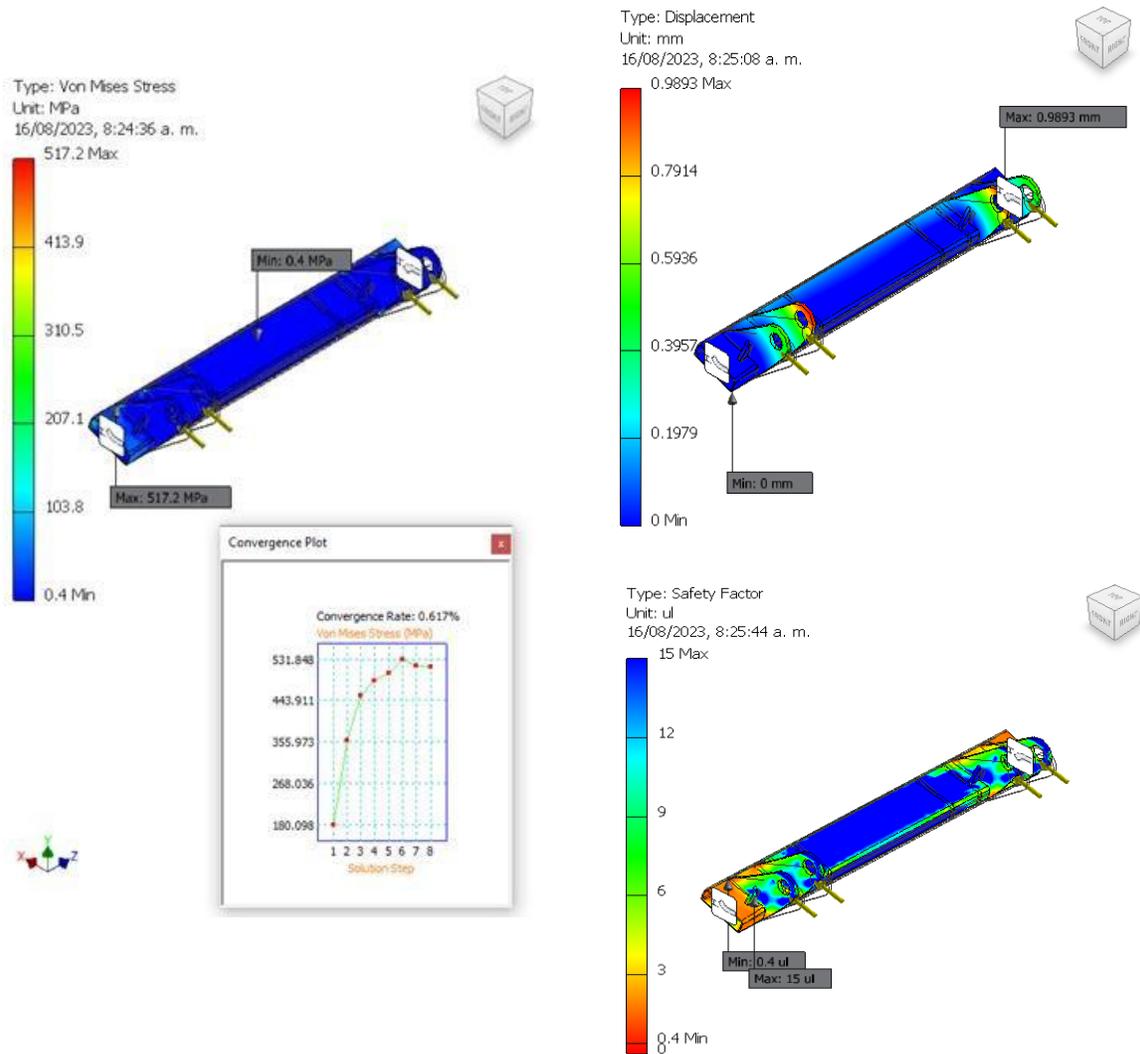
Una vez definidos los diámetros de los ejes, se procedió al análisis del refuerzo superior. Para ello, se realizaron cortes en las áreas de contacto con los flanches para los pasadores de los cilindros y se fijaron los extremos de la PTR. Se aplicaron las fuerzas en los pivotes y se llevó a cabo un análisis iterativo, variando la separación entre los cilindros. El objetivo era encontrar una ubicación que no generara esfuerzos excesivos en el refuerzo. Se establecieron los parámetros de malla y criterios de parada de manera consistente con el análisis previo.

