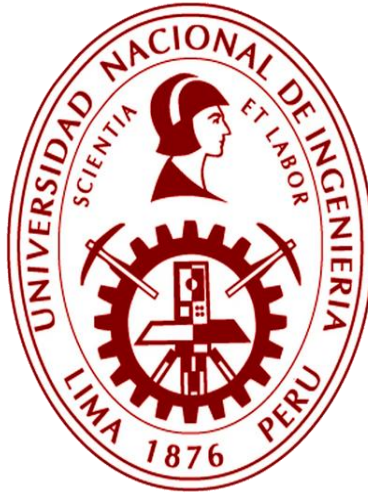


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



Trabajo de Suficiencia Profesional

**Diseño de Sistema Electromecánico de Extracción de Placas mediante
Sujeción con Imanes Electropermanentes para Reducir el Tiempo de
Mantenimiento en Filtro Prensa en una Unidad Minera**

Para obtener el Título Profesional de:

Ingeniero Mecánico

Elaborado por

Joseph Alberto Avalos Adriano

 <https://orcid.org/0009-0000-6000-1353>

Asesor MSc. Hernan Cortez Galindo

 <https://orcid.org/0000-0002-3864-4173>

Lima - Perú

2025

Citar/How to cite	Avalos Adriano [1]
Referencia/Reference	[1] J. Avalos Adriano, <i>“Diseño de sistema Electromecánico de Extracción de Placas mediante Sujeción de Imanes Electropermanentes para Reducir el Tiempo de Mantenimiento en Filtro Prensa en una Unidad Minera”</i> [Trabajo de suficiencia profesional]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Avalos, 2025)
Referencia/Reference	Avalos, J. (2025), <i>Diseño de sistema Electromecánico de Extracción de Placas mediante Sujeción de Imanes Electropermanentes para Reducir el Tiempo de Mantenimiento en Filtro Prensa en una Unidad Minera</i> . [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

*A mis padres Jorge y Lyz y mis hermanos Luis, Carlos y Camila por ser mi mayor
motivación.*

Agradecimientos

A mis padres por siempre darme la mejor educación y apoyarme en todo momento. A la Universidad Nacional de Ingeniería y en especial a la Facultad de Ingeniería Mecánica por las enseñanzas brindadas durante mi formación profesional.

Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo desarrollar el diseño de un sistema extractor de placas filtrantes para un filtro prensa en minería para concentrado de Zinc, con el propósito de disminuir los tiempos de cambio de placas y mejorar la seguridad operativa en planta. Para ello, se propone un mecanismo automatizado compuesto por un portante integrada al equipo existente.

El proceso de diseño incluye el análisis estructural de los componentes, la selección de accionamientos mecánicos y la evaluación de criterios de seguridad. Los resultados obtenidos evidencian que la propuesta cumple con las exigencias de operación, garantiza un manejo seguro de las placas y contribuye a optimizar la disponibilidad del filtro prensa. El sistema diseñado constituye una alternativa técnica viable para futuras etapas de implementación en entornos mineros e industriales de filtración.

Palabras clave: Innovación, ergonomía, sistema, diseño estructural, seguridad del operador, filtro prensa.

Abstract

The present research work aims to develop the design of a filter plate extraction system for a filter press used in zinc concentrate mining, with the purpose of reducing plate replacement times and improving operational safety at the plant. To this end, an automated mechanism is proposed, consisting of an extraction carriage, a lifting yoke, an electro-permanent gripping system, and a supporting structure integrated into the existing equipment.

The design process includes the structural analysis of the components, the selection of mechanical actuators and the evaluation of safety criteria. The results obtained show that the proposed system meets operational requirements, ensures safe handling of the plates, and contributes to optimizing the availability of the filter press. The designed system represents a viable technical alternative for future implementation stages in mining and industrial filtration environments.

Keywords: Innovation, ergonomics, system, structural design, operator safety, filter press.

Lista de contenido

Dedicatoria	iii
Agradecimientos.....	iv
Resumen	v
Abstract	vi
Lista de tablas	xi
Lista de figuras	xii
Introducción	xv
CAPÍTULO I. Generalidades.....	1
1.1. Antecedentes de Investigación	1
1.2. Identificación y Descripción del Problema de Estudio	3
1.3. Formulación del Problema	8
1.3.1. Problema General	8
1.3.2. Problemas Específicos.....	8
1.4. Justificación e Importancia	8
1.4.1. Justificación tecnológica	8
1.4.2. Justificación económica	9
1.4.3. Justificación social.....	9
1.5. Objetivos	10
1.5.1. Objetivo General	10
1.5.2. Objetivos Específicos.....	10
1.6. Hipótesis	11
1.6.1. Hipótesis General.....	11

1.6.2.	Hipótesis Específica	11
1.7.	Variables y Operacionalización de Variables	12
1.8.	Metodología de la Investigación.....	12
1.8.1.	Unidades de Análisis	12
1.8.2.	Tipo, Enfoque y Nivel de Investigación.....	13
1.8.3.	Diseño de la Investigación	13
1.8.4.	Fuentes de Información	13
1.8.5.	Análisis y Procesamiento de Datos	14
CAPÍTULO II. Marco Teórico y Marco Conceptual		15
2.1.	Marco teórico	15
2.1.1.	Fundamentos de procesos de filtración en filtros prensa.....	15
2.1.2.	Fundamentos del imán electropermanente	21
2.1.3.	Fundamentos de sistemas de izaje	29
2.1.4.	Principios de cálculo estructural	33
2.1.5.	Sistema motriz.....	36
2.2.	Marco conceptual	42
CAPÍTULO III. Desarrollo del trabajo de investigación		44
3.1.	Datos técnicos de filtro prensa	44
3.2.	Determinación de carga de izaje.....	46
3.3.	Determinación de sistema de izaje	50
3.4.	Cálculo y selección de imán electropermanente	52
3.4.1.	Descripción de análisis	52
3.4.2.	Parámetros de diseño	53

3.4.3.	Determinación de carga y selección de imán	53
3.4.4.	Justificación de la selección del modelo	57
3.4.5.	Conclusión del cálculo	57
3.5.	Cálculo de estructuras metálicas	57
3.5.1.	Cálculo estructural de yugo de izaje	58
3.5.2.	Cálculo estructural de bastidor principal	84
3.6.	Cálculo de sistema motriz	92
3.6.1.	Cálculo motriz de motorreductor de izaje	93
3.6.2.	Cálculo motriz de motorreductor de desplazamiento	102
3.7.	Cálculo de tiempo de operación de extractor de placas	111
3.7.1.	Tiempo de desmontaje de placa filtrante antigua	112
3.7.2.	Tiempo de montaje de placa filtrantes nueva	114
CAPÍTULO IV. Resultados, Contrastación de Hipótesis y Discusión de Resultados		117
4.1.	Resultados	117
4.1.1.	Determinación de carga de izaje	117
4.1.2.	Selección del sistema electromagnético	117
4.1.3.	Diseño y cálculo de yugo de izaje	118
4.1.4.	Diseño y cálculo del bastidor principal	119
4.1.5.	Selección de motorreductor de izaje	120
4.1.6.	Selección de motorreductor de desplazamiento	122
4.1.7.	Diseño de extractor de placas	124
4.1.8.	Tiempos de operación de extracción de placas filtrantes.	127
4.2.	Contrastación de hipótesis	130

4.3. Discusión de resultados	132
Conclusiones	134
Recomendaciones.....	136
Referencias	137
Anexos.....	141

Lista de tablas

Tabla 1: Actividades de desmontaje y montaje de placas filtrantes en FP 1500x1500-30	5
Tabla 2: Operacionalización de variables	12
Tabla 3: Características generales de Filtro Prensa considerado en el estudio	44
Tabla 4: Parámetros de operación de filtro prensa considerado en el estudio	45
Tabla 5: Características de placas filtrantes	45
Tabla 6: Cantidad de partes que componen las placas filtrantes	47
Tabla 7: Cuadro de masas de placas filtrantes	49
Tabla 8: Cuadro de alternativas de sistemas de izaje	50
Tabla 9: Matriz Pugh.....	51
Tabla 10: Propiedades del tubo estructural ASTM A500 Grado A (100x150x4.0)	58
Tabla 11: Parámetros de diseño de yugo de izaje	61
Tabla 12: Longitudes de tramos en yugo de izaje	64
Tabla 13: Parámetros de cálculo de izaje	94
Tabla 14: Parámetros de cálculo de desplazamiento	103
Tabla 15: Determinación de tiempo de desmontaje de placas filtrantes	114
Tabla 16: Determinación de tiempo de montaje de placas filtrantes	116
Tabla 17: Tiempo total de cambio completo de placas filtrantes con extractor de placas ..	128

Lista de figuras

Figura 1: Producción mundial de zinc por país (Miles de TMF).....	3
Figura 2: Filtro prensa 1500x1500-30.....	7
Figura 3: Placas filtrantes de filtro prensa 1500x1500-30.....	7
Figura 4: Filtro vertical de hojas de presión.....	16
Figura 5: Filtro prensa de placas verticales.....	17
Figura 6: Filtro secador tipo Nutsche.....	17
Figura 7: Filtro de placas horizontales.....	18
Figura 8: Filtro de tambor rotatorio	18
Figura 9: Filtro Prensa 2000x2000-36	46
Figura 10: Identificación de las 37 placas filtrantes en Filtro Prensa 2000x2000-36	47
Figura 11: Despiece de partes de placa cabeza	48
Figura 12: Despiece de partes de placa rígida.....	48
Figura 13: Despiece de partes de placa cola	49
Figura 14: Factor de agarre de imán	54
Figura 15: Efectividad magnética vs espesor de separación para aceros dulces.....	55
Figura 16: Modelo 3D de yugo de izaje	60
Figura 17: Diagrama de cuerpo libre de yugo	62
Figura 18: Diagrama de Fuerza Cortante y Momento Flector de yugo de izaje.....	73
Figura 19: Sección transversal simplificada de tubo rectangular 150x100x4.5.....	75
Figura 20: Primer momento de área superior del tubo rectangular 150x100x4.5	77
Figura 21: Tipo de estudio para estructura de yugo de izaje para su FEA.....	80
Figura 22: Materiales designados en estructura de yugo de izaje para su FEA	81
Figura 23: Configuración de malla en FEA de estructura de yugo de izaje.....	81
Figura 24: Distribución de cargas dentro de FEA de estructura de yugo de izaje	82
Figura 25: Tensión de Von Misses en estructura de yugo	83
Figura 26: Desplazamiento de estructura de yugo.....	83

Figura 27: Coeficiente de seguridad en estructura de yugo	84
Figura 28: Modelo 3D de estructura de bastidor principal	85
Figura 29: Tipo de estudio para estructura de bastidor principal para su FEA.....	86
Figura 30: Parte 1 de materiales designados en bastidor principal para su FEA	87
Figura 31: Parte 2 de materiales designados en bastidor principal para su FEA	88
Figura 32: Configuración de malla en FEA de estructura de bastidor principal.....	89
Figura 33: Distribución de cargas dentro de FEA de estructura de bastidor principal	89
Figura 34: Tensión de Von Misses en estructura de bastidor principal.....	91
Figura 35: Desplazamiento de estructura de bastidor principal.....	91
Figura 36: Coeficiente de seguridad en estructura de yugo	92
Figura 37: Diagrama de cuerpo libre en sistema de izaje.....	95
Figura 38: Tabla de cable de acero tipo cascabel	96
Figura 39: Tabla de determinación de factor de derrateo	99
Figura 40: Diagrama de cuerpo libre sistema desplazamiento.....	105
Figura 41: Propiedades físicas de Sistema extractor de placas	105
Figura 42: Flujo de procesos para desmontaje de placas filtrantes	113
Figura 43: Flujo de procesos para montaje de placas filtrantes	115
Figura 44: Imán electropermanente de la serie Optimag E	118
Figura 45: Principio de funcionamiento del imán electropermanente.....	118
Figura 46: Modelo 3D de yugo de izaje.....	119
Figura 47: Modelo 3D de bastidor principal y componentes.....	120
Figura 48: Modelo 3D de sistema de izaje	121
Figura 49: Motorreductor modelo KA97DRN100L4/BE5AHR.....	121
Figura 50: Placa de motorreductor de izaje.....	122
Figura 51: Motorreductor KF47DRN100L4 de desplazamiento lado izquierdo	123
Figura 52: Placa de motorreductor de desplazamiento lado izquierdo.....	123
Figura 53: Motorreductor KF47DRN100L4 de desplazamiento lado derecho.....	124
Figura 54: Placa de motorreductor de desplazamiento lado derecho	124

Figura 55: Vista isométrica de modelo 3D de extractor de placas.....	125
Figura 56: Vista isométrica posterior de modelo 3D de extractor de placas	126
Figura 57: Vista isométrica de filtro prensa con extractor de placas	127
Figura 58: Diagrama de Pareto de actividades de cambio de placas filtrantes.....	129

Introducción

Los procesos de filtración con filtro prensa desempeñan un papel fundamental en la industria minera, especialmente en la obtención de concentrados metálicos. En operaciones de mediana y gran escala, la manipulación de placas filtrantes constituye una tarea frecuente y crítica, cuyo desempeño influye directamente en la productividad, la disponibilidad del equipo y la seguridad del personal. Sin embargo, el cambio de placas y la intervención manual en el filtro prensa suelen involucrar esfuerzos físicos elevados, riesgos operativos y tiempos muertos significativos, lo que evidencia la necesidad de implementar sistemas auxiliares que optimicen dichas labores.

En este contexto, la presente investigación desarrolla el diseño de un sistema extractor de placas filtrantes orientado a filtros prensa utilizados en la producción de concentrado de zinc. El sistema propuesto busca reducir los tiempos de reemplazo, mejorar la ergonomía del proceso y minimizar la exposición del operador a condiciones peligrosas. Según lo expuesto, el desarrollo del trabajo investigativo se divide en 4 capítulos.

El primer capítulo, se presenta el contexto del problema, la justificación del estudio, los objetivos generales y específicos, la delimitación del alcance y la importancia del diseño del sistema extractor de placas para filtros prensa en minería. Asimismo, se describe la estructura general del documento

El segundo capítulo, se exponen los fundamentos conceptuales y técnicos relacionados con los filtros prensa, la manipulación de placas filtrantes, los sistemas de izaje, el funcionamiento de imanes electropermanentes, así como los principios de diseño mecánico, seguridad industrial y ergonomía que sustentan el desarrollo del sistema propuesto.

El tercer capítulo, se desarrolla el cálculo para el diseño del extractor de placas, compuesto por el carro extractor, el yugo de izaje, el sistema de sujeción electropermanente, el bastidor estructural y selección de motorreductores. Se incluyen los diagramas de cuerpo libre, el análisis de esfuerzos (flexión, cortante y Von Mises), la verificación estructural de los

componentes, así como las simulaciones y validaciones necesarias para garantizar la operatividad del prototipo.

En cuarto capítulo, se analizan los resultados obtenidos del diseño, la evaluación estructural y selección de componentes, se discute la pertinencia de la solución propuesta y su contribución al proceso de filtración.

Finalmente, se presentan las conclusiones generales y específicas y las recomendaciones para futuras implementaciones o mejoras del sistema. Asimismo, se muestra las referencias bibliográficas y anexos de la presente investigación.

CAPÍTULO I. Generalidades

1.1. Antecedentes de Investigación

Miranda, C. (2019)¹, su estudio se centra en el diseño de un plan de mantenimiento, sin embargo, este se realiza a un filtro prensa de características y sistemas muy similares al que se analizará en el presente trabajo, siendo también situado en una unidad minera, pero para el tratamiento de relaves. Se detalla las características principales de funcionamiento y descripciones de un filtro prensa vertical de placas de polipropileno y el uso de las telas y placas filtrantes, indicando que es uno de los elementos más críticos por su alta rotación y desgaste constante. Según se detalla en su trabajo, las telas filtrantes cuya marca es similar a la del filtro en su estudio, suelen tener una vida útil de tres meses; caso contrario, si es de otra marca, éstas suelen mantenerse como máximo un mes, debido al riesgo que existe de presentar una falla y la posibilidad de alterar la integridad física del equipo. Finalmente, dentro de la justificación de su investigación, menciona que este será de interés para la comunidad de ingeniería de diseño de este filtro, puesto que evidenciará con claridad las oportunidades de mejora para posteriores fabricaciones.

Huayta, S. (2019)², en su trabajo de investigación realiza el diseño de una grúa tipo pórtico para el levante de cargas en un taller de montaje y desmontaje de unidades móviles, con el objetivo de evitar posiciones incómodas en la cual se realizan las actividades, reducir los riesgos de accidentes laborales y mejorar los tiempos de las actividades que se realizan en el taller. Dentro de la investigación realiza la comparación entre tres soluciones para la problemática que tiene, que vendrían a ser, grúa de brazo de accionamiento eléctrico, pórtico grúa y una grúa de brazo de accionamiento mecánico. La solución elegida según el análisis del autor es la grúa pórtico por los siguientes motivos: puede operar en cualquier superficie,

¹ Miranda, C. (2019). *Diseño de un plan de mantenimiento basado en la estrategia RCM para un filtro prensa de relave que opera en una mina a 4800 M.S.N.M.* [Tesis de título profesional, Universidad de Ingeniería y Tecnología]. <https://hdl.handle.net/20.500.12815/122>

² Huayta, S. (2019). *Diseño de estructura para levante de carga de dos toneladas para taller de mantenimiento* [Tesis de bachiller, Universidad Continental]. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/9060>

ejecuta trabajos de elevación y movimientos de cargas de gran peso y volumen, facilita el trabajo del operario y reduce la fatiga o riesgos de lesiones laborales. Finalmente, el autor menciona que logra alcanzar los objetivos de la investigación y conseguir un factor de seguridad del diseño de 3.9, siendo un adecuado para este tipo de estructuras de cargas de elevación.

Batchuluun, B. (2016)³, describe en su trabajo de investigación el desarrollo de un nuevo equipo de izaje para placas filtrantes del filtro prensa modelo VPA de la empresa Metso. Formula la necesidad de este sistema en los filtros prensa debido a un accidente en Australia en el equipo VPA. Esto ocurrió debido a que se suele utilizar eslingas o correas que introducen en los agujeros de las placas filtrantes no destinados para izaje. Además, de que para realizar esta maniobra el operario tiene que ingresar dentro del filtro exponiéndolos a situaciones de riesgo. El investigador detalla inicialmente los objetivos que tiene que alcanzar el proyecto en cuestión basándose principalmente en requerimientos de seguridad, económicos y técnicos. Adicionalmente, dentro de la investigación menciona el uso de electroimanes para el izaje de cargas, pero los descarta por la necesidad de utilizar sistemas de alimentación ininterrumpido porque sería catastrófico ante un corte de energía eléctrica. El dispositivo que finalmente propone es el de una estructura metálica que permite el levantamiento de las placas mediante un mecanismo metálico que enrolla los handle de las placas y estos sean sujetados con las eslingas para su izaje. Esta investigación valida que el problema del izaje de placas en filtros es muy real y crítico en la industria minera. Además, como se indica en el trabajo, no se cuentan con soluciones que tengan una referencia estandarizada lo que promueve a la generación de propuestas de sistemas exclusivos para esta actividad, cumpliendo los requisitos de seguridad y con nuevas tecnologías.