Se observó que el esfuerzo máximo disminuye a medida que se aumenta la separación entre los cilindros, lo cual se traduce en un aumento del factor de seguridad esto se puede apreciar en la tabla 4.

Tabla 4. *Resultados del estudio FEA del refuerzo superior*

Separación a borde (mm)	Von Mises (MPa)	Desplazamiento (mm)	FS	Convergencia (%)
278.20	560.1	1.857	0.37	0.472
222.56	537.4	1.487	0.39	0.218
185.47	444.4	1.250	0.47	0.197
139.10	638.4	0.9893	0.4	0.617

Figura 31. Análisis FEA del refuerzo superior



Gracias a este análisis, se decidió mantener una separación en el borde de 93 mm, ya que era el máximo permitido por el ensamblaje con el cilindro en el borde de la PTR.

5.4. Planos

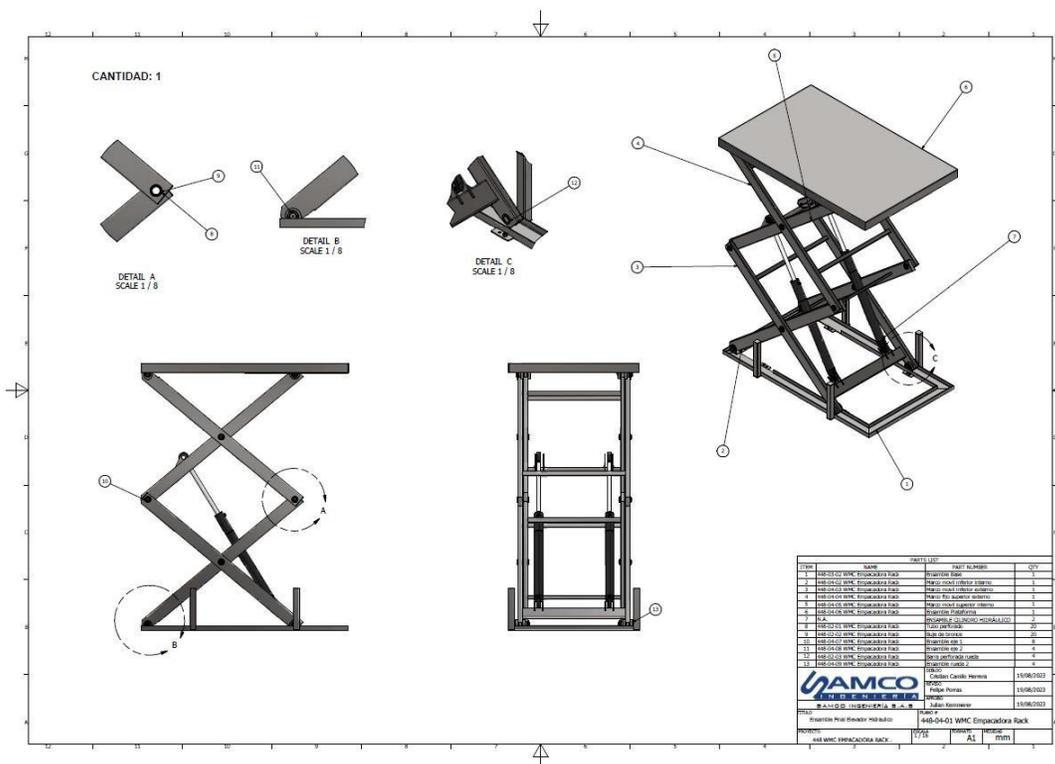
La creación de planos detallados es un componente crucial en el proceso de fabricación del elevador hidráulico. La relevancia de estos planos radica en la capacidad de proporcionar una guía precisa y comprensible para los diferentes profesionales involucrados en la construcción, desde los encargados de la soldadura hasta los expertos en corte láser y mecanizado.

La importancia del detalle en los planos reside en la necesidad de traducir de manera clara y completa el diseño conceptual a un conjunto de instrucciones técnicas. Cada elemento, desde las dimensiones de las piezas hasta los puntos de conexión, debe estar cuidadosamente especificado para asegurar que la fabricación siga los estándares y las intenciones del diseño original.