³ Batchuluun, B. (2016). *Development of New lifting Equipment for VPA Filter Press*. [Tesis de título profesional, Uppsala University]. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-287646>

1.2. Identificación y Descripción del Problema de Estudio

La minería en el Perú ejerce un rol importante para la economía nacional, destacando a nivel global como en Latinoamérica por su producción y exportación de minerales como cobre, oro, zinc, plata, hierro, etc.

Figura 1:

Producción mundial de zinc por país (Miles de TMF)

PAÍS	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024 ⁵¹
TOTAL	12.79	12.55	12.53	12.46	12.71	12.04	12.68	12.54	12.10	11.93
CHINA	4.30	4.80	4.40	4.17	4.21	4.06	4.14	4.04	4.00	4.00
PERÚ	1.42	1.33	1.47	1.47	1.40	1.33	1.53	1.37	1.47	1.27
AUSTRALIA	1.60	0.97	0.84	1.11	1.33	1.31	1.32	1.24	1.10	1.10
INDIA	0.82	0.68	0.83	0.75	0.72	0.72	0.78	0.84	0.86	0.86
ESTADOS UNIDOS	0.83	0.81	0.77	0.82	0.75	0.72	0.70	0.76	0.75	0.75
MÉXICO	0.68	0.67	0.67	0.69	0.68	0.64	0.72	0.74	0.69	0.70
BOLIVIA	0.44	0.49	0.47	0.48	0.52	0.36	0.50	0.52	0.49	0.51
KAZAJISTÁN	0.34	0.34	0.33	0.30	0.30	0.22	0.19	0.31	0.33	0.37
RUSIA	NA	NA	NA	0.30	0.26	0.28	0.28	0.30	0.31	0.31
SUECIA	0.25	0.25	0.25	0.22	0.24	0.22	0.23	0.24	0.22	0.24
OTROS	2.12	2.22	2.48	2.14	2.29	2.17	2.27	2.17	1.88	1.82

Nota: Anuario minero 2024 (Ministerio de Energía y Minas, 2024, pág. 70)

En 2024, aunque el Perú se mantuvo en el segundo puesto a nivel mundial de producción de zinc, este tuvo una disminución del 13.5% en comparación con el año previo. Esto debido a que las principales mineras productoras de este mineral tuvieron una contracción en su producción y aumento de costos.

En ese mismo año, el Producto Bruto Interno (PBI) del subsector minero metálico a nivel mundial alcanzó un valor de S/ 52 556 millones, lo que representa un crecimiento del 2.0% respecto al año anterior. Este resultado evidencia el dinamismo sostenido de la actividad minera, incluso en un contexto de desafíos globales, y reafirma su rol como motor clave de la economía nacional. Con una participación del 9.0% en el PBI total del país, la minería metálica continúa posicionándose como uno de los pilares fundamentales del desarrollo económico del país. (Ministerio de Energía y Minas, 2024, pág. 58)

Dentro de los procesos productivos de la minería se encuentra la separación de líquidos y sólidos de concentrados, específicamente de zinc para la obtención de tortas deshidratadas con alto contenido de sólidos. Como consecuencia, es usual que se utilicen

filtros prensa de alta eficiencia y grandes capacidades de procesamiento, además de cumplir con estándares ambientales nacionales.

En la fabricación de filtros prensa se tiene la necesidad de obtener tiempos de procesos internos reducidos, con el objetivo de tener una mayor producción diaria y evitar que se generen cuellos de botellas en esta etapa de producción del mineral. Por este motivo, es importante resaltar que muchos de los equipos en cuestión no cuentan con un sistema exclusivo de manipulación de las placas filtrantes. Obteniendo como resultando tiempos de maniobras, izaje y cambio de telas muy largos. Además de exponer al operario a ingresar en el interior del equipo para poder realizar maniobras improvisadas de izaje, lo cual conlleva a una alta probabilidad de riesgos de atrapamiento, golpes por caída de carga y sobreesfuerzos físicos. Adicionalmente, una inadecuada manipulación de las placas filtrantes da como resultado que estas puedan dañarse en un tiempo menor a lo previsto y al igual que las telas filtrantes son componentes críticos, frágiles y de alto valor económico.

El proceso de montaje y desmontaje de placas filtrantes en el filtro prensa presenta una serie de limitaciones operativas que impactan negativamente en la productividad y en la disponibilidad del equipo. En minería, el procedimiento se realiza de manera mayormente manual, empleando operarios y sistemas eléctrico o manuales, lo cual implica una alta demanda de tiempo, esfuerzo físico y recursos logísticos.

Se presenta la siguiente tabla obtenida de un mantenimiento preventivo y cambio de placas filtrantes a un filtro prensa de concentrado de zinc de una empresa minera. Este registro es para un filtro de 30 placas filtrantes y de dimensiones de 1500mm x 1500mm. Además, dentro de las consideraciones de trabajo de las actividades descritas, son en una parada de planta, el apoyo de 5 personales operativos y el uso de tecele eléctrico para el izaje de las placas.

Tabla 1:*Actividades de desmontaje y montaje de placas filtrantes en FP 1500x1500-30*

Actividad	Tiempo [min]	Cantidad de placas	Tiempo global [min]	Total [hr]
Traslado de andamios al punto de trabajo	60	-	60	
Traslado de nuevas placas al punto de trabajo	240	-	240	
Bloqueo de energía	60	-	60	
Montaje de andamios	60	-	60	
Desmontaje de placa móvil	60	-	60	
Desmontaje de placas filtrantes antiguas (1 placa en promedio)	5	30	150	
Colocación de telas filtrantes a placas nuevas	3	30	90	
Montaje de placas filtrantes nuevas (1 placa en promedio)	10	30	300	
Montaje de placa móvil	60	-	60	
Desmontaje de andamios	60	-	60	
Desbloqueo de energía	30	-	30	
Retiro de placas filtrantes usadas	120	-	120	
Orden y limpieza	60	-	60	
Desmovilización de andamios	60	-	60	
TOTAL	888		1410	23.5

Nota: Datos proporcionados por personal de mantenimiento de filtro prensa 1500x1500-30

Como se muestra en la tabla, las actividades asociadas al cambio completo de placas incluyen el traslado de andamios y placas nuevas, el montaje y desmontaje de andamios, el bloqueo y desbloqueo de energía, la retirada de placas usadas, la instalación de placas nuevas y las labores de orden y limpieza. La suma total de estas tareas alcanza 1410 minutos, equivalentes a 23.5 horas de trabajo continuo, considerando la intervención simultánea de

cinco trabajadores. Este tiempo prolongado evidencia la baja eficiencia del proceso y la elevada dependencia de la fuerza laboral.

Asimismo, se identifica que actividades como el desmontaje de placas usadas (120 minutos), la colocación e instalación de nuevas placas (hasta 300 minutos), y la logística de traslado de materiales (240 minutos) representan una parte significativa del tiempo total. Estos valores pueden incrementarse según diversos factores operativos, tales como: disponibilidad de grúa puente o tacle, distancia al punto de acopio, estado de limpieza de las placas, número de placas a reemplazar, espacio disponible para maniobrar y trabajos paralelos realizados por otras cuadrillas o empresas.

Estas condiciones generan demoras recurrentes que afectan directamente la disponibilidad del filtro prensa, ocasionando pérdidas de productividad y aumento de costos operativos. Además, el proceso manual expone al personal a riesgos ergonómicos y mecánicos debido a la manipulación repetitiva de placas de gran tamaño y peso.

La problemática descrita evidencia la necesidad de implementar un sistema de extracción de placas más eficiente, seguro y automatizado que permita reducir los tiempos de intervención, disminuir la carga física sobre el personal y mejorar la continuidad operativa del proceso de filtración.

Figura 2:

Filtro prensa 1500x1500-30



Nota: Datos proporcionados por personal de mantenimiento de filtro prensa

Figura 3:

Placas filtrantes de filtro prensa 1500x1500-30



Nota: Datos proporcionados por personal de mantenimiento de filtro prensa

1.3. Formulación del Problema

1.3.1. Problema General

¿De qué manera se reduce los tiempos de mantenimiento en filtros prensa en una Unidad Minera?

1.3.2. Problemas Específicos

- ¿De qué manera la correcta selección de los imanes electropermanentes influye en la seguridad del proceso de extracción y cambio de placas filtrantes?
- ¿Cómo debe diseñarse estructuralmente el bastidor principal y yugo de izaje del sistema extractor para garantizar su seguridad operativa durante el cambio de placas filtrantes?
- ¿En qué medida el cálculo adecuado de la potencia, torque y velocidad de los motorreductores del sistema extractor impacta en la reducción del tiempo total de cambio de placas filtrantes en el filtro prensa?

1.4. Justificación e Importancia

La implementación de un sistema de extractor de placas filtrantes tiene beneficios con justificaciones tecnológicas, económicas y sociales.

1.4.1. Justificación tecnológica

El sistema extractor propuesto constituye un aporte innovador dentro de los procesos de filtración industrial en minería. A diferencia de los métodos tradicionales que emplean izaje manual o dispositivos de enganche mecánico, la utilización de electroimanes permanentes ofrece múltiples ventajas:

Reducción de elementos móviles. Al eliminar ganchos, eslingas o herramientas improvisadas, se minimiza el desgaste, la necesidad de ajustes y los tiempos improductivos por mantenimiento.

Mayor confiabilidad en el agarre. Los imanes electropermanentes aseguran una sujeción estable de las placas filtrantes, evitando deslizamientos accidentales que suelen ocurrir con métodos convencionales.

Adaptación modular. El sistema puede integrarse a distintos modelos de filtro prensa de gran escala, ofreciendo versatilidad en operaciones mineras con altos volúmenes de concentrados.

Optimización de tiempos de operación. Al semiautomatizar la sujeción y liberación de las placas, se logra reducir significativamente el tiempo de cambio de telas filtrantes, mejorando la continuidad operativa del equipo.

1.4.2. Justificación económica

La implementación del sistema extractor con imanes electropermanentes presenta impactos económicos relevantes, tales como:

Reducción de costos operativos. El tiempo destinado al cambio de placas filtrantes puede representar hasta un 10–15% de la disponibilidad del filtro prensa en operaciones intensivas. La optimización de este proceso se traduce en mayor producción efectiva.

Menor costo de mantenimiento. A diferencia de mecanismos hidráulicos o mordazas mecánicas, los electroimanes requieren menos intervención de mantenimiento preventivo y correctivo.

Competitividad internacional. En un país como Perú, segundo productor mundial de zinc, la eficiencia operativa es un factor clave para mantener la competitividad frente a países como China.

1.4.3. Justificación social

El proyecto también se justifica desde un enfoque humano y de sostenibilidad, así como:

Seguridad laboral. La manipulación manual de placas filtrantes, que pueden superar los 250 kg, constituye un riesgo crítico de atrapamiento, sobreesfuerzo y accidentes graves. El sistema extractor elimina la exposición directa del operario a estas cargas, alineándose a los lineamientos de la OIT y del Ministerio de Energía y Minas (MINEM) en materia de seguridad ocupacional.

Bienestar del trabajador. La reducción de la carga física mejora la ergonomía del puesto de trabajo, disminuyendo el riesgo de lesiones musculoesqueléticas y contribuyendo a un ambiente laboral más seguro y productivo.

Capacitación y entrenamiento del personal. La implementación de un sistema automatizado requiere la participación de personal capacitado para su correcta operación y supervisión. En este sentido, la incorporación de un nuevo sistema electromecánico en el filtro prensa implica la capacitación y entrenamiento del personal operativo, lo que contribuye al fortalecimiento de sus competencias técnicas, mejora el desempeño laboral y promueve una mayor cultura de seguridad dentro de la unidad minera.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Diseñar un sistema electromecánico de extracción de placas mediante sujeción de imanes electropermanentes para reducir el tiempo de mantenimiento en filtro prensa en una unidad minera.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Seleccionar los imanes electropermanentes adecuados para asegurar un trabajo seguro en la extracción y cambio de placas filtrantes.
- Diseñar el bastidor principal y el yugo de izaje del sistema extractor, evaluando esfuerzos de flexión, cortantes, pandeo y equivalente de Von Mises para garantizar un funcionamiento seguro.

- Calcular la potencia, torque y características operativas de los motorreductores del sistema extractor, asegurando un desplazamiento continuo, seguro y con tiempos mínimos de operación en el cambio de placas filtrantes.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis General

El diseño de un sistema electromecánico de extracción de placas mediante sujeción con imanes electropermanentes reduce el tiempo de mantenimiento en un filtro prensa en una unidad minera.

1.6.2. Hipótesis Específica

- La adecuada selección de los imanes electropermanentes asegura un proceso seguro en la extracción y cambio de placas filtrantes.
- El correcto diseño del bastidor principal y el yugo de izaje del sistema extractor mediante esfuerzos de flexión, cortantes, pandeo y equivalente de Von Mises garantiza un funcionamiento seguro.
- El dimensionamiento adecuado de los motorreductores del sistema extractor permite disminuir los tiempos de operación en el cambio de placas filtrantes.

1.7. Variables y Operacionalización de Variables

Tabla 2:

Operacionalización de variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores
VI: Diseño de sistema extractor de placas filtrantes	Mecanismo electromecánico para semiautomatizar el proceso de separación de las placas filtrantes del filtro prensa.	Estructura electromecánica que extrae las placas filtrantes requeridas para cambio por cuestiones de mantenimiento de forma semiautomática y reducir la manipulación del operador.	1. Simulación de esfuerzos Von Misses 2. Simulación de deformaciones 3. Capacidad máxima de carga 4. Velocidad de traslación. 5. Velocidad de izaje.	1. Esfuerzos [MPa] 2. Deformaciones [mm] 3. Factor de seguridad 4. Capacidad [Toneladas] 5. Velocidad [m/s]
VD: Reducción de tiempos de cambio de placas filtrantes	Tiempo total requerido para realizar el cambio de una placa filtrante.	Tiempo requerido desde la selección de la placa filtrante a realizar cambio hasta la reposición de la placa filtrante a su posición original y posterior reinicio de ciclo de filtración.	1. Tiempo de extracción de placa 2. Tiempo de reposición de placa	1. Minutos 2. Minutos

Nota: Elaboración propia

1.8. Metodología de la Investigación

1.8.1. Unidades de Análisis

El presente trabajo de investigación tiene como unidad de análisis un filtro prensa de 4920 toneladas métricas secas diarias para 37 placas filtrantes de 2000x2000mm, empleado en la producción de tortas deshidratadas a partir de concentrados de zinc en una unidad minera a 4600 M.S.N.M. Asimismo, se consideran los procesos operativos vinculados a la extracción de placas y cambio de telas filtrantes, debido a que estas actividades críticas impactan directamente en la eficiencia, seguridad y disponibilidad en la última etapa del proceso de producción de concentrados minerales

1.8.2. Tipo, Enfoque y Nivel de Investigación

La investigación es de tipo aplicada, dado que busca resolver un problema operativo específico mediante la implementación de un sistema tecnológico innovador. El enfoque corresponde a un estudio cuantitativo, ya que se sustenta en la recolección y análisis de datos numéricos, tales como tiempos de operación (minutos), esfuerzos mecánicos (MPa), entre otros. El nivel de investigación es descriptivo-correlacional. Es descriptivo porque detalla la situación actual de procesos de filtración y manipulación de placas; y correlativo porque busca identificar la relación existente entre la implementación de un sistema nuevo de extracción de placas y variables como el tiempo de cambio de placas filtrantes.

1.8.3. Diseño de la Investigación

El diseño de investigación es no experimental, dado que no se manipulan las variables independientes, sino que estas son extraídas en un contexto real de operación de un filtro prensa dentro de una planta concentradora de zinc.

1.8.4. Fuentes de Información

Las fuentes de información empleadas en la investigación se clasifican en dos categorías.

Fuentes primarias. Observación directa de los procesos de operación de filtros prensa en la planta de concentrados de zinc, entrevistas con operadores y supervisores de planta.

Fuentes secundarias. Revisión bibliográfica de investigaciones académicas sobre diseño de sistemas de izaje y filtración, uso de normas técnicas nacionales e internacionales, manuales de mantenimiento y operación de fabricantes de filtros prensa, consulta de fichas técnicas de equipos. Además de documentos nacionales respecto a minería y seguridad ocupacional.

1.8.5. *Análisis y Procesamiento de Datos*

El análisis de la información recolectada se llevará a cabo mediante cuadros descriptivos elaborados en Excel, con el fin de organizar y procesar los datos obtenidos. En cuanto al análisis estructural, se empleará el software Autodesk Inventor tanto para el modelado del sistema propuesto como para la evaluación de esfuerzos y deformaciones bajo condiciones de operación. Además, se utilizará el configurador oficial SSC de SEW-EURODRIVE para la selección de los motorreductores. Asimismo, se efectuará un análisis cuantitativo comparativo entre el sistema convencional de manipulación de placas y el sistema propuesto con electroimanes, considerando factores como tiempos de operación. Los resultados obtenidos permitirán validar la viabilidad técnica, económica, social y ambiental de la propuesta, aportando un sustento integral para su implementación.

CAPÍTULO II. Marco Teórico y Marco Conceptual

2.1. Marco teórico

El presente capítulo desarrolla los fundamentos teóricos y conceptuales que sustentan su uso en el diseño del sistema extractor de placas filtrantes mediante electroimanes permanentes. Se aborda un marco completo desde el proceso de filtración de la unidad de análisis, el principio que se utilizará para el izaje de las placas filtrantes, criterios de cálculo estructural y requisitos motrices. La revisión bibliográfica se basa en fuentes académicas, libros de autores reconocidos y normas técnicas, con el objetivo de proporcionar una base teórica sólida para el desarrollo del diseño y su validación.

2.1.1. Fundamentos de procesos de filtración en filtros prensa

Principios de separación sólido-líquidos. La separación sólido-líquido es el proceso mediante el cual se logra la separación de una fase sólida dispersa en una fase líquida, con el fin de obtener un líquido clarificado (filtrado) y/o un sólido concentrado (torta). Según (Svarovsky, 2000), constituye una de las operaciones unitarias más importantes en el procesamiento de suspensiones, ya que permite transformar mezclas heterogéneas en productos aprovechables para posteriores etapas de tratamiento o comercialización. Al igual que otras operaciones en ingeniería, como la transferencia de masa o calor, la separación sólido-líquido nunca es completa. Normalmente pueden integrar algunos sólidos finos en la salida de líquido filtrado y, sin duda, habrá líquido arrastrado con la mayor parte de los sólidos que salen para la formación de la torta. El autor señala que la separación puede realizarse mediante diversos mecanismos físicos, entre los que destacan la sedimentación, la filtración, la centrifugación y la flotación, cada uno con diferentes fundamentos hidrodinámicos y aplicaciones industriales. Estos procesos están gobernados por principios de la mecánica de fluidos, transferencia de momento y propiedades reológicas de las suspensiones.

En síntesis, la separación sólido-líquido busca maximizar la eficiencia en la recuperación de sólidos o líquidos útiles, reducir el contenido de impurezas, optimizar el consumo de energía y garantizar la operatividad segura de los sistemas de producción.

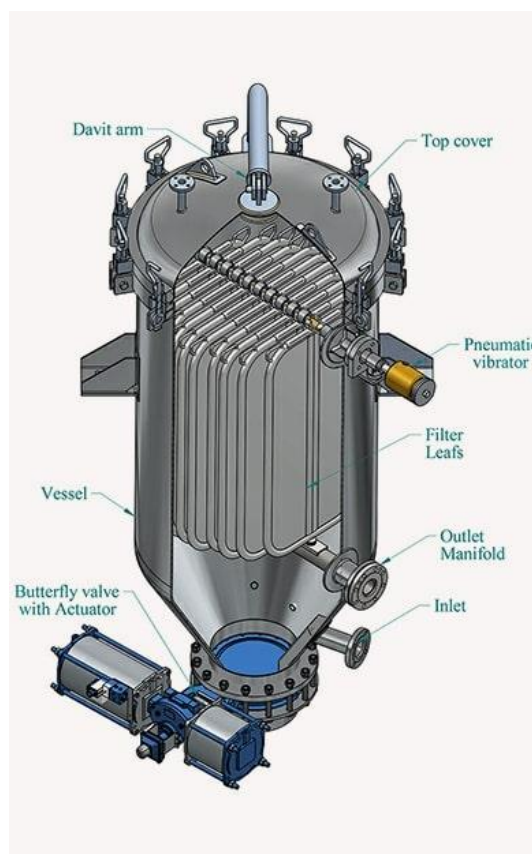
Tipología de filtros. La separación sólido-líquido puede realizarse mediante equipos que operan en modo lotes o semi-lotes, así como en modo continuo, según el tipo de proceso y las características de la suspensión. Esta clasificación se encuentra descrita en la literatura técnica (Cheremisinoff, 2002).

Equipos por lotes o semi-lotes

- Filtro de hoja de presión

Figura 4:

Filtro vertical de hojas de presión

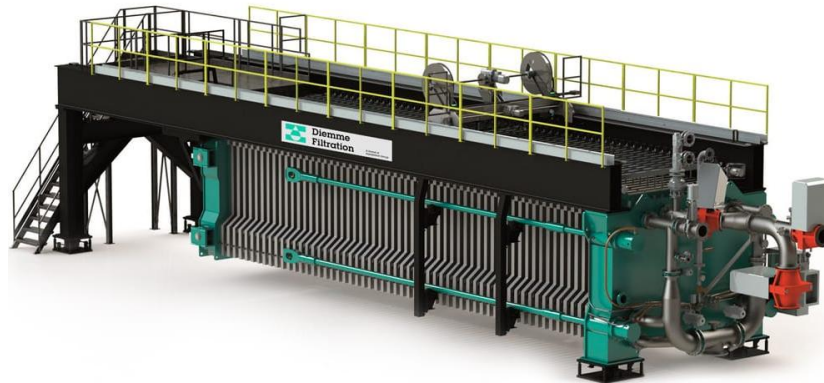


Nota: Los filtros de hoja de presión vertical (VPLF) son dispositivos de filtración a escala industrial que a menudo se usan en escenarios donde se requieren altas tasas de flujo. Tomado de <https://www.sharplex.com/spanish/vertical-pressure-leaf-filter.htm>

- Filtros prensa de placas verticales

Figura 5:

Filtro prensa de placas verticales



Nota: Los filtros prensa de placas verticales son especialmente desarrollados para grandes volúmenes de material a tratar y para productos altamente filtrantes como concentrados y relaves. Tomado de <https://www.diemmefiltration.com/es/filtros-prensa/filtro-prensa-ght-f/>

- Filtro Nutsche agitado

Figura 6:

Filtro secador tipo Nutsche



Nota: La tecnología de Filtros secadores tipo Nutsche (ANFD) cumplen con los requisitos de las industrias farmacéutica y de química fina para el lavado, separación y secado de sólidos. Tomado de <https://www.dedietrich.com/es/soluciones/productos/nutsche-agitado-filtro-secador/>

- Filtro de placas horizontales

Figura 7:

Filtro de placas horizontales



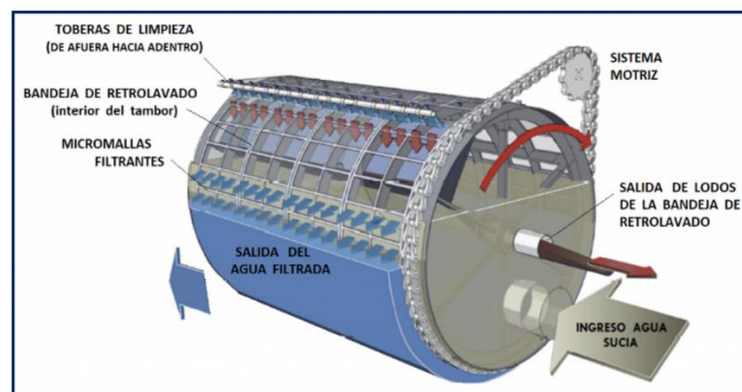
Nota: Los filtros de capas horizontales con filtros de capas con un paquete de elementos de filtro redondo y apilados en un recipiente cerrado y resistente a la presión, para trabajos con líquidos inflamables y corrosivos. Tomado de <https://www.kasag.com/es/producto/tecnica-de-filtracion-de-productos-tecnica-de-filtrado-filtros-de-superficie-torta-de-filtro-filtro-de-placas-horizontales-radium/>

Equipos continuos

- Filtro de tambor rotatorio

Figura 8:

Filtro de tambor rotatorio



Nota: Son filtros de mallas con aberturas muy pequeñas (micras), mecánicos y auto limpiantes, diseñados para filtrar grandes caudales de agua donde es esencial la eliminación de partículas. Tomado de <https://biolight.cl/filtro-de-tambor-rotatorio/>

- Filtro centrífugo
- Filtro de banda horizontal

Filtro prensa. El filtro prensa es un equipo de separación sólido-líquido ampliamente utilizado en procesos industriales, especialmente en minería, debido a su alta eficiencia y capacidad de obtención de tortas sólidas con bajo contenido de humedad, alrededor de 12%. Este nivel de eficiencia en la deshidratación lo convierte en una tecnología clave en el tratamiento de relaves y concentrados mineros, así como en aplicaciones químicas, alimentarias y ambientales

Desde un punto de vista ingenieril, el filtro prensa integra diversos sistemas de naturaliza mecánica, hidráulica, oleohidráulica, eléctrica, electrónica y de control automatizado, que trabajan en forma conjunta para garantizar su operatividad.

Su principio de funcionamiento se basa en el llenado progresivo de la suspensión a filtrar hacia las cámaras conformadas por las placas filtrantes. La pulpa ingresa a través de la línea de alimentación, distribuyéndose en las cámaras hasta completar la capacidad útil del filtro prensa. Una vez completada esta etapa y mediante la aplicación de aire comprimido, el líquido atraviesa el medio filtrante que envuelve la placa y es recolectado como agua filtrada, mientras que las partículas sólidas quedan retenidas, compactándose progresivamente hasta conformar una torta de filtración por cada cámara.

Importancia en la minería. En la práctica industrial moderna, los filtros prensa han evolucionado hacia diseños automáticos y de gran capacidad, que reducen los tiempos de ciclo y mejoran la ergonomía y seguridad del operador. Además, su aplicación en minería no solo responde a criterios de productividad, sino también a exigencias ambientales y de sostenibilidad, ya que permite recuperar agua de proceso, minimizar el volumen de lodos y optimizar la disposición final de residuos (Taylor & Francis, 2018).

Procesos principales en filtro prensa de placas verticales. El ciclo operativo de un filtro prensa comprende las siguientes principales etapas:

Cierre de filtro. Compresión de placas filtrantes mediante sistemas hidráulicos o electromecánicos para la compactación y hermetización de las cámaras mediante el desplazamiento de una placa móvil.

Alimentación de la pulpa. Llenado de pulpa a las cámaras formadas por las placas filtrantes para la compactación y formación de tortas húmedas mediante bombas de lodo a presiones alrededor de 10 bar.

Secado. Ingreso de aire comprimido al sistema a través de línea exclusivas y por las comunicaciones internas de las placas filtrantes, generando tortas deshidratadas a humedades alrededor del 10%. Además, se drena el agua filtrada extraída de la pulpa ingresada. Este proceso se puede dar por etapas para mejorar su eficiencia y distribución en las tortas formadas.

Apertura de filtro. Desplazamiento de placa móvil hacia máxima extensión de filtro para permitir el distanciamiento de las placas filtrantes y generar la caída de las tortas deshidratadas.

Limpeza de placas y lonas. Aplicación de agua de bajo nivel de partículas para su distribución mediante rociadores en todas las placas filtrantes a través de un carro móvil superior que se desplaza por todo el recorrido.

Partes principales de filtros prensa. Las principales partes de un filtro prensa incluyen el bastidor, las placas filtrantes, las telas filtrantes, sistemas oleohidráulicos, sistema de bombeo y los mecanismos electromecánicos. La interacción entre estos componentes determina la robustez del equipo y la facilidad de mantenimiento (Svarovsky, 2000).

Telas filtrantes. Las telas filtrantes constituyen un elemento crítico pues su porosidad, resistencia mecánica y compatibilidad química afectan tanto la eficiencia de separación como la frecuencia de reemplazo. Materiales como poliéster y polipropileno son habituales debido a su durabilidad y resistencia a agentes químicos presentes en circuitos de concentración (Wakeman & Tartelon, 2005). La manipulación repetida de telas y placas motiva la

implementación de soluciones que disminuyan los tiempos de mantenimiento y los riesgos ergonómicos para el operario.

2.1.2. Fundamentos del imán electropermanente

Con el fin de comprender la tecnología a implementar en el filtro prensa, resulta necesario establecer un marco teórico que aborde los fundamentos físicos sobre la teoría de magnetismo y electromagnetismo, además de diferenciar los dispositivos como imanes permanentes, electroimanes e imanes electropermanentes, así como analizar la manera en que este último será aplicado al sistema.

Fundamentos de magnetismo. El magnetismo es un fenómeno físico que surge de la interacción entre cargas eléctricas en movimiento (especialmente electrones) y la estructura interna de los materiales. En el contexto de materiales ferromagnéticos, estos fenómenos incluyen la formación de momentos magnéticos atómicos, la alineación de dominios magnéticos, histéresis, coercitividad, remanencia y anisotropía, los cuales determinan el comportamiento magnético en aplicaciones prácticas.

Materiales magnéticos. Según (Cullity & Graham, 2008) los materiales pueden clasificarse de acuerdo con su respuesta ante un campo magnético externo. En términos generales, se distinguen tres categorías principales:

Diamagnéticos. Se caracterizan por presentar una susceptibilidad magnética negativa y muy pequeña, lo que genera una magnetización en sentido opuesto al campo aplicado. En consecuencia, son repelidos débilmente por un imán. Ejemplos comunes incluyen el cobre, el bismuto y el oro.

Paramagnéticos. Poseen una susceptibilidad positiva, aunque pequeña, lo que significa que son atraídos débilmente por un campo magnético externo. Sin embargo, no conservan magnetización una vez que el campo desaparece. Ejemplos típicos son el aluminio, el wolframio y el platino.

Ferromagnéticos. En este grupo se encuentran los materiales que presentan una alta susceptibilidad magnética y una fuerte tendencia a mantener la magnetización incluso en ausencia de campo externo. Este comportamiento se debe a la alineación espontánea de los momentos magnéticos atómicos, resultado de la interacción de intercambio. Ejemplos representativos son el hierro, el níquel y el cobalto.

Dentro de los materiales con orden magnético relacionado al ferromagnetismo, se reconocen además otras configuraciones:

Antiferromagnéticos. Presentan una alineación antiparalela de los momentos magnéticos atómicos, con magnitudes iguales que se cancelan entre sí, dando como resultado una magnetización neta prácticamente nula. Un ejemplo típico es el óxido de manganeso.

Ferrimagnéticos. Se caracterizan por una alineación antiparalela de los momentos magnéticos, pero con magnitudes desiguales. Esto produce una magnetización neta distinta de cero, lo que les confiere propiedades similares a los ferromagnéticos. Un ejemplo clásico es la magnetita y las ferritas utilizadas en aplicaciones industriales.

Fundamentos de electromagnetismo. El electromagnetismo estudia la relación entre los campos eléctricos y magnéticos, los cuales están íntimamente vinculados. La base experimental la estableció Hans Christian Ørsted (1820) al demostrar que una corriente eléctrica podía desviar una aguja magnética, evidenciando que la electricidad genera un campo magnético. Posteriormente, André-Marie Ampère formalizó matemáticamente esta relación, y más tarde James Clerk Maxwell la integró en sus célebres ecuaciones. En ingeniería, el electromagnetismo se centra en cómo una corriente eléctrica produce un campo magnético y cómo este campo puede aprovecharse para realizar trabajo útil.

Relación entre corriente eléctrica y campo magnético. La relación entre corriente eléctrica y campo magnético fue establecida de manera fundamental por André-Marie Ampère. La Ley de Ampère establece que toda corriente eléctrica que circula por un conductor genera

un campo magnético alrededor de él, cuya dirección y sentido se determinan mediante la regla de la mano derecha. Matemáticamente, la ley se expresa como:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I_{enc} \quad (1)$$

Donde, $\vec{B}$ es el campo magnético, μ_0 la permeabilidad magnética del vacío e I_{enc} la corriente encerrada por la trayectoria cerrada considerada (Serway & Jewett, 2014).

Por otra parte, Michael Faraday descubrió que un campo magnético variable en el tiempo puede inducir una corriente eléctrica en un circuito cerrado. Este principio se conoce como la Ley de Faraday de la inducción electromagnética y se formula como:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (2)$$

Donde, $\mathcal{E}$ es la fuerza electromotriz inducida y ϕ_B el flujo magnético (Tipler & Mosca, 2008).

La Ley de Lenz, complemento de la de Faraday, indica que la polaridad de la corriente inducida es tal que se opone a la variación del flujo magnético que la genera. Esto se enuncia como una manifestación del principio de conservación de la energía (Griffiths, 2013)

Inductores y campos generados por bobinas. Los inductores son dispositivos eléctricos diseñados para almacenar energía en forma de campo magnético. Consisten típicamente en un alambre conductor enrollado en espiras o bobinas. Cuando una corriente fluye a través de la bobina, se genera un campo magnético proporcional a la intensidad de la corriente y al número de vueltas, según la relación:

$$L = \frac{N \cdot \phi_B}{I} \quad (3)$$

Donde, L es la inductancia, N el número de espiras, ϕ_B el flujo magnético total e I la corriente que circula (Alexander & Sadiku, 2016).

El campo magnético en el interior de un solenoide largo y estrecho, que es un modelo común de inductor, está dado por:

$$B = \mu \cdot n \cdot I \quad (4)$$

Donde, n es el número de espiras por unidad de longitud, I la corriente y μ la permeabilidad magnética del medio (Halliday, Resnick, & Walter, 2014).

De esta manera, las bobinas no solo son elementos fundamentales en la generación de campos magnéticos controlados, sino también en la conversión de energía electromagnética y en el filtrado de señales en sistemas eléctricos y electrónicos (Nilson & Riedel, 2020)

Imanes permanentes. Los imanes permanentes son materiales que mantienen una magnetización constante sin necesidad de una fuente externa de energía. Su comportamiento se debe a la alineación espontánea de los momentos magnéticos de los átomos, que se conserva gracias a la estructura cristalina del material (Cullity & Graham, 2008). Estos materiales presentan una alta coercitividad y una remanencia significativa, lo que les permite conservar el campo magnético en el tiempo (O'Handley, 2000).

En la práctica, se emplean en motores eléctricos, sensores, altavoces y sistemas de retención, debido a su capacidad de proporcionar campos magnéticos estables y duraderos (Chen, Sun, & Zhao, 2016)

Electroimanes. Un electroimán es un dispositivo que genera un campo magnético únicamente cuando circula corriente eléctrica a través de una bobina. El campo magnético producido depende de la intensidad de la corriente, el número de vueltas de la bobina y el material del núcleo, que usualmente es de hierro dulce para maximizar la permeabilidad magnética (Serway & Jewett, 2014).

El principio de funcionamiento se basa en la ley de Ampère y la ley de Faraday, donde el campo magnético es controlable y puede activarse o desactivarse según se requiera. Esto los hace ampliamente utilizados en sistemas de izaje, relés, frenos electromagnéticos, grúas industriales y dispositivos de almacenamiento magnético (Halliday, Resnick, & Walter, 2014).

Imanes electropermanentes. Los electroimanes permanentes constituyen un sistema magnético híbrido que combina las propiedades de los imanes permanentes con la capacidad de control de los electroimanes. Su fundamento teórico se basa en la superposición de campos magnéticos de un material con alta coercitividad (como NdFeB o SmCo) y de un material ferromagnético de baja coercitividad (como hierro dulce), acoplados a través de un circuito magnético controlado por una bobina.

El principio esencial radica en la manipulación del flujo magnético total (Φ) que atraviesa el circuito. Mediante la aplicación de un pulso de corriente eléctrica en la bobina, se puede invertir o modificar la magnetización de la parte ferromagnética de baja coercitividad, lo que altera el acoplamiento del flujo del imán permanente con el entrehierro. De esta manera, el sistema puede alternar entre dos estados estables:

- Estado de atracción (ON): el flujo del imán permanente se canaliza hacia el entrehierro, generando un campo magnético externo.
- Estado de liberación (OFF): la magnetización inducida en el material ferromagnético se opone al flujo del imán permanente, provocando una anulación parcial o total del campo en el entrehierro.