En este contexto, se presenta un plano general de ensamblaje que sirve como muestra representativa. Es fundamental destacar que este plano se presenta de manera parcial para resguardar la confidencialidad y propiedad intelectual del proyecto. Este documento ofrece una visión general del elevador, marcando la disposición y relación entre los diferentes componentes.

Además, se destaca la necesidad de planos específicos para cada etapa del proceso, ya sea para el corte láser de las láminas, la soldadura de las estructuras o el mecanizado de los ejes. Estos planos detallados, generados con precisión, facilitan la interpretación y ejecución precisa del diseño, reduciendo la probabilidad de errores y asegurando la coherencia entre la visión conceptual y la realidad manufacturada.

Figura 32 Plano Ensamble Elevador Hidráulico



5.5 Fase de Fabricación y Ensamble

5.5.1 Corte de Perfilería y Soldadura

La fase de corte de perfilería [32] y soldadura [32] fue ejecutada por un proveedor especializado en mecanizado y soldadura. Se suministraron los planos detallados del diseño del elevador hidráulico. La perfilería, compuesta principalmente de perfiles estructurales PTR, fue cortada con precisión por personal especializado.

Figura 33. Corte de perfilería y soldadura de plataforma



Nota: Archivo SAMCO

5.5.2 Mecanizado de ejes, bujes y ruedas

Para la fabricación de ejes, ruedas y bujes [33], se colaboró con un taller especializado en mecanizado. Los ejes fueron torneados a partir de acero SAE 4340 y 4140, con roscado en los extremos para facilitar la fijación de tuercas y arandelas. Las ruedas, críticas para el funcionamiento suave del elevador, fueron también torneadas y maquinadas con tolerancias ajustadas para albergar rodamientos de precisión.

Figura 34. *Mecanizado de ejes, ruedas y bujes*



Nota: Archivo SAMCO

5.5.3 Corte laser

Las láminas metálicas [34] utilizadas en el proyecto fueron adquiridas a un proveedor que utiliza tecnología de corte láser para garantizar cortes precisos y limpios. Estas láminas, principalmente de acero estructural, fueron cortadas de acuerdo con los archivos DXF proporcionados en los planos de diseño. Este proceso aseguró la obtención de piezas que encajarían perfectamente en la estructura final.

Figura 35. *Pivotes fijos soldados*



Nota: Archivo SAMCO

5.5.4 Hidráulica a Medida:

La unidad hidráulica, componente crítico para el funcionamiento del elevador, fue adquirida a un fabricante especializado en sistemas hidráulicos. Este sistema fue diseñado para cumplir con las especificaciones detalladas, incluyendo caudal, presión y capacidad de carga. La fabricación de los cilindros hidráulicos se realizó en el mismo taller del proveedor, ajustándose a las dimensiones y capacidades específicas del proyecto.

Las dimensiones y la potencia del motor se pueden ver en la tabla 5.

Tabla 5. *Descripción unidad hidráulica y de cilindros hidráulicos*

Descripción	Cantidad
Minicentral simple efecto con motor 3F. de 5HP a 2850 RPM. Bomba de 2.8 Gal. Tanque cuadrado horizontal de 25 litros, electroválvula ON/OFF a 220 VAC con rescate.	1
Cilindro simple efecto de 4x2 de 800mm de carrera, fijación ojos.	2

Donde el cilindro tiene un diámetro interno de 4 in (101.6 mm) y un vástago de 2 in (50.8 mm) con una carrera efectiva de 800 mm, con capacidad de generar hasta 12000 kg a 2200 Psi.

5.5.5 Piezas comerciales

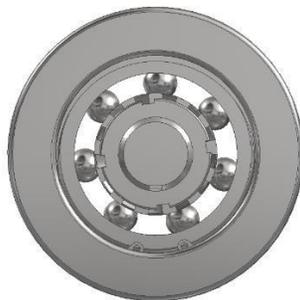
Conociendo los diámetros seleccionados para los ejes, se procedió a la selección de las tuercas KM [35] y sus respectivas arandelas [35]. Estos elementos cumplen la función crucial de evitar el desplazamiento axial de los ejes, asegurando así la integridad y estabilidad del sistema. La elección de estas piezas comerciales se basó en criterios técnicos que garantizan un correcto funcionamiento y una fijación óptima de los elementos estructurales del elevador hidráulico.