Una característica central es que, a diferencia de los electroimanes convencionales, los electropermanentes no requieren un suministro constante de energía eléctrica. El pulso eléctrico únicamente es necesario para cambiar el estado magnético, lo cual es posible gracias a la histéresis magnética de los materiales involucrados. El ciclo de histéresis determina la facilidad con que el material ferromagnético cambia de magnetización frente a un campo externo, propiedad clave para el control de estos dispositivos (Cullity & Graham, 2008).

En términos de teoría electromagnética, el comportamiento de los electropermanentes se puede describir mediante la ley de Ampère-Maxwell, que relaciona la corriente aplicada en la bobina con el campo magnético generado, y la superposición de flujos magnéticos de los

materiales permanentes y blandos, considerando además las pérdidas por histéresis y la saturación magnética del núcleo (Chen, Sun, & Zhao, 2016).

Por tanto, los electroimanes permanentes se sustentan en tres principios teóricos fundamentales:

Superposición de campos magnéticos. El campo magnético total en un imán electropermanente resulta de la suma vectorial de los campos generados por el imán permanente y el material ferromagnético de baja coercitividad, influenciado por el campo inducido en la bobina. Este fenómeno se describe mediante el principio de superposición:

$$\vec{B}_{total} = \vec{B}_{permanente} + \vec{B}_{inducido} \quad (5)$$

De acuerdo con (Griffiths, 2013), la naturaleza vectorial del campo magnético permite que la interacción entre los diferentes aportes produzca estados de refuerzo (atracción) o cancelación (liberación). Este principio explica la capacidad de los electropermanentes de alternar entre un estado activo y uno inactivo sin modificar permanentemente el imán de alta coercitividad.

Histéresis magnética. La histéresis magnética describe la dependencia del estado de magnetización de un material respecto a su historia previa de exposición a campos magnéticos. En los electropermanentes, el material de baja coercitividad cambia fácilmente de polaridad bajo la acción de un pulso de corriente, mientras que el material de alta coercitividad mantiene estable su magnetización (Cullity & Graham, 2008).

Este contraste permite que un breve pulso eléctrico reorganice el flujo magnético en el circuito, sin necesidad de energía continua. Según (O'Handley, 2000), esta propiedad es clave en el diseño de sistemas magnéticos híbridos, pues proporciona estabilidad en el estado ON y OFF sin degradar el imán permanente.

Conservación de la energía electromagnética. El funcionamiento de los electropermanentes también responde al principio de conservación de la energía

electromagnética, ya que la energía eléctrica suministrada por el pulso de corriente no se utiliza para mantener el campo, sino únicamente para modificar la configuración magnética interna. Una vez establecida, el campo en el entrehierro se conserva gracias a la energía almacenada en la magnetización del imán permanente (Jackson, 1999).

Este principio explica por qué los electropermanentes son más eficientes que los electroimanes convencionales, los cuales disipan energía en forma de calor debido a la corriente continua. En los electropermanentes, en cambio, la estabilidad del campo proviene directamente de la energía magnética intrínseca del imán permanente.

Capacidad de carga y factores ambientales. El desarrollo de los imanes electropermanentes ha permitido integrar en un solo dispositivo las ventajas de los imanes permanentes y los electroimanes, ofreciendo sistemas de sujeción seguros y eficientes que no requieren consumo continuo de energía. No obstante, su desempeño no depende únicamente de las propiedades magnéticas intrínsecas de los materiales, sino también de factores de diseño, normativos y ambientales. La capacidad de carga nominal declarada por los fabricantes constituye un valor de referencia bajo condiciones ideales, pero en la práctica esta capacidad puede verse significativamente reducida debido a condiciones externas como temperatura, vibraciones, corrosión, o irregularidades en la superficie de contacto. Por ello, resulta indispensable enmarcar el análisis de estos dispositivos dentro de estándares internacionales que regulan la seguridad en equipos de elevación y considerar los factores ambientales que afectan su rendimiento, garantizando así la fiabilidad y seguridad en aplicaciones industriales.

Capacidad de carga. La capacidad de carga de un imán electropermanente se define como la fuerza máxima que puede ejercer sobre una pieza ferromagnética en condiciones ideales, pero en la práctica debe calcularse considerando márgenes de seguridad y factores de reducción. La norma EN 13155:2020 sobre equipos de elevación no fijos establece que los imanes de carga deben ser capaces de sostener al menos tres veces su carga nominal en pruebas de desprendimiento, y que la fuerza de sujeción se verifique hasta dos veces el

valor nominal en condiciones controladas (European Committee for Standardization, 2020). Esta exigencia garantiza que el imán mantenga la carga incluso bajo condiciones de uso no ideales.

De manera complementaria, la norma ASME B30.20-2021 (Below-the-Hook Lifting Devices) también regula el uso de imanes de elevación, incluyendo los electropermanentes. Esta norma establece criterios de diseño, inspección, prueba y operación segura, especificando que la capacidad nominal debe verificarse con un factor de seguridad mínimo de 3:1 respecto a la fuerza de desprendimiento (American Society of Mechanical Engineers, 2025).

Asimismo, la norma ISO 13001-3:2016 sobre grúas y equipos de elevación define lineamientos generales de diseño y factores de seguridad para dispositivos magnéticos, considerando no solo la carga nominal sino también las condiciones dinámicas de operación y posibles desbalances en la sujeción (International Organization for Standardization, 2016).

Factores ambientales. En cuanto a los factores ambientales, el rendimiento de los imanes electropermanentes se ve influenciado por variables externas que pueden reducir su capacidad efectiva de carga:

- **Temperatura.** Los materiales magnéticos presentan una pérdida gradual de magnetización con el aumento de la temperatura, pudiendo acercarse al punto de Curie donde la magnetización se anula. Según (Cullity & Graham, 2008) tanto la coercitividad como la remanencia disminuyen con la temperatura, afectando directamente la fuerza de sujeción. Normas como IEC 60404 sobre materiales magnéticos también especifican métodos de ensayo para caracterizar estos efectos térmicos (International Electrotechnical Commission, 2017).
- **Entrehierro y condiciones de superficie.** La presencia de óxido, suciedad o irregularidades superficiales aumenta la reluctancia del circuito magnético, reduciendo drásticamente la fuerza de sujeción. Estudios técnicos resaltan que la capacidad de

elevación puede disminuir más del 50% cuando existe un entrehierro de apenas 0.5 milímetros (Coey, 2002).

- **Vibraciones y choques mecánicos.** El funcionamiento en entornos con vibraciones continuas o impactos puede inducir micro fisuras o desplazamientos en los polos magnéticos, alterando la distribución del flujo y disminuyendo la capacidad de carga.
- **Desmagnetización parcial.** Exposición a campos externos adversos o a condiciones extremas puede provocar pérdidas de magnetización a largo plazo, fenómeno conocido como “relajación magnética” (O'Handley, 2000).
- **Corrosión y agentes ambientales.** La humedad, el polvo metálico y los agentes químicos aceleran la corrosión en imanes de NdFeB si no cuentan con recubrimientos adecuados, reduciendo su desempeño.

En consecuencia, los valores de capacidad de carga declarados por los fabricantes deben considerarse como valores nominales bajo condiciones ideales, y siempre corregirse mediante factores de reducción definidos en normas como EN 13155, ASME B30.20 e ISO 13001-3, además de pruebas periódicas según IEC 60404. De esta manera, se garantiza que el sistema electropermanente opere con la seguridad estructural y funcional requerida en entornos industriales reales.

2.1.3. Fundamentos de sistemas de izaje

Los sistemas de izaje constituyen un conjunto de dispositivos y técnicas destinadas a levantar, desplazar y posicionar cargas en entornos industriales y de construcción. Estos sistemas son fundamentales en sectores como la minería, donde se requiere manipular elementos de gran peso y volumen con seguridad y eficiencia. Su diseño y operación involucran principios de la mecánica clásica, la resistencia de materiales y la teoría electromagnética en casos de izaje magnético. Además, debido al elevado riesgo que implican las maniobras de elevación, los sistemas de izaje están regulados por normativas internacionales que buscan garantizar la seguridad de los operadores, la estabilidad de las

cargas y la confiabilidad de los equipos en condiciones reales de trabajo. Comprender los fundamentos de estas operaciones resulta esencial para analizar el papel de los imanes electropermanentes como dispositivos de sujeción en sistemas de elevación.

Operaciones de izaje. Las operaciones de izaje comprenden todas aquellas maniobras destinadas a levantar, trasladar o posicionar una carga mediante equipos diseñados para tal fin, tales como grúas, polipastos, montacargas, puentes grúa y sistemas magnéticos de elevación. Según la ISO 9927-1:2013, estas operaciones requieren una planificación adecuada que contemple la naturaleza de la carga, el recorrido del izaje y los posibles riesgos en el entorno de trabajo (International Organization for Standardization, 2013).

De acuerdo con la ASME B30.5-2018, toda operación de izaje debe realizarse bajo procedimientos estandarizados que aseguren la estabilidad del equipo y la integridad de la carga, priorizando siempre la seguridad del operador y del personal circundante (American Society of Mechanical Engineers, 2018).

Carga de izaje. El concepto de carga de izaje hace referencia al peso total que debe ser manipulado durante la operación, el cual incluye no solo la masa de la carga principal, sino también accesorios de elevación, eslingas, ganchos y dispositivos de sujeción.

Según la norma EN 13155:2020, la carga de izaje debe calcularse considerando factores dinámicos asociados al movimiento, vibraciones, inclinaciones y posibles aceleraciones bruscas. Por ello, la carga máxima de utilización (CMU) o Working Load Limit (WLL) debe definirse con un factor de seguridad adecuado respecto a la carga de prueba o carga de rotura del dispositivo (European Committee for Standardization, 2020).

En complemento, la ASME BTH-1–2020 especifica los principios de diseño estructural de estos equipos, incluyendo factores de carga, coeficientes de seguridad y requisitos para el análisis de fatiga (American Society of Mechanical Engineers, 2020). Esta relación normativa asegura que los sistemas de izaje no solo se utilicen bajo condiciones seguras, sino que

también se conciben estructuralmente para soportar las cargas previstas en condiciones reales de trabajo.

Tipos de izaje en industria. Los sistemas de izaje en la industria pueden clasificarse en función de la tecnología utilizada y el tipo de carga a manipular:

Izaje mecánico. Operan mediante componentes mecánicos como engranajes, tornillos, poleas, cadenas o cables. En estos sistemas, la fuerza de rotación se convierte en movimiento lineal para elevar la carga. Son muy confiables, requieren menos mantenimiento de fluidos, y funcionan bien cuando la precisión y la durabilidad son críticas. Entre los equipos más comunes están los polipastos manuales o motorizados, gatos de tornillo, cabrestantes con poleas, etc.

Izaje hidráulico. Utilizan fluidos incomprensibles (aceite hidráulico) para transmitir presión y generar la fuerza necesaria para elevar la carga. Una bomba hidráulica presuriza el fluido, que actúa sobre un cilindro o pistón que mueve la carga. Este método permite movimientos suaves, gran fuerza y control fino de la posición. Entre las aplicaciones más comunes están las plataformas elevadoras, grúas móviles, por lo general sistemas donde se necesita manejar cargas pesadas con control preciso.

Izaje neumático. Emplean aire comprimido como medio de trabajo para generar fuerza. Aunque el aire es compresible, los sistemas modernos pueden lograr levantamientos rápidos y seguros para cargas ligeras o medianas. Son preferidos cuando se requiere rapidez, bajas vibraciones o ambientes limpios donde no se permiten fugas de fluidos. Se usan, por ejemplo, en líneas de ensamblaje automáticas, manipulación de chapas metálicas ligeras, manipuladores industriales.

Izaje magnético. Utilizan imanes (permanentes, electroimanes o electropermanentes) para sujetar y levantar piezas metálicas sin contacto físico con ganchos o mecanismos. Esto es especialmente útil para láminas, placas metálicas u objetos ferrosos con superficies lisas. La tecnología de izaje magnético permite operaciones rápidas, reduce el riesgo de daño a las

piezas, y puede liberar el objeto sin necesidad de mecanismos mecánicos adicionales. Los sistemas típicos integran módulos magnéticos que se activan y desactivan eléctricamente o mediante pulsos controlados. En configuraciones grandes se encuentran imanes múltiples acoplados en vigas de elevación.

La selección del tipo de izaje depende de factores como la geometría de la carga, la frecuencia de operación, el entorno de trabajo y la seguridad requerida.

Normas de seguridad. La seguridad en las operaciones de izaje está regulada por estándares internacionales que establecen requisitos de diseño, operación e inspección. Entre los más relevantes se encuentran:

ISO 9927-1:2013. Inspección de grúas, que establece los lineamientos para verificaciones periódicas y mantenimiento preventivo (International Organization for Standardization, 2013).

EN 13155:2020. Regulación para accesorios de elevación no fijos, incluyendo imanes de izaje, ganchos y ventosas, con exigencia de factores de seguridad en la capacidad de carga (European Committee for Standardization, 2020).

ASME B30 Series. Normas que regulan grúas, polipastos y dispositivos de izaje, incluyendo ASME B30.20-2021 para dispositivos de elevación bajo gancho y ASME B30.5-2018 para grúas móviles (American Society of Mechanical Engineers, 2025) (American Society of Mechanical Engineers, 2018).

ASME BTH-1–2020. Complementa la B30.20, proporcionando los criterios de diseño estructural de dispositivos de izaje bajo gancho, incluyendo factores de diseño, cálculos de fatiga y coeficientes de seguridad aplicables a cargas dinámicas y estáticas (American Society of Mechanical Engineers, 2020).

OSHA 1910.179. Regula el uso de puentes grúa y polipastos en instalaciones industriales, enfatizando la capacitación del operador y la inspección continua de los equipos (Occupational Safety and Health Administration, 2011).

El cumplimiento de estas normas no solo garantiza la integridad estructural de los equipos, sino también la reducción de riesgos laborales asociados a la caída de cargas, colisiones o fallas de sujeción. En conjunto, estas normas ofrecen un marco integral que abarca tanto la inspección y operación segura de los sistemas de izaje como el diseño estructural y funcional de sus componentes, lo que resulta fundamental para garantizar la confiabilidad y seguridad en entornos industriales.

2.1.4. Principios de cálculo estructural

El análisis estructural de sistemas metálicos destinados al izaje requiere una comprensión integral de los esfuerzos internos, las deformaciones, los criterios de falla y los métodos de unión. Estos principios permiten garantizar que la estructura soporte adecuadamente las cargas de operación, manteniendo la seguridad y confiabilidad exigida por normas internacionales como ASME y AISC.

Esfuerzos. Los esfuerzos son tensiones internas que aparecen en un material cuando es sometido a cargas externas. Los principales esfuerzos para relevantes en elementos estructurales de izaje son: axiales, de cortante, de flexión y de torsión.

Esfuerzo normal por carga axial

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (6)$$

Donde, P es la carga axial aplicada y A el área de la sección transversal (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazureck, 2015)

Esfuerzo cortante

$$\tau = \frac{V}{A} \quad (7)$$

Donde, V la fuerza cortante y A el área de la sección transversal (Gere & Goodno, 2012)

Esfuerzo por flexión en vigas

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} \quad (8)$$

Donde, M es el momento flector, c la distancia al eje neutro e I el momento de inercia (American Institute of Steel Construction, 2016)

Esfuerzo cortante en vigas

$$\tau = \frac{V \cdot Q}{I \cdot t} \quad (9)$$

Donde, V es la fuerza cortante, Q el primer momento de área, I el momento de inercia y t el ancho de la sección transversal.

Deformaciones. La deformación es un parámetro fundamental en el diseño de estructuras sometidas a carga, ya que incluso cuando los esfuerzos se mantienen dentro del rango elástico, una deformación excesiva puede afectar la precisión, estabilidad o funcionalidad del sistema.

Deformación unitaria

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (10)$$

En el rango elástico, esta relación se rige por la Ley de Hooke

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (11)$$

Donde, E es el módulo de elasticidad del material. Para el acero estructural laminado, se adopta típicamente:

$$E \approx 200 \text{ GPa}$$

Deformación por cortante

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (12)$$

Donde G es el módulo cortante, relacionado con el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson (ν) mediante:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (13)$$

Con $\nu \approx 0.30$ para aceros estructurales, resulta $G \approx 77$ GPa.

Criterio de Von Mises. Cuando los elementos estructurales están sometidos a esfuerzos combinados, se emplea el criterio de Von Mises, ampliamente aceptado en materiales dúctiles. Este define un esfuerzo equivalente σ_{eq} que permite evaluar la fluencia:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (14)$$

Donde, σ_1 , σ_2 y σ_3 son los esfuerzos principales (Budynas & Nisbett, 2015). Si σ_{eq} excede el límite de fluencia del material, se considera que la pieza falla.

Para una viga, suele tener la tensión normal a la sección y dos componentes relacionadas con el esfuerzo tangencial, donde el esfuerzo de Von Mises viene dado por la siguiente ecuación:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} \quad (15)$$

Donde σ es el esfuerzo normal por flexión y τ es el esfuerzo cortante.

Pandeo. El pandeo es un fenómeno de inestabilidad en columnas esbeltas sometidas a compresión. La carga crítica de Euler se expresa como:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot L)^2} \quad (16)$$

Donde, L es la longitud, I el momento de inercia y K el factor de longitud efectiva, dependiente de las condiciones de apoyo. El diseño estructural debe garantizar que las cargas aplicadas sean menores a la carga crítica.

La relación de esbeltez,

$$\lambda = \frac{K \cdot L}{r} \quad (17)$$

Donde, K es el factor de longitud efectiva (que depende de las condiciones de los extremos), L es la longitud de la columna y r es el radio de giro mínimo. Permite evaluar la susceptibilidad al pandeo

Factor de seguridad. El factor de seguridad (FS) se define como la relación entre la resistencia límite del material y el esfuerzo de servicio:

$$FS = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sigma_{trabajo}} \quad (18)$$

En estructuras de izaje, normas como ASME B30 establecen factores elevados $FS \geq 3$ para garantizar la integridad del sistema ante condiciones imprevistas.

En conclusión, los principios de cálculo estructural permiten garantizar la seguridad de sistemas metálicos aplicados a izaje, siendo fundamental la aplicación de esfuerzos y deformaciones, la verificación mediante el criterio de Von Mises y la estabilidad frente a pandeo.