Figura 36. *Ensamble eje pivotante, junto a tuercas KM y sus respectivas arandelas.*



También se realizó la selección de los rodamientos rígidos de bolas [36] para las ruedas, asegurándonos de que pudieran soportar las cargas previstas en este punto crítico del diseño. Basándonos en el catálogo de rodamientos (Grupo SKF, 2019), se optó por el rodamiento SKF6307, que presenta una resistencia para carga estática de 19000 N, y se complementó con el uso del pin candado I80 para garantizar una fijación segura y confiable en el conjunto.

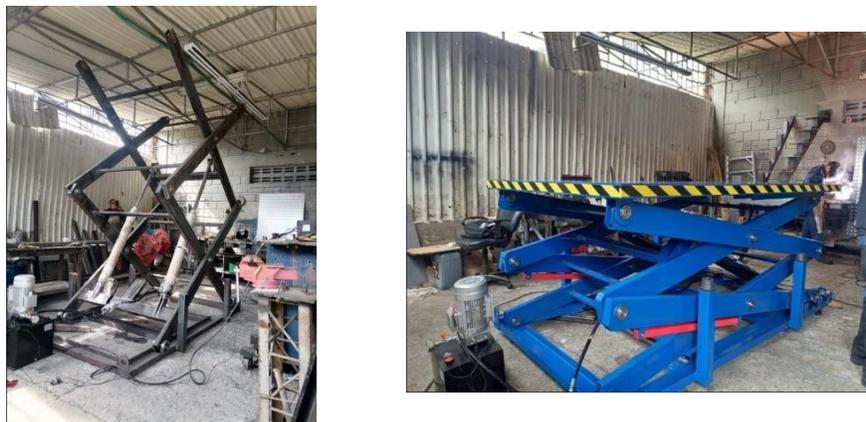
Figura 37. *Rodamiento rígido de bolas SKF6307*



5.5.6 Montaje y pintura

El ensamblaje final del elevador [37] se llevó a cabo en un taller especializado. Aquí, todas las partes cortadas y mecanizadas fueron ensambladas siguiendo los planos proporcionados. Antes del ensamblaje, se realizó un proceso de limpieza y preparación de superficie.

Figura 38. *Ensamble antes y después de aplicar la pintura electrostática*



Posteriormente, la estructura fue sometida a un proceso de pintura [37] mediante aplicación de pintura electrostática. Este método garantiza una distribución uniforme de la pintura sobre las superficies, proporcionando protección contra la corrosión y un acabado estético duradero.

5.6 Fase de Pruebas y Validación

Con la construcción del elevador completada, se llevaron a cabo pruebas integrales para garantizar su funcionalidad y seguridad. Se iniciaron con pruebas hidráulicas exhaustivas para verificar el desplazamiento suave de las ruedas y asegurar la ausencia de cualquier fricción indeseada o posibles choques entre los componentes del sistema. Este paso fue crucial para detectar y corregir cualquier anomalía en el funcionamiento hidráulico.

Posteriormente, se realizaron pruebas de carga, simulando condiciones de trabajo reales. Estas pruebas implicaron aplicar cargas equivalentes al peso máximo que el elevador deberá soportar durante su operación.

Para asegurar la eficacia del sistema de bloqueo mecánico diseñado con el propósito de garantizar la seguridad durante el mantenimiento, se realizaron pruebas específicas. Estas pruebas

incluyeron la simulación de situaciones donde el bloqueo sería esencial, como cuando se realiza trabajo bajo la estructura del elevador.

Durante estas pruebas, se verificó que el sistema de bloqueo se activara y desactivara de manera fácil y segura. Además, se evaluó la capacidad del bloqueo para mantener la estructura de manera estable y segura, evitando movimientos no deseados durante las operaciones de mantenimiento.

Para garantizar el correcto funcionamiento del sistema eléctrico y de control, se llevaron a cabo pruebas exhaustivas por parte del departamento eléctrico de SAMCO. Estas pruebas involucraron la verificación de cada componente eléctrico, desde interruptores hasta sensores, asegurando que respondieran adecuadamente a las señales y comandos.

Las pruebas también incluyeron la simulación de diversas condiciones operativas para confirmar la capacidad del sistema de control para adaptarse a diferentes escenarios. Se evaluó la sincronización del motor y la respuesta del sistema a comandos específicos, asegurando un desplazamiento suave y preciso del elevador.

Además, se realizaron pruebas de emergencia para confirmar que los sistemas de parada de emergencia y otros mecanismos de seguridad respondieran eficientemente, cumpliendo con los estándares de seguridad establecidos.

5.7 Fase de Documentación y Entrega

Una vez concluido el proyecto, se prepara una documentación técnica exhaustiva para respaldar el funcionamiento y mantenimiento del elevador hidráulico. Esta documentación incluye:

Planos Detallados:

- Planos con especificaciones técnicas de cada componente, detallando dimensiones, materiales y tolerancias.
- Diagramas eléctricos y esquemas de control para facilitar el mantenimiento y la solución de problemas.

Ficha Técnica:

- Una ficha técnica completa que enumera todas las piezas, tanto comerciales como fabricadas, con sus referencias y características.
- Instrucciones claras sobre el ensamblaje correcto de cada componente.

Manual de Usuario:

- Instrucciones detalladas sobre el funcionamiento seguro y eficiente del elevador.
- Procedimientos paso a paso para el encendido, apagado y situaciones de emergencia.

Mantenimiento Preventivo:

- Un programa de mantenimiento preventivo que incluye la frecuencia recomendada para la revisión y sustitución de componentes clave.
- Indicaciones para la lubricación, limpieza y cualquier tarea de mantenimiento rutinaria.

Referencias Comerciales:

- Información sobre las piezas comerciales utilizadas, como los cilindros hidráulicos y las unidades de control.
- Datos de contacto y referencias de proveedores para facilitar la obtención de repuestos en el futuro.

El proyecto de diseño y construcción del elevador hidráulico ha culminado exitosamente, marcando un hito en la eficiencia y seguridad en la manipulación de cargas pesadas. Desde su concepción hasta la fase de pruebas y documentación, cada etapa ha contribuido a la creación de una máquina robusta y versátil que cumple con las demandas específicas de la empresa WMC.

En la fase inicial, se desarrolló un diseño conceptual que no solo cumplía con los requisitos fundamentales de la empresa, sino que también presentaba una estructura modular adaptable. Esta característica permite futuras modificaciones y optimizaciones para afrontar los retos cambiantes del entorno industrial.

Los cálculos estáticos y de resistencia de materiales proporcionaron las dimensiones exactas para cada componente, garantizando no solo la seguridad sino también la resistencia estructural necesaria. La identificación de la carga máxima en el pivote J resultó ser un dato crucial que orientó el análisis de elementos finitos.

Las simulaciones FEA validaron y refinaron el diseño, brindando una visión detallada del comportamiento de la estructura bajo diversas condiciones de carga. Este análisis permitió ajustes finos, mejorando aún más la eficiencia y la seguridad.

La fase de diseño detallado culminó en la generación de planos precisos para cada componente. La fabricación se llevó a cabo con maestría, utilizando materiales de alta calidad y personal calificado de soldadura y mecanizado. Desde la perfilería hasta los componentes más pequeños, cada parte fue meticulosamente creada para garantizar una integración perfecta.

Las pruebas hidráulicas aseguraron un desplazamiento fluido y sin fricciones no deseadas, garantizando un rendimiento óptimo. Las pruebas de carga, simulando situaciones de trabajo reales, demostraron la capacidad del elevador para soportar cargas considerables con resultados satisfactorios, validando la robustez del diseño.

El sistema de bloqueo mecánico fue implementado con éxito, añadiendo una capa adicional de seguridad durante las operaciones de mantenimiento. Las pruebas eléctricas verificaron el correcto funcionamiento de los controles y sistemas de seguridad, asegurando un manejo eficiente y seguro.

Se entregó una documentación completa, incluyendo planos, fichas técnicas, manuales de usuario y procedimientos de mantenimiento. Esta información no solo facilita el uso y mantenimiento continuo, sino que también sienta las bases para futuras modificaciones y mejoras.

En conjunto, estos logros reflejan la aplicación exitosa de principios de ingeniería, análisis detallado y prácticas de fabricación avanzadas, consolidando el elevador hidráulico como una solución técnica y práctica para las necesidades específicas de la empresa WMC.

El desarrollo integral del proyecto de diseño y fabricación del elevador hidráulico ha arrojado resultados notables y abre espacio para una discusión crítica que aborda tanto los éxitos como las oportunidades de mejora.