2.1.5. Sistema motriz

El sistema motriz constituye el conjunto de elementos encargados de transformar la energía eléctrica en movimiento mecánico, garantizando el movimiento del sistema. Su correcto dimensionamiento resulta esencial para garantizar el desempeño, la confiabilidad y la seguridad estructural del equipo.

Potencia eléctrica. La potencia eléctrica corresponde a la energía suministrada al motor en un intervalo de tiempo y se expresa como:

$$P_e = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (19)$$

Donde, V es la tensión aplicada (Voltios), I la corriente consumida (Amperios) y $\cos \varphi$ el factor de potencia.

Este parámetro determina el consumo energético y la capacidad de alimentación requerida en la planta. La elección de motores de alta eficiencia energética (IE3 o IE4, según IEC 60034-30) permite reducir pérdidas y costos de operación (The International Electrotechnical Commission, 2014).

Potencia mecánica. La potencia mecánica corresponde a la tasa de trabajo útil que un sistema motriz entrega en su eje de salida. En otras palabras, es la fracción efectiva de energía transformada por el motor en forma de movimiento rotacional. Se expresa como:

$$P_m = \frac{T \cdot \omega}{9550 \cdot n} \quad (20)$$

Donde, T es el torque transmitido (N·m), n la eficiencia del sistema y ω la velocidad angular (RPM). Siendo el resultado P_m la potencia mecánica en (kW).

Estas expresiones permiten calcular de manera directa la potencia útil requerida o disponible en función de las condiciones de torque y velocidad de giro. Un dimensionamiento adecuado de la potencia asegura confiabilidad operativa, evita sobrecalentamientos del motor y prolonga la vida útil del sistema.

Eficiencia total. La eficiencia total de un sistema motriz se define como la relación entre la potencia mecánica útil disponible en el elemento de salida y la potencia de entrada suministrada al motor. Este parámetro no depende únicamente del rendimiento del motor eléctrico, sino también de las pérdidas que se generan en los mecanismos de transmisión intermedios.

Dichas pérdidas pueden originarse por:

- Fricción en rodamientos, que produce disipación de energía en forma de calor.
- Deslizamientos en correas o cables, que disminuyen la transferencia efectiva de potencia.

- Flexión de ejes o deformaciones elásticas, que reducen la rigidez del sistema y generan pérdidas adicionales.

Matemáticamente, la eficiencia total se expresa como el producto de los rendimientos parciales de cada etapa de transmisión:

$$\eta_{total} = \eta_{motor} \cdot \eta_{acople} \cdot \eta_{transmisión} \cdot \eta_{rodamientos} \quad (21)$$

Donde, η_{motor} es la eficiencia del motor, η_{acople} es la eficiencia de acoples o conexiones, $\eta_{transmisión}$ es la eficiencia de engranajes, correas, poleas o cables y $\eta_{rodamientos}$ es la eficiencia asociada a los apoyos y rodamientos.

Un alto valor de eficiencia global se traduce en menores pérdidas energéticas, reducción de sobrecalentamientos y disminución de esfuerzos adicionales en los componentes estructurales, lo que prolonga la vida útil del sistema y mejora su confiabilidad operativa.

Torque de arranque. El torque de arranque es el momento de fuerza inicial que debe generar un motor para poner en movimiento un sistema mecánico en reposo. Este parámetro es crítico porque, en condiciones de arranque, se deben vencer resistencias adicionales como la fricción estática, la inercia de los componentes y las cargas aplicadas sobre el mecanismo.

Mecánicamente, el torque requerido se relaciona con la fuerza de arrastre y el radio efectivo de la transmisión mediante la siguiente expresión:

$$T_r = F \cdot r \quad (22)$$

Donde, F es la fuerza (N) y r el radio efectivo del sistema de transmisión (polea, engranaje o piñón) en (m). El resultado T_r Torque de arranque en (N.m).

En términos prácticos, un diseño adecuado debe garantizar que el torque de arranque del motor supere al torque resistente del sistema, considerando además un factor de seguridad que cubra sobrecargas momentáneas o condiciones de operación no previstas.

Transmisión de potencia. La transmisión de potencia es el conjunto de mecanismos que permiten transferir energía mecánica desde una fuente de generación, generalmente un motor, hacia un sistema receptor que realiza un trabajo útil. Su objetivo principal es adaptar la magnitud de la fuerza, el par o la velocidad a las necesidades del proceso, asegurando eficiencia, durabilidad y seguridad en el funcionamiento de las máquinas.

De manera general, los sistemas de transmisión pueden clasificarse en:

Reductores de velocidad. Dispositivos que transforman altas velocidades de giro en pares mayores, adecuados para vencer resistencias mecánicas elevadas. Se basan en engranajes y permiten obtener relaciones de reducción precisas y estables.

Acoples flexibles. Elementos que conectan dos ejes, compensando desalineaciones y reduciendo vibraciones. Son ampliamente utilizados para proteger rodamientos y evitar la transmisión directa de impactos dinámicos.

Sistemas de poleas y cables. Empleados cuando se requiere transmitir movimiento a distancias mayores o realizar trayectorias lineales. Los cables de acero enrollados en poleas o tambores constituyen una alternativa eficiente, caracterizada por:

- Alta resistencia a la tracción.
- Flexibilidad para adaptarse a cambios de dirección.
- Capacidad de amortiguar cargas dinámicas.
- Necesidad de lubricación y mantenimiento preventivo para evitar fatiga y corrosión.

La correcta selección de un sistema de transmisión de potencia depende de factores como la magnitud de la carga, la velocidad de operación, la distancia de transmisión y las condiciones ambientales. En todos los casos, se busca garantizar un equilibrio entre eficiencia, seguridad y vida útil de los componentes.

Derrateo y condiciones operativas. El derrateo es la reducción intencional de la potencia nominal de un motor para garantizar un funcionamiento confiable bajo condiciones distintas a las especificadas en su diseño de fábrica (Chapman, 2012). Este fenómeno es fundamental en aplicaciones industriales, donde el ambiente y el régimen de trabajo pueden afectar la capacidad de disipación térmica y la resistencia de los componentes.

Entre los principales factores que provocan derrateo se encuentran:

Temperatura ambiente elevada. A mayor temperatura, disminuye el gradiente térmico entre el motor y el medio, limitando la disipación de calor y aumentando el riesgo de sobrecalentamiento (National Electrical Manufacturers Association, 2014).

Altitud geográfica. En elevaciones superiores a los 1000 m s.n.m., la densidad del aire disminuye, reduciendo la capacidad de refrigeración por convección (International Electrotechnical Commission, 2019).

Variaciones en el régimen de carga. los ciclos repetitivos de arranque, frenado o inversión de giro generan esfuerzos adicionales que aceleran la fatiga en los componentes mecánicos (Chapman, 2012).

Contaminación ambiental. la presencia de polvo, humedad o agentes corrosivos puede afectar la lubricación y el aislamiento, provocando pérdidas adicionales (Budynas & Nisbett, 2015)

El derrateo se aplica mediante factores de corrección proporcionados por los fabricantes o calculados en función de normas técnicas, como las establecidas por NEMA o IEC. Estos factores ajustan la potencia disponible en función de las condiciones reales de operación:

$$P_{ef} = P_{nom} \cdot f_{corr} \quad (23)$$

Donde, P_{ef} es la potencia efectiva del motor bajo condiciones reales, P_{nom} es la potencia nominal asignada por el fabricante, f_{corr} es el factor de corrección (< 1) dependiente de la condición ambiental u operativa.

Un diseño mecánico seguro debe considerar estas reducciones, de modo que la selección del sistema motriz asegure la durabilidad, confiabilidad y eficiencia en servicio.

Integración con control y seguridad. En los sistemas motrices modernos, la integración de dispositivos de control electrónico y elementos de seguridad resulta esencial para garantizar un funcionamiento eficiente y confiable. El uso de variadores de frecuencia (VFD) constituye una de las soluciones más extendidas en aplicaciones industriales, debido a que permite:

- Arranques y paradas suaves, reduciendo los picos de torque y la fatiga en los componentes mecánicos.
- Regulación continua de velocidad, adaptando la potencia entregada a las condiciones de carga del sistema.
- Protección frente a sobrecargas eléctricas y mecánicas, disminuyendo el riesgo de fallas prematuras.
- Optimización energética, al ajustar el consumo de acuerdo con la demanda real.

De forma complementaria, los sistemas de frenado magnético y frenos mecánicos se utilizan para garantizar una detención controlada y rápida en caso de emergencia, evitando desplazamientos no deseados y reduciendo riesgos para el operador. Asimismo, la incorporación de topes de seguridad, sensores de límite y enclavamientos asegura la estabilidad de los mecanismos en condiciones críticas y evita accidentes durante la operación.

En conjunto, la integración de control electrónico con sistemas de seguridad mecánica permite alcanzar un balance entre eficiencia operativa, confiabilidad y protección del personal, constituyendo un principio fundamental en el diseño de sistemas motrices industriales.

2.2. Marco conceptual

Filtración

Proceso físico de separación de sólidos suspendidos en un fluido al hacerlo pasar por un medio poroso que retiene partículas.

Tela filtrante

Medio poroso utilizado en filtros prensa, fabricado en fibras sintéticas o naturales, cuya permeabilidad y resistencia determinan la eficiencia de la separación sólido-líquido.

Torta filtrada

Capa de sólidos retenidos por la tela filtrante durante el proceso de filtración.

Histéresis magnética

Pérdida energética y fenómeno de retención de magnetización en materiales ferromagnéticos después de retirar el campo externo.

Coercividad

Intensidad de campo magnético necesaria para reducir a cero la magnetización remanente en un material.

Coeficiente de seguridad

Relación entre la resistencia máxima de un material y la carga aplicada, utilizado para garantizar márgenes frente a fallas.

Tensión admisible

Valor de esfuerzo máximo que puede soportar un material en condiciones de servicio, definido con base en normas y factores de seguridad.

Momento flector

Esfuerzo interno que tiende a producir flexión en un elemento estructural al aplicarse una carga transversal.

Torque

Momento que ejerce una fuerza para producir rotación en torno a un eje.

Ergonomía industrial

Disciplina que estudia la interacción entre operarios y máquinas para mejorar seguridad, eficiencia y confort en la operación.

Limite carga de trabajo

Este es el peso máximo que un equipo está diseñado para levantar o soportar de forma segura y lo especifica el fabricante.

CAPÍTULO III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1. Datos técnicos de filtro prensa

El presente apartado detalla las características técnicas del filtro prensa sobre el cual se desarrollará el sistema extractor de placas. Estos parámetros son fundamentales para establecer las condiciones de diseño estructural, electromecánico y dimensionamiento de los componentes principales. Asimismo, permiten determinar la distribución de cargas actuantes y la configuración geométrica del sistema propuesto.

El filtro prensa considerado en el estudio es de tipo minero, empleado en procesos de separación sólido-líquido. Está compuesto por un conjunto de placas filtrantes rígidas dispuestas en paralelo, sujetas por un bastidor metálico que permite el cierre y la compresión del paquete de placas mediante un sistema hidráulico.

Tabla 3:

Características generales de Filtro Prensa considerado en el estudio

Característica	Valor
Modelo	CMFPC/30/2000/50/4920
Año de fabricación	2025
Ubicación	4600 M.S.N.M.
Cantidad de cámaras	36

Nota. Información técnica del fabricante.

El desempeño del filtro prensa depende de las características fisicoquímicas del material tratado. En este caso, el proceso corresponde a la filtración de concentrado de zinc (Zn) en pulpa, cuyas propiedades determinan los requerimientos de presión, temperatura y capacidad de procesamiento del sistema. En la Tabla 3 se detallan los principales parámetros operacionales del proceso de filtrado.

Tabla 4:*Parámetros de operación de filtro prensa considerado en el estudio*

Parámetro	Valor	Unidad
Tipo de producto	Concentrado de Zinc	-
Espesor de torta	50	mm
Producción diaria	700	tms/día
Tiempo efectivo de filtrado	16	h/día
Humedad residual en tortas	8	%
Densidad de la pulpa	1960	g/L
Densidad aparente de torta	2.6	kg/L
Presión de alimentación	9-10	bar
Presión de aire de secado	8	bar
Temperatura de trabajo	5-20	°C
Presión de diseño	16	bar

Nota. Información técnica del fabricante.

Para la obtención de información relevante para el sistema extractor se tiene la siguiente tabla de características principales de las placas rígidas que se requieren izar.

Tabla 5:*Características de placas filtrantes*

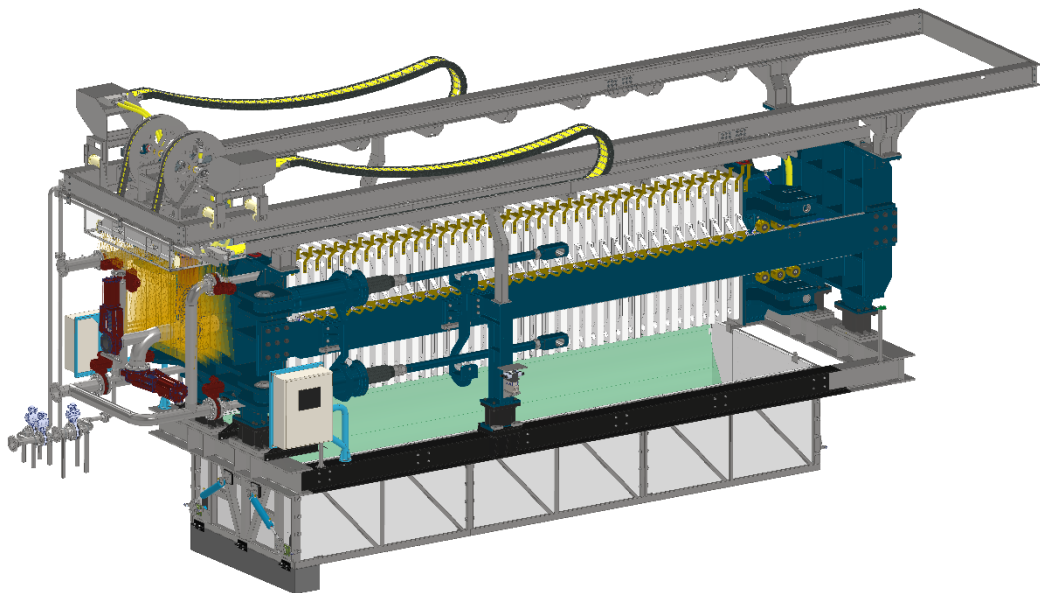
Parámetro	Valor	Unidad
Tipo de placa	Placa rígida	-
Dimensiones de placas	2000x2000	mm
Material	Polipropileno	mm
Espesor	100	mm

Nota. Información técnica del fabricante.

Los valores obtenidos en las tablas anteriores permiten definir las condiciones reales de trabajo del filtro prensa y las magnitudes de carga que intervienen en su funcionamiento. Estos datos serán empleados en los cálculos posteriores del sistema motriz, la estructura metálica y el análisis de esfuerzos, garantizando que el diseño final cumpla con los requisitos de seguridad, eficiencia y confiabilidad del proceso de filtrado.

Figura 9:

Filtro Prensa 2000x2000-36



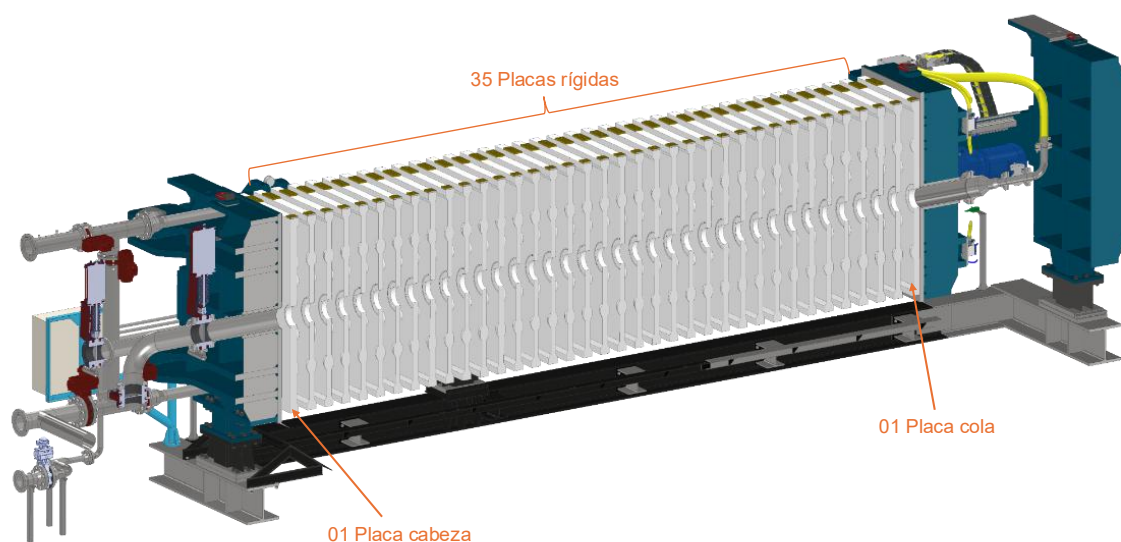
Nota. Elaboración propia.

3.2. Determinación de carga de izaje

El elemento de izaje es la placa filtrante del filtro prensa, el cual presenta 3 variaciones; placa rígida, placa cabeza y placa cola. El filtro prensa CMFPC/30/2000/50/4920 presenta una placa cabeza ubicada al inicio junto a la placa válvulas, una placa cola ubicada al final junto a la placa móvil y 35 placas rígidas ubicadas entre las dos primeras placas mencionadas. Todas estas 37 placas en conjunto permiten formar las 36 cámaras del filtro prensa para su posterior formación de 36 tortas deshidratadas.

Figura 10:

Identificación de las 37 placas filtrantes en Filtro Prensa 2000x2000-36



Nota: Elaboración propia

Para la elección del elemento de izaje más crítico se tienen la cantidad de elementos que presenta cada una de las placas filtrantes en la tabla 5.

Tabla 6:

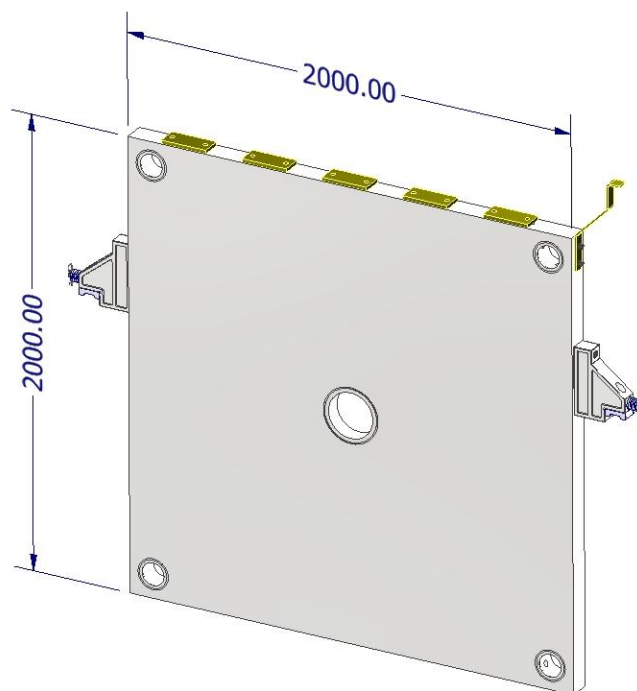
Cantidad de partes que componen las placas filtrantes

Partes	Placa cabeza	Placa rígida	Placa cola
Placa cuerpo	1	1	1
Handle	2	2	2
Anillo distribuidor	1	2	1
Antena detección	1	1	1
Tela filtrante	1	2	1
Placa detección magnética	5	5	5

Nota: Elaboración propia

Figura 11:

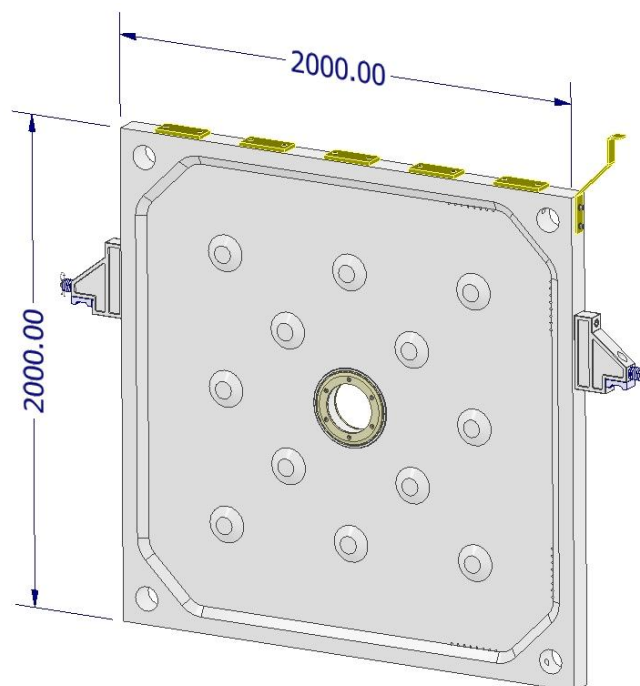
Despiece de partes de placa cabeza



Nota: Elaboración propia

Figura 12:

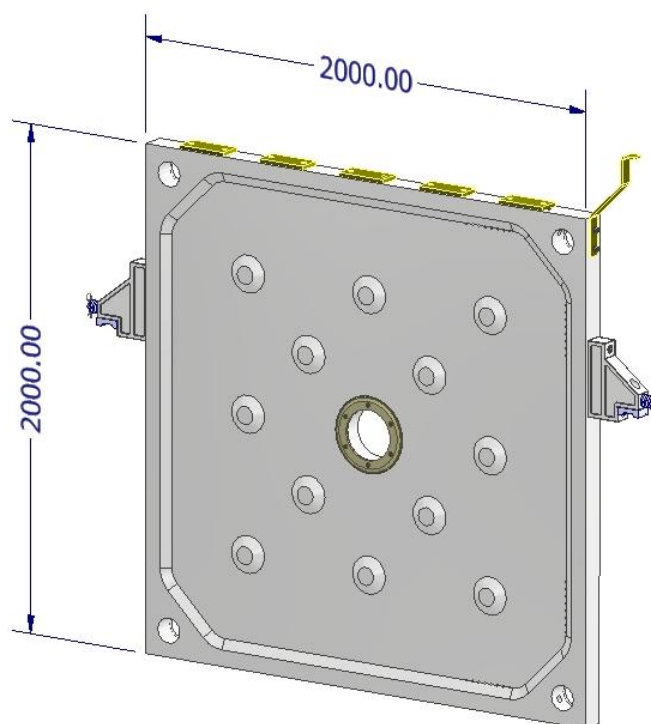
Despiece de partes de placa rígida



Nota: Elaboración propia

Figura 13:

Despiece de partes de placa cola



Nota: Elaboración propia

Para la fabricación de las placas filtrantes se realizó un modelo 3D de estas placas filtrantes, con lo cual se tiene las masas cada una de las partes anteriormente mencionadas las cuales se presentan en la siguiente tabla 7.

Tabla 7:

Cuadro de masas de placas filtrantes

Placa filtrante	Masa [kg]
Placa cabeza	290
Placa rígida	250
Placa cola	290

Nota: Elaboración propia

Con ello se determina que la máxima carga de izaje es de 290kg

3.3. Determinación de sistema de izaje

Para la determinación del mejor sistema de izaje se realizó una matriz de Pugh en base a tres alternativas propuestas. Las alternativas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 8:

Cuadro de alternativas de sistemas de izaje

Alternativa	Título	Descripción
A1	Gancho mecánico + eslingas	Sistema combinado: eslingas textiles sujetadas con ganchos metálicos articulados que se acoplan al handle de la placa para izado.
A2	Electroimán	Imán electromagnético convencional que requiere corriente continua/alternada para mantener la sujeción durante la operación (consumo continuo).
A3	Imán electropermanente	Imán que se activa/desactiva eléctricamente, pero mantiene fuerza magnética sin consumo continuo.

Nota: Elaboración propia

La tabla 9 se le conoce como matriz de Pugh, se consideran los siguientes puntajes para la evaluación: +1 (mejora), 0 (igual) y -1 (no mejora), los cuales se multiplicarán a los pesos de cada criterio de indicadores.

Tabla 9:
Matriz Pugh

Criterio	Peso	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
		Evaluación	Multipliación	Evaluación	Multipliación	Evaluación	Multipliación
Capacidad de carga	3	0	0	+1	3	+1	3
Seguridad de operador	5	-1	-5	-1	-5	+1	5
Tiempo de operación	3	-1	-3	+1	3	+1	3
Fiabilidad	2	0	0	0	0	+1	2
Costo de fabricación	2	+1	2	-1	-2	-1	-2
Consumo energético	2	+1	2	-1	-2	+1	2
Compatibilidad estructural	2	+1	2	+1	2	+1	2
Ergonomía	3	-1	-3	+1	3	+1	3
Compatibilidad automatización	2	-1	-2	+1	2	+1	2
Total		-	-7	-	4	-	20
Ranking		3°		2°		1°	

Nota: Elaboración propia

El análisis comparativo entre las tres alternativas de sistemas de izaje permitió evaluar su desempeño en función de criterios técnicos, operativos y de seguridad, ponderados según su importancia relativa para la aplicación en el sistema extractor de placas del filtro prensa.

Los resultados muestran que la alternativa A3, basada en un imán electropermanente, obtuvo el mayor puntaje ponderado total (+20), superando ampliamente a las opciones restantes. Este resultado se debe principalmente a su mayor nivel de seguridad operativa, su bajo consumo energético y su alta fiabilidad frente a fallos eléctricos, ya que el sistema mantiene la atracción magnética incluso ante interrupciones de energía. Además, presenta ventajas en ergonomía y compatibilidad estructural, reduciendo el esfuerzo físico del operador y simplificando la integración con el carro desplazable del extractor de placas.

La alternativa A2 alcanzó una puntuación intermedia (+4). Si bien mejora la velocidad de operación y facilita la automatización, su dependencia energética continua y la necesidad de mantenimiento periódico disminuyen su competitividad. Finalmente, la alternativa A1 obtuvo la menor puntuación (-7), debido a su baja seguridad, tiempos de operación prolongados y alta exigencia ergonómica, factores que la hacen poco adecuada para operaciones frecuentes y mucho menos automatizadas.

Como resultado, se adoptó el sistema de imán electropermanente como base para el desarrollo del extractor de placas, implementando posteriormente un análisis detallado de dimensionamiento magnético, requerimientos eléctricos, y validación estructural mediante simulación.

3.4. Cálculo y selección de imán electropermanente

3.4.1. Descripción de análisis

En esta sección se desarrolla el cálculo y la selección del sistema de izaje magnético que permitirá la sujeción y extracción de las placas filtrantes del filtro prensa. Se analizan las características del imán electropermanente requerido en función de la carga

total a elevar, las condiciones operativas, los factores de seguridad y las recomendaciones del fabricante de imanes determinado.

3.4.2. *Parámetros de diseño*

Se establecen los siguientes parámetros como base del cálculo de esta sección.

Parámetro	Símbolo	Unidad
Masa de placa filtrante	W_p	kg
Factor de corrección	FC	-
Carga de izaje total	W_t	kg
Factor de seguridad	FS	-
Límite carga de trabajo total de imanes	SWL_t	kg
Límite carga de trabajo imán	SWL_i	kg
Límite carga de trabajo efectiva imán	SWL_{efe}	kg
Factor de rendimiento efectivo	FR	-
Espacio de aire efectivo	GAP	mm
Factor de agarre	$GRIP$	-
Cantidad de imanes	n	-

Nota: Elaboración propia

3.4.3. *Determinación de carga y selección de imán*

Se calcula la carga de izaje total, se tiene como dato de la sección anterior la masa de la placa filtrante y se aplica un factor de corrección debido a la posibilidad de mantener restos de torta en la placa filtrante.

$$W_p = 290 \text{ kg} ; FC = 1.2$$

$$W_t = W_p * FC \quad (24)$$

Reemplazando los datos en la ecuación (23),

$$W_t = 290 \cdot 1.2 = 348 \text{ kg}$$

Para la selección del imán se tomó en consideración la utilización de un imán electropermanente de la marca Eclipse Magnet, específicamente un imán de la serie Optimag-E, capaces de ser activados o desactivados electrónicamente.

Para poder determinar el modelo del imán, es necesario calcular la carga límite de trabajo del imán. Por motivos de disposición dimensional, se toma en consideración el uso de 5 imanes del modelo a elegir, para una adecuada distribución de carga en la longitud de dos metros de ancho de la placa filtrante.

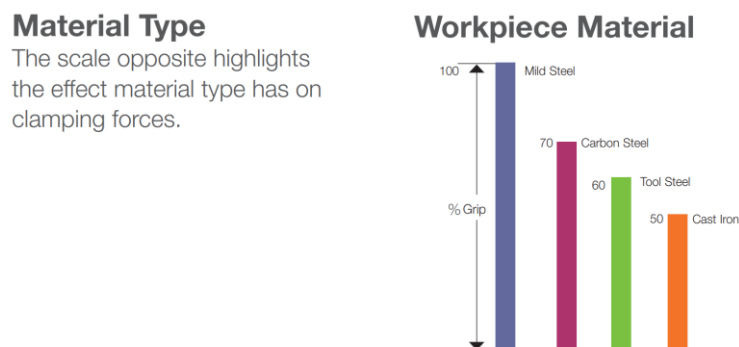
$$n = 5$$

Según información del fabricante, para poder determinar la carga de trabajo efectiva del imán se toma en consideración el factor de rendimiento del imán y factor de agarre.

Al ser un sistema que requiere de un material ferromagnético con alta permeabilidad magnética, por ello, es necesario adaptar una plancha de acero a la superficie superior de las placas filtrantes, este según recomendación del fabricante debe ser de al menos 10mm, por lo cual se escoge una plancha de Acero ASTM A36 de 12mm de espesor y dimensiones necesarias para el tamaño del imán elegido.

Figura 14:

Factor de agarre de imán



Nota: El diagrama indica el efecto que tiene el tipo de material a izar sobre la fuerza de sujeción del imán (Eclipse Magnetics, 2014).

Al ser la placa de sujeción de acero ASTM A36, este se considera menor al de un acero dulce, por ende, para métodos de estimación se considera un promedio entre esta categoría y la inmediata inferior:

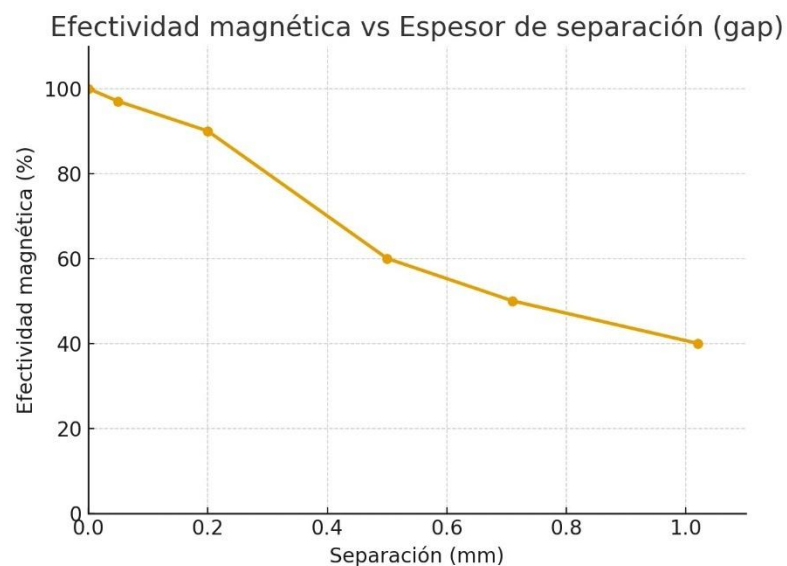
$$GRIP = 0.95$$

El filtro prensa cuenta con un sistema de lavado en cada ciclo, por ello, es importante que la placa de sujeción tenga una protección anticorrosiva, por este motivo, se considera un tratamiento superficial de tropicalizado, considerando como máximo 0.1mm de capa de protección.

$$GAP = 0.1 \text{ mm}$$

Figura 15:

Efectividad magnética vs espesor de separación para aceros dulces



Nota: El diagrama muestra la relación existente entre el espacio intermedio entre el imán y la carga y el rendimiento del imán. A medida que aumenta el espacio de aire, disminuye el rendimiento magnético. (Eclipse Magnetics, 2014).

Según la figura 8, es posible determinar el factor de rendimiento,

$$FR = 0.9$$

Con los valores obtenidos, es posible determinar la carga límite de trabajo del imán efectiva con la siguiente fórmula:

$$SWL_{efe} = SWL_i \cdot GRIP \cdot FR \quad (25)$$

$$SWL_{efe} = SWL_i \cdot 0.95 \cdot 0.9$$

$$SWL_i = 1.1696 \cdot SWL_{efe} \quad (26)$$

La cantidad de imanes necesaria está dada por la siguiente ecuación:

$$n = \frac{SWL_t}{SWL_{efe}} \quad (27)$$

Reemplazando el valor de n en la ecuación (26)

$$SWL_{efe} = \frac{SWL_t}{5}$$

Entonces, al insertar la ecuación (26) en (25):

$$SWL_i = 1.1696 \cdot \frac{SWL_t}{5}$$

$$SWL_t = 4.275 \cdot SWL_i \quad (28)$$

Según ASME B30.20 para sistemas de izaje magnéticos el factor de seguridad mínimo debe ser 3:1 en levantamientos verticales.

$$FS \geq 3$$

Se calcula la carga límite de trabajo del imán,

$$FS = \frac{SWL_t}{W_t} \quad (29)$$

$$\frac{4.275 \cdot SWL_i}{348} \geq 3$$

$$SWL_i \geq 244.2 \text{ kg}$$

Finalmente, es posible seleccionar el modelo de imán que se requieren como mínimo para satisfacer el factor de seguridad requerido en el sistema. Según el Anexo A, el modelo seleccionado es el ESPM125C, cuya carga límite de trabajo es 250 kg, por lo tanto, se tendría un factor de seguridad de 3.07.

3.4.4. Justificación de la selección del modelo

Tras el análisis de carga, factor de seguridad y condiciones superficiales, el modelo ESPM125C cumple con los requerimientos del sistema extractor de placas, garantizando una sujeción segura y eficiente. Su tecnología electropermanente permite mantener la fuerza de atracción sin consumo energético continuo, ofreciendo ventajas significativas en seguridad, ahorro energético y durabilidad frente a los electroimanes convencionales. Además, según información del fabricante, la manufactura de estos imanes considera un factor de seguridad 3:1 respecto a la carga límite de trabajo indicada en su catálogo.

Adicionalmente, su peso y dimensiones permiten integrarlo estructuralmente al carro extractor sin comprometer la estabilidad del bastidor ni el centro de gravedad del conjunto.

3.4.5. Conclusión del cálculo

Se selecciona el imán electropermanente modelo ESPM125C, con una carga segura de trabajo y un factor de seguridad de 3:1, conforme a la norma ASME B30.20 como carga de diseño.

El diseño estructural del extractor considera la instalación de cinco unidades ESPM125C para cubrir la carga total de una placa filtrante de 2 m × 2 m, garantizando una operación segura, eficiente y energéticamente sostenible.

3.5. Cálculo de estructuras metálicas

El diseño estructural del sistema extractor requiere asegurar que los elementos metálicos que lo conforman soporten las solicitaciones generadas durante el izaje, el desplazamiento y la manipulación de las placas filtrantes. Para ello, se evalúan los esfuerzos principales a los que estarán sometidos los perfiles estructurales, considerando condiciones

de operación estática y dinámica. Además, se verifica la estabilidad frente a pandeo, las deformaciones máximas admisibles y la resistencia de las uniones soldadas y atornilladas, siguiendo los lineamientos establecidos por normas como AISC 360, ASME B30.20 y AWS D1.1. La finalidad de este cálculo es garantizar que la estructura operará de manera segura, confiable y con la rigidez necesaria para evitar desplazamientos no deseados durante la operación.

3.5.1. Cálculo estructural de yugo de izaje

El yugo de izaje constituye el elemento principal de soporte del imán electropermanente y, por tanto, es responsable de transmitir la carga levantada hacia la estructura del carro extractor. Su diseño debe garantizar la resistencia frente a flexión, cortante y carga axial, así como una adecuada rigidez para evitar deformaciones que afecten la alineación del imán con la placa filtrante. En este apartado se determinan las cargas actuantes, se establece el modelo de análisis estructural y se calculan los esfuerzos y desplazamientos en los perfiles seleccionados, verificando su cumplimiento con los criterios de seguridad establecidos para equipos de elevación industrial.

Definición del sistema estructural. El perfil adoptado corresponde a una sección rectangular de 100 mm × 150 mm, con espesor de pared de 4 mm, fabricado según la norma ASTM A500 Grado A, que especifica requisitos de producción, resistencia mecánica y tolerancias dimensionales para tubos estructurales formados en frío destinados a aplicaciones estructurales.

La tabla siguiente presenta las principales propiedades del perfil seleccionado, considerando la base de datos estándar para secciones tubulares estructurales:

Tabla 10:

Propiedades del tubo estructural ASTM A500 Grado A (100x150x4.0)

Parámetro	Valor	Unidad
Alto	150	mm

Ancho	100	mm
Espesor	4	mm
Área de sección transversal	18.95	cm ²
Momento de inercia respecto al eje mayor [I_x]	595	cm ⁴
Momento de inercia respecto al eje menor [I_y]	319	cm ⁴
Módulo resistente elástico eje mayor [S_x]	79.3	cm ³
Módulo resistente elástico eje menor [S_y]	63.7	cm ³
Densidad	7850	kg/m ³
Límite de fluencia	230	MPa
Resistencia última	400	MPa
Módulo de elasticidad	200	GPa

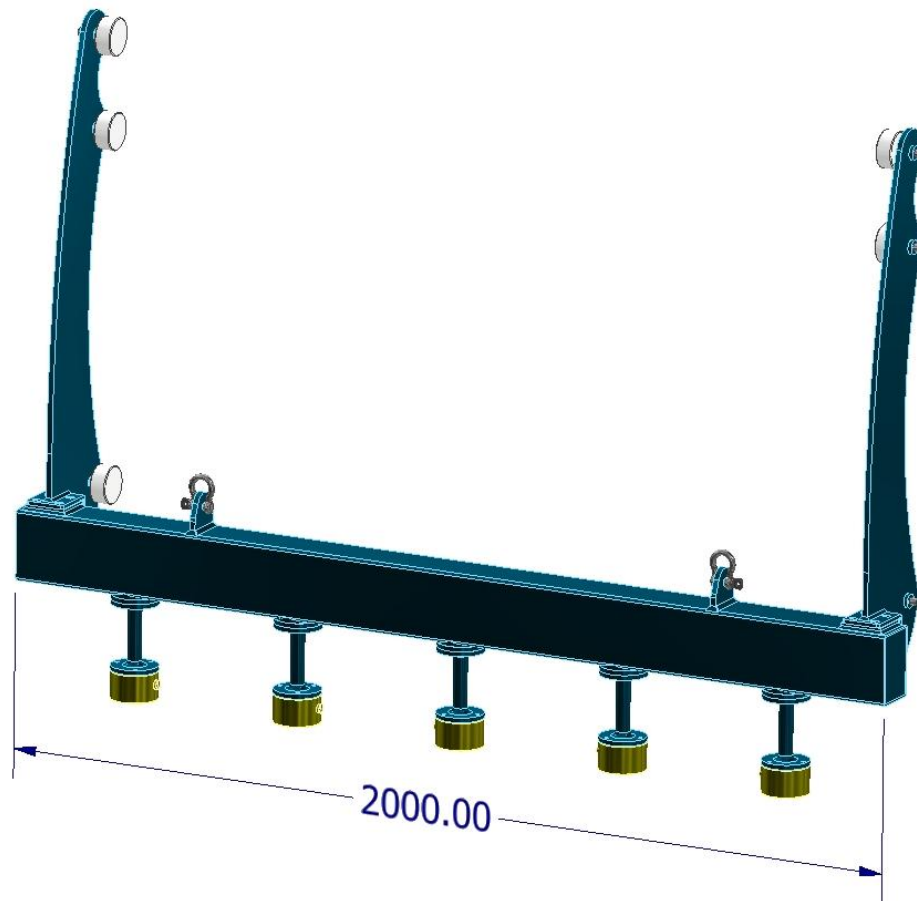
Nota. Los valores geométricos corresponden a perfiles formados en frío especificados bajo la norma ASTM A500/A500M. Las propiedades mecánicas corresponden a los valores mínimos garantizados por la especificación del material. Para efectos de cálculo estructural, se consideran estas propiedades como base de verificación (American Society for Testing and Materials, 2023)

El uso de un perfil tubular rectangular proporciona una relación favorable entre rigidez a flexión y peso propio, lo cual resulta ventajoso en sistemas móviles y repetitivos como el extractor de placas. En las secciones siguientes se presentan los cálculos de esfuerzos, deformaciones y verificación estructural del yugo bajo las cargas de operación.

Para una mejor visualización del elemento estructural seleccionado, a continuación, se presenta el modelo tridimensional del yugo de izaje y la ubicación del imán electropermanente en el sistema. Esta figura permite identificar su forma y la manera en que se integra dentro del extractor.

Figura 16:

Modelo 3D de yugo de izaje



Nota: Elaboración propia

Determinación de cargas. Para el cálculo estructural del yugo de izaje, es necesario determinar la carga total que será soportada durante la operación. Esta carga corresponde a la suma del peso de la placa filtrante, el peso del imán electropermanente y el soporte intermedio que une el imán y el yugo. Adicionalmente, se considera un factor dinámico para representar los efectos del movimiento durante la extracción, según las recomendaciones de ASME B30.20 para sistemas de izaje de carga suspendida.

A continuación, se presenta la tabla de parámetros considerados para la determinación de la carga total de diseño:

Tabla 11:*Parámetros de diseño de yugo de izaje*

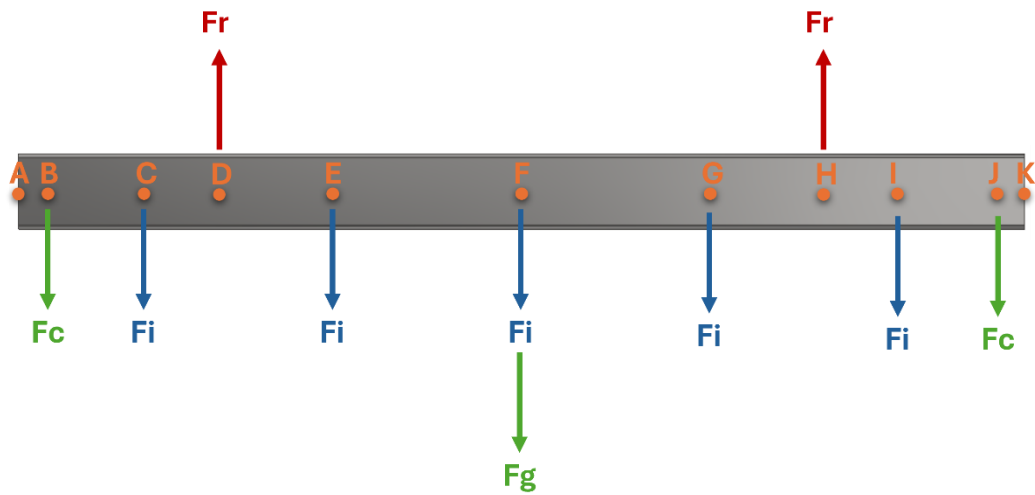
Parámetro	Símbolo	Unidad
Masa de placa filtrante	W_p	kg
Masa de imán	W_i	kg
Masa de soporte de imán	W_s	kg
Masa de carro guiador	W_c	kg
Masa de estructura de yugo	W_y	kg
Cantidad de imanes	n	-
Gravedad	g	m/s ²
Factor dinámico	FD	-
Peso yugo	F_g	N
Peso distribuido de carga de izaje	F_i	N
Peso de carro guiador	F_c	N
Fuerza de reacción en oreja de izaje	F_r	N

Nota: Elaboración propia

Modelo de análisis estructural. Para el análisis estructural del yugo se considera su comportamiento como una viga colgante, es decir, un elemento que recibe cargas puntuales en los puntos donde se fijan los imanes electropermanentes y que transmite dichas cargas hacia los soportes laterales del sistema extractor. El análisis se realiza considerando el peso propio del yugo y la carga total de diseño aplicada por los imanes, obtenida previamente en la determinación de cargas. Con estos valores se construye el diagrama de cuerpo libre (DCL), que permite identificar las reacciones en los puntos de soporte, así como determinar los esfuerzos internos de cortante y momento flector para las verificaciones posteriores de resistencia y deformación.

Figura 17:

Diagrama de cuerpo libre de yugo



Nota: Elaboración propia

Las dimensiones se muestran en la tabla 13.

Se determinan los valores mostrados en DCL:

El peso del yugo se calcula mediante,

$$F_g = W_y \cdot g \quad (30)$$

Según el modelo 3D, la masa de la estructura del yugo es la siguiente:

$$W_y = 35 \text{ kg}$$

Por lo tanto, reemplazando en (29):

$$F_g = 343.4 \text{ N}$$

El peso del carro guiador se calcula mediante,

$$F_c = W_c \cdot g \quad (31)$$

Según el modelo 3D, la masa del carro guiador es la siguiente:

$$W_c = 10 \text{ kg}$$

Por lo tanto, reemplazando en (30):

$$F_c = 98.1 \text{ N}$$

El peso distribuido de carga de izaje se calcula mediante,

$$F_i = \frac{(W_p + W_i + W_s) \cdot g \cdot FD}{n} \quad (32)$$

Según el modelo 3D, el Anexo A y los valores presentados en secciones anteriores,

$$W_p = 290 \text{ kg}$$

$$W_i = 5.7 \text{ kg}$$

$$W_s = 5 \text{ kg}$$

$$n = 5$$

Además, la inclusión del factor dinámico considera el movimiento durante la extracción. Para operaciones controladas se adopta $FD = 1.10$; en condiciones con mayor variabilidad, $FD = 1.25$ según ASME B30.20. Se opta por usar el mayor valor.

Por lo tanto, reemplazando los valores en (31):

$$F_i = 737.5 \text{ N}$$

Con los valores mostrados es posible determinar la fuerza de reacción en la oreja de izaje, considerando el cuerpo en reposo y según el DCL,

$$2 \cdot F_r = 2 \cdot F_c + 5 \cdot F_i + F_g \quad (33)$$

Reemplazando los valores hallados en (32):

$$2 \cdot F_r = 2 \cdot 98.1 + 5 \cdot 737.5 + 343.4$$

Se determina la fuerza de reacción en las orejas de izaje.

$$F_r = 2113.5 \text{ N}$$

Adicionalmente, se muestran las longitudes de los tramos en el DCL:

Tabla 12:

Longitudes de tramos en yugo de izaje

Tramo	Longitud	Unidad
A - B	6	cm
A - C	25	cm
A - D	40	cm
A - E	62.5	cm
A - F	100	cm
A - G	137.5	cm
A - H	160	cm
A - I	175	cm
A - J	194	cm
A - K	200	cm

Nota: Elaboración propia

Diagrama de fuerza cortante y momento flector. El análisis de los esfuerzos internos se realiza mediante el método de secciones, dividiendo el tubo en tramos definidos entre los puntos de aplicación de carga. Para cada segmento se aplica el equilibrio estático, obteniendo expresiones para el cortante $V(x)$ y el momento flector $M(x)$, lo cual permite construir sus respectivos diagramas.

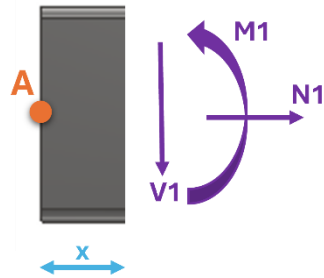
↓ V : Fuerza cortante en la sección, a lo largo del eje y.

→ N : Esfuerzo normal en la sección, a lo largo del eje x.

↺ M : Momento flector en la sección.

Sección 1: Dentro de tramo A-B

$$0 < x < 0.06 \text{ m}$$



Al no tener cargas esta sección:

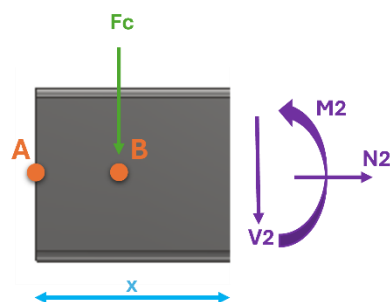
$$V_1 = 0$$

$$N_1 = 0$$

$$M_1 = 0$$

Sección 2: Dentro de tramo B-C

$$0.06 \text{ m} < x < 0.25 \text{ m}$$



Donde,

$$\sum F_y = 0$$

$$-V_2 - F_c = 0$$

$$V_2 = -F_c \quad (34)$$

$$N_2 = 0$$

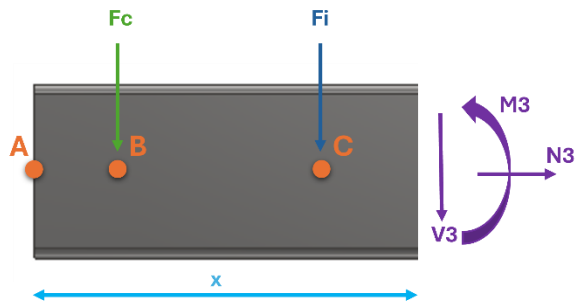
$$\sum M_U = 0$$

$$-M_2 - F_c \cdot (x - 0.06) = 0$$

$$M_2 = -F_c \cdot x + 0.06 \cdot F_c \quad (35)$$

Sección 3: Dentro de tramo C-D

$$0.25 \text{ m} < x < 0.4 \text{ m}$$



Donde,

$$\sum F_y = 0$$

$$-V_3 - F_c - F_i = 0$$

$$V_3 = -F_c - F_i \quad (36)$$

$$N_3 = 0$$

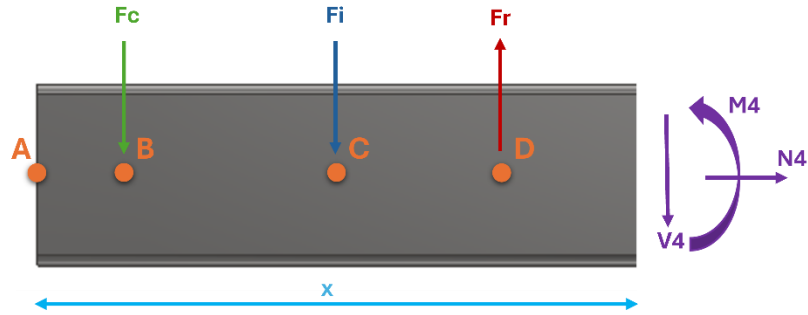
$$\sum M_U = 0$$

$$-M_3 - F_c \cdot (x - 0.06) - F_i \cdot (x - 0.25) = 0$$

$$M_3 = -(F_c + F_i) \cdot x + 0.06 \cdot F_c + 0.25 \cdot F_i \quad (37)$$

Sección 4: Dentro de tramo D-E

$$0.4 \text{ m} < x < 0.625 \text{ m}$$



Donde,

$$\sum F_y = 0$$

$$-V_4 - F_c - F_i + F_r = 0$$

$$V_4 = F_r - F_c - F_i \quad (38)$$

$$N_4 = 0$$

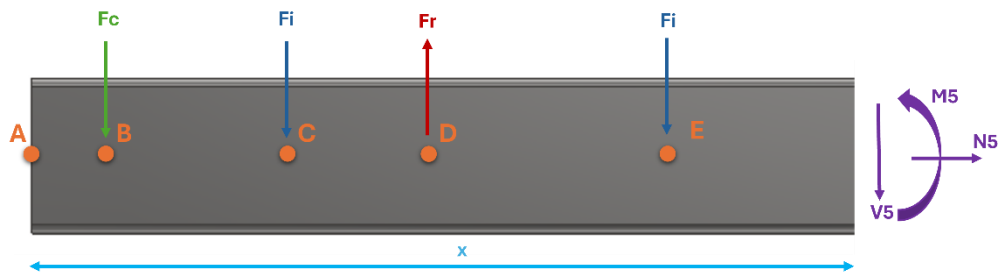
$$\sum M_{\odot} = 0$$

$$-M_4 - F_c \cdot (x - 0.06) - F_i \cdot (x - 0.25) + F_r \cdot (x - 0.4) = 0$$

$$M_4 = (F_r - F_c - F_i) \cdot x + 0.06 \cdot F_c + 0.25 \cdot F_i - 0.4 \cdot F_r \quad (39)$$

Sección 5: Dentro de tramo E-F

$$0.625 < x < 1.0 \text{ m}$$



Donde,

$$\sum F_y = 0$$

$$-V_5 - F_c - 2 \cdot F_i + F_r = 0$$

$$V_5 = F_r - F_c - 2 \cdot F_i \quad (40)$$

$$N_5 = 0$$

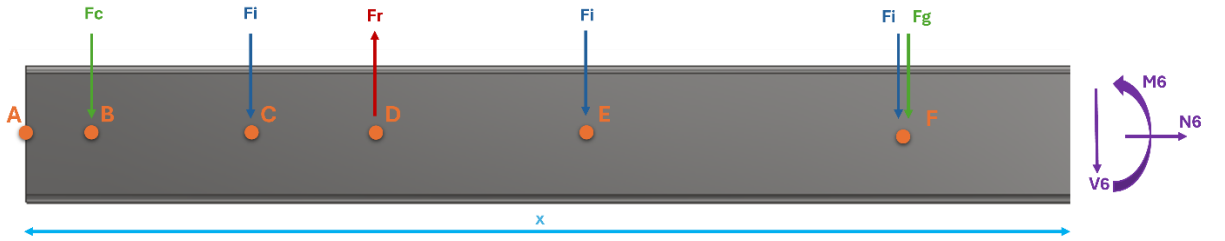
$$\sum M_U = 0$$

$$-M_5 - F_c \cdot (x - 0.06) - F_i \cdot (x - 0.25) + F_r \cdot (x - 0.4) - F_i \cdot (x - 0.625) = 0$$

$$M_5 = (F_r - F_c - 2 \cdot F_i) \cdot x + 0.06 \cdot F_c + 0.875 \cdot F_i - 0.4 \cdot F_r \quad (41)$$

Sección 6: Dentro de tramo F-G

$$1.0 < x < 1.375 \text{ m}$$



Donde,

$$\sum F_y = 0$$

$$-V_6 - F_c - 3 \cdot F_i - F_g + F_r = 0$$

$$V_6 = F_r - F_c - 3 \cdot F_i - F_g \quad (42)$$

$$N_6 = 0$$

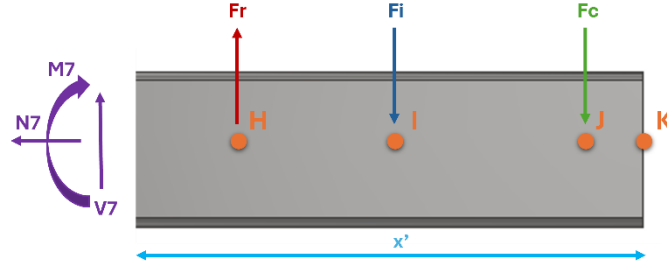
$$\sum M_U = 0$$

$$-M_6 - F_c \cdot (x - 0.06) - F_i \cdot (x - 0.25) + F_r \cdot (x - 0.4) - F_i \cdot (x - 0.625) - F_i \cdot (x - 1) - F_g \cdot (x - 1) = 0$$

$$M_6 = (F_r - F_c - 3 \cdot F_i - F_g) \cdot x + 0.06 \cdot F_c + 1.875 \cdot F_i - 0.4 \cdot F_r + F_g \quad (43)$$

Sección 7: Dentro de tramo G-H

$$1.375 < x < 1.6 \text{ m}$$



Donde,

$$\sum F_y = 0$$

$$V_7 + F_r - F_c - F_i = 0$$

$$V_7 = F_c + F_i - F_r \quad (44)$$

$$N_7 = 0$$

$$\sum M_{\odot} = 0$$

$$M_7 + F_c \cdot (x' - 0.06) + F_i \cdot (x' - 0.25) - F_r \cdot (x' - 0.4) = 0$$

$$M_7 = (F_r - F_c - F_i) \cdot x' + 0.06 \cdot F_c + 0.25 \cdot F_i - 0.4 \cdot F_r$$

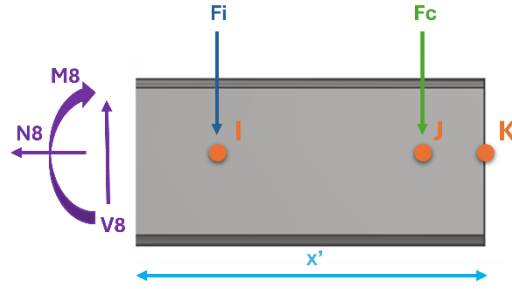
$$x' = 2 - x$$

$$M_7 = (F_r - F_c - F_i) \cdot (2 - x) + 0.06 \cdot F_c + 0.25 \cdot F_i - 0.4 \cdot F_r$$

$$M_7 = (F_c + F_i - F_r) \cdot x - 1.94 \cdot F_c - 1.75 \cdot F_i + 1.6 \cdot F_r \quad (45)$$

Sección 8: Dentro de tramo H-I

$$1.6 < x < 1.75 \text{ m}$$



Donde,

$$\sum F_y = 0$$

$$V_8 - F_c - F_i = 0$$

$$V_8 = F_c + F_i \quad (46)$$

$$N_8 = 0$$

$$\sum M_{\odot} = 0$$

$$M_8 + F_c \cdot (x' - 0.06) + F_i \cdot (x' - 0.25) = 0$$

$$M_8 = -(F_c + F_i) \cdot x' + 0.06 \cdot F_c + 0.25 \cdot F_i$$

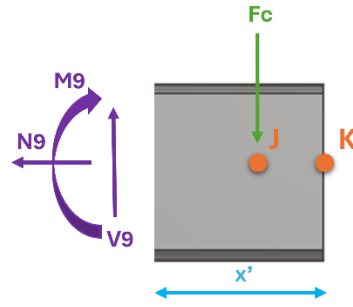
$$x' = 2 - x$$

$$M_8 = -(F_c + F_i) \cdot (2 - x) + 0.06 \cdot F_c + 0.25 \cdot F_i$$

$$M_8 = (F_c + F_i) \cdot x - 1.94 \cdot F_c - 1.75 \cdot F_i \quad (47)$$

Sección 9: Dentro de tramo I-J

$$1.75 < x < 1.94 \text{ m}$$



Donde,

$$\sum F_y = 0$$

$$V_9 - F_c = 0$$

$$V_9 = F_c \quad (48)$$

$$N_9 = 0$$

$$\sum M_{\odot} = 0$$

$$M_9 + F_c \cdot (x' - 0.06) = 0$$

$$M_9 = -F_c \cdot x' + 0.06 \cdot F_c$$

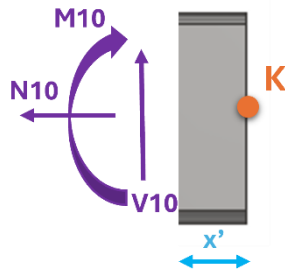
$$x' = 2 - x$$

$$M_9 = -F_c \cdot (2 - x) + 0.06 \cdot F_c$$

$$M_9 = F_c \cdot x - 1.94 \cdot F_c \quad (49)$$

Sección 10: Dentro de tramo J-K

$$1.94 < x < 2.0 \text{ m}$$



Al no tener cargas esta sección:

$$V_{10} = 0$$

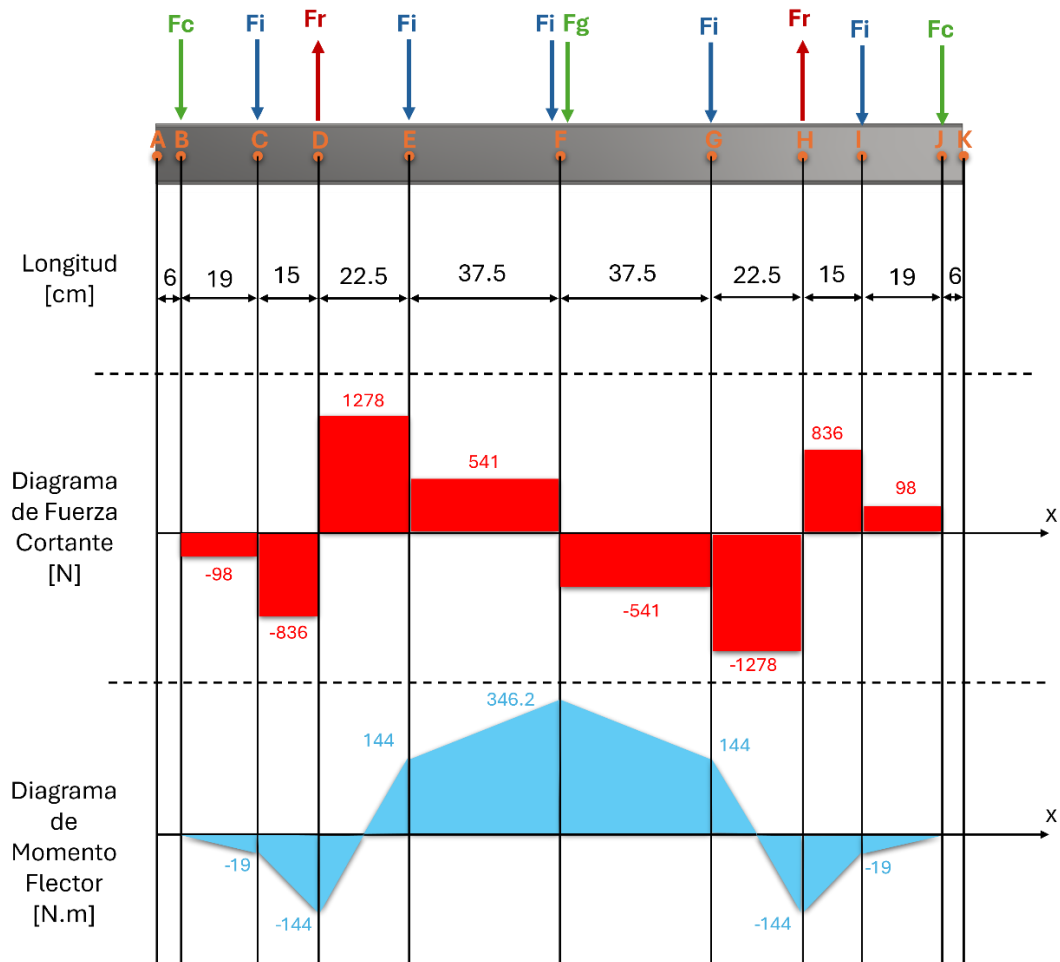
$$N_{10} = 0$$

$$M_{10} = 0$$

Con las variables y ecuaciones determinadas, se obtienen las gráficas.

Figura 18:

Diagrama de Fuerza Cortante y Momento Flector de yugo de izaje



Nota. Diagrama Fuerza cortante $V(x)$ vs la longitud de la viga y Diagrama momento flecto $M(x)$ vs la longitud de la viga. Se determina que la máxima fuerza cortante que actúa en la viga es de 1278 N en el intervalo 0.4 a 0.625 metros. Se determina que el máximo momento flector que actúa en la viga es de 346.2 N.m a la mitad de toda la longitud de la viga

Cálculo de esfuerzos y verificación estructural. En esta sección se evalúan los esfuerzos inducidos en la viga principal del yugo de izaje mediante los diagramas de cortante y momentos obtenidos en la etapa previa. Se calculan: el esfuerzo normal por flexión en la fibra extrema; el esfuerzo cortante transversal máximo en la sección crítica; y el esfuerzo equivalente de Von Mises para verificar la condición de fluencia bajo solicitaciones combinadas.

Esfuerzo normal por flexión. El cálculo de esfuerzo por flexión permite determinar la tensión normal máxima en la fibra extrema de la sección producida por el momento flector máximo. Este valor se utiliza para comprobar que la tensión de servicio no supere el límite elástico del material dividido por el factor de seguridad adoptado.

El esfuerzo máximo en la viga viene dado por la ecuación (8):

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_{m\acute{a}x} \cdot c}{I_x}$$

Para ello se había determinado que el momento flector máximo está ubicado en la mitad de la viga descrito en el diagrama de momento flector, donde:

$$M_{m\acute{a}x} = 346.2 \text{ N.m}$$

Además, el punto más externo desde el nivel de referencia es,

$$c = \frac{H}{2} = \frac{0.150}{2}$$

$$c = 0.075 \text{ m}$$

$$I_x = 595 \text{ cm}^4 = 595 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$\sigma = \frac{346.2 \cdot 0.075}{595 \cdot 10^{-8}}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 4.36 \text{ MPa}$$

El factor de seguridad viene a ser según la ecuación (18),

$$FS = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sigma_{m\acute{a}x}}$$

$$FS = \frac{230}{4.36} \geq 3$$

Esfuerzo cortante. El esfuerzo cortante transversal máximo se calcula para verificar la resistencia al corte en la pared del tubo y estimar la componente cortante que interviene en la condición combinada de falla.

Viene dado por la ecuación (9):

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{V_{m\acute{a}x} \cdot Q}{I_x \cdot t}$$

Según el diagrama de fuerza cortante, el punto de máxima cortante se encuentra ubicado en el intervalo de la viga de 0.4m a 0.625m.

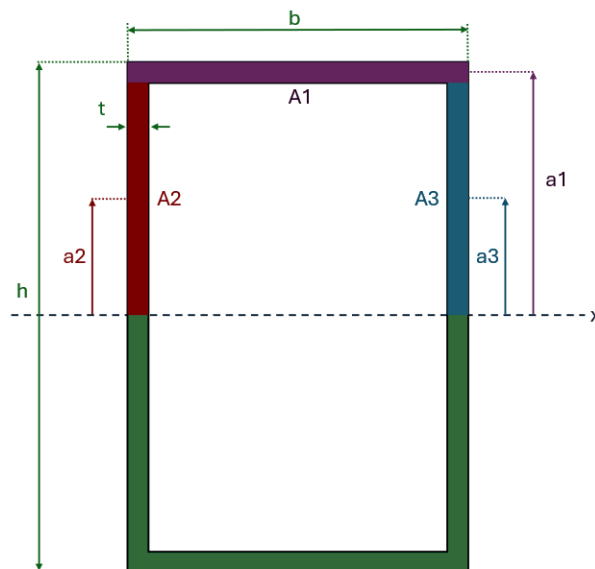
$$V_{m\acute{a}x} = 1278 \text{ N}$$

Además, se determina el primer momento de área de la viga, en modo de simplificación se considera la sección del tubo rectangular sin las curvaturas externas e internas.

Se tiene la siguiente figura 20:

Figura 19:

Sección transversal simplificada de tubo rectangular 150x100x4.5



Nota: Elaboración propia

Donde el primer momento de área se determina mediante la suma del producto de las áreas superiores que conforman la sección y la distancia de su centroide al punto de análisis. En este caso al determinar el esfuerzo cortante máximo, este se ubicará en la mitad de la sección.

Por lo tanto:

$$Q = A_1 \cdot a_1 + A_2 \cdot a_2 + A_3 \cdot a_3 \quad (50)$$

$$Q = (b \cdot t) \cdot \frac{(h-t)}{2} + \left(\frac{h}{2} - t\right) \cdot t \cdot \left(\frac{h}{4} - \frac{t}{2}\right) + \left(\frac{h}{2} - t\right) \cdot t \cdot \left(\frac{h}{4} - \frac{t}{2}\right)$$

$$Q = 0.1 \cdot 0.004 \cdot 0.073 + 2 \cdot 0.071 \cdot 0.004 \cdot 0.0355$$

$$Q = 4.9364 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Entonces, al reemplazar en la ecuación (9)

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{1278 \cdot 4.9364 \cdot 10^{-5}}{595 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 0.004}$$

$$\tau_{\text{máx}} = 1.33 \text{ MPa}$$

El factor de seguridad viene a ser,

$$FS = \frac{\tau_{\text{fluencia}}}{\tau_{\text{máx}}} \quad (51)$$

$$\tau_{\text{fluencia}} = \frac{\sigma_{\text{fluencia}}}{\sqrt{3}}$$

$$\tau_{\text{fluencia}} = 132.8 \text{ MPa}$$

$$FS = \frac{132.8}{1.33} \geq 3$$

Cálculo de equivalente de Von Mises. Para la evaluación del estado tensional en el yugo de izaje se ha aplicado el criterio de Von Mises en dos puntos de interés de la sección: En la fibra superior del tubo rectangular, donde el esfuerzo de flexión es máximo y donde la componente cortante transversal alcanza su valor máximo.

El equivalente 1 en la fibra superior del tubo rectangular y ubicado en la mitad de la viga a la longitud de un metro. Para esta sección se tiene el esfuerzo máximo normal por flexión.

$$\sigma = 4.36 \text{ MPa}$$

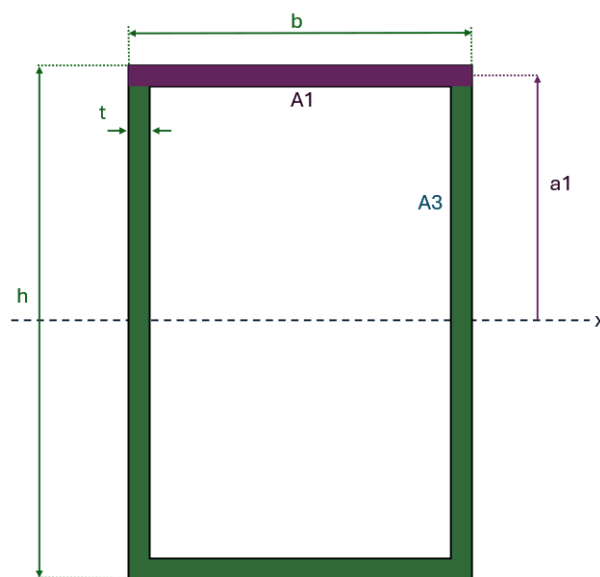
Según el diagrama de esfuerzo cortante, se determina la fuerza cortante en esta sección de la viga.

$$V = 540 \text{ N}$$

Además, se determina el primer momento de área de la fibra extrema con la ayuda de la siguiente figura:

Figura 20:

Primer momento de área superior del tubo rectangular 150x100x4.5



Nota: Elaboración propia

Por lo tanto:

$$Q = A_1 \cdot a_1 \quad (52)$$

$$Q = (b \cdot t) \cdot \frac{(h - t)}{2}$$

$$Q = 0.1 \cdot 0.004 \cdot 0.073$$

$$Q = 2.92 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Entonces, según la ecuación (9):

$$\tau = \frac{540 \cdot 2.92 \cdot 10^{-5}}{595 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 0.004}$$

$$\tau = -0.33 \text{ Mpa}$$

Entonces reemplazando los valores calculados en la ecuación (15)

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma + 3 \cdot \tau}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{4.36 + 3 \cdot (-0.33)}$$

$$\sigma_{eq} = 4.4 \text{ MPa}$$

El factor de seguridad viene a ser según la ecuación (18),

$$FS = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sigma_{eq}}$$

$$FS = \frac{230}{4.4} \geq 3$$

El equivalente 2 en la fibra superior del tubo rectangular y ubicado a la longitud de 0.625 metros. Para esta sección se tiene la fuerza cortante máxima.

$$V = 1278 \text{ N}$$

Además, se determina el primer momento de área de la fibra extrema. Al ser la misma sección.

$$Q = 2.92 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Entonces, según la ecuación (9):

$$\tau = \frac{1278 \cdot 2.92 \cdot 10^{-5}}{595 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 0.004}$$

$$\tau = 0.78 \text{ Mpa}$$

Según el diagrama de momento flector, el momento en la ubicación de análisis:

$$M = 143.55 \text{ N.m}$$

Además, el punto más externo desde el nivel de referencia es,

$$c = \frac{H}{2} = \frac{0.150}{2}$$

$$c = 0.075 \text{ m}$$

$$I_x = 595 \text{ cm}^4 = 595 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$\sigma = \frac{143.55 \cdot 0.075}{595 \cdot 10^{-8}}$$

$$\sigma = 1.81 \text{ MPa}$$

Entonces reemplazando los valores calculados en la ecuación (15)

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{1.81^2 + 3 \cdot (0.78)^2}$$

$$\sigma_{eq} = 2.26 \text{ MPa}$$

El factor de seguridad viene a ser según la ecuación (18),

$$FS = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sigma_{eq}}$$

$$FS = \frac{230}{2.26} \geq 3$$

Cálculo estructural mediante elemento finitos. Se realizó un análisis estructural por elementos finitos (FEA) utilizando Autodesk Inventor. Este análisis permite evaluar la distribución de esfuerzos bajo las condiciones de carga descritas anteriormente y determinando la magnitud del esfuerzo equivalente de Von Mises, deformaciones y el Factor de Seguridad (FS) en cada una de las configuraciones evaluadas. Los resultados permiten validar el diseño preliminar, verificar la integridad estructural del yugo y garantizar que los espesores, geometrías y uniones propuestas cumplen con los márgenes de seguridad establecidos para sistemas de izaje.

Descripción de análisis. El propósito del análisis es evaluar la resistencia mecánica del yugo de izaje bajo la carga máxima de operación, determinando los esfuerzos equivalentes, deformaciones y factor de seguridad. Esto permite verificar que el diseño cumple con los criterios de seguridad establecidos para equipos de elevación.

Parámetros y condiciones. Para iniciar el análisis en el programa, se debe configurar los parámetros de análisis como el tipo de estudio, el mallado y configuración de materiales utilizados.

Figura 21:

Tipo de estudio para estructura de yugo de izaje para su FEA

Análisis estático:1

Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Fecha de la última modificación