Éxitos Destacados:**1. Eficiencia Estructural:**

El análisis de elementos finitos (FEA) confirmó la robustez estructural del diseño, con una distribución de carga uniforme y resistencia adecuada. Este éxito sugiere una comprensión precisa de las fuerzas involucradas y la capacidad de traducirla en un diseño eficiente.

2. Versatilidad del Diseño:

La modularidad del diseño permite adaptaciones futuras, mostrando una anticipación inteligente a posibles cambios en los requisitos operativos. Este aspecto es crucial en entornos industriales dinámicos.

3. Validación Experimental:

Las pruebas hidráulicas y de carga demostraron que la máquina superó las expectativas, manejando sin problemas las condiciones simuladas de trabajo pesado. Estos resultados validan los cálculos teóricos y confirman la capacidad de la máquina para cumplir con su propósito.

4. Sistema de Bloqueo Mecánico y Pruebas Eléctricas:

La implementación exitosa del sistema de bloqueo mecánico y las pruebas eléctricas destacan la atención a la seguridad y la eficacia operativa. Estos elementos contribuyen significativamente a la fiabilidad y la prevención de accidentes.

Oportunidades de Mejora:**1. Optimización de Materiales:**

Aunque se utilizaron materiales de alta calidad, es posible explorar opciones más ligeras y duraderas que puedan mantener o mejorar la resistencia y durabilidad del elevador.

Esto podría conducir a beneficios en términos de eficiencia energética y costos de producción.

2. Implementación de Tecnologías Emergentes:

La discusión abre espacio para considerar la integración de tecnologías emergentes, como sensores inteligentes para monitoreo en tiempo real y sistemas de control autónomo. Estas adiciones podrían elevar la eficiencia y la capacidad de respuesta del elevador.

3. Análisis de Costos a Largo Plazo:

La eficiencia y la durabilidad son vitales, pero es esencial considerar el análisis de costos a largo plazo, incluyendo mantenimiento y posibles actualizaciones. Este aspecto es crítico para evaluar la viabilidad económica del proyecto a lo largo del tiempo.

El proyecto de diseño y fabricación del elevador hidráulico para la empresa WMC ha culminado en una serie de logros notables que no solo satisfacen los objetivos propuestos, sino que también sientan las bases para futuras innovaciones y mejoras. A continuación, se presentan las conclusiones más destacadas:

- **Diseño y Modelado en Inventor:**

El desarrollo del elevador hidráulico mediante el software Inventor de Autodesk se ejecutó con éxito. El diseño final cumplió rigurosamente con los requisitos y especificaciones de WMC, asegurando eficiencia y seguridad en su funcionamiento. La utilización de técnicas avanzadas, como la parametrización, garantiza la adaptabilidad del diseño para futuras modificaciones.

- **Simulaciones mediante Elementos Finitos:**

La aplicación del método de elementos finitos proporcionó una evaluación exhaustiva del comportamiento del elevador bajo diversas condiciones de carga y operación. Estas simulaciones garantizan un rendimiento óptimo y confiable, respaldando la robustez estructural y funcional del elevador ante escenarios variados.

- **Cálculos de Ingeniería Detallados:**

El análisis estático y de resistencia de materiales realizado en el proyecto aseguró que el elevador pueda soportar la carga especificada de 3000 kg y cumplir con las condiciones operativas en el foso. Los cálculos detallados respaldan la integridad estructural y funcional del elevador, cumpliendo con los estándares de seguridad y eficiencia.

- **Parametrización en Inventor y Programación en Python:**

La implementación exitosa de técnicas avanzadas como la parametrización en Inventor y la programación en Python demostró ser crucial para optimizar el diseño del elevador. Estas estrategias no solo mejoraron la eficiencia del proyecto, sino que también garantizaron la adaptabilidad futura a posibles cambios o proyectos similares.

- **Documentación Integral y Colaboración:**

La generación de una documentación integral, incluyendo planos y reportes técnicos, aseguró la trazabilidad del proyecto. La colaboración estrecha con los equipos de ingenieros de SAMCO y WMC facilitó la comunicación fluida y la transferencia efectiva de conocimientos en todas las fases del proyecto, garantizando su éxito.

Referencias

- Ferdinand P. Beer, E. R. (2007). *MECÁNICA VECTORIAL para INGENIEROS*. Mexico D.F:
McGraw -Hill Interamericana.
- Grupo SKF. (2019). *Rodamientos*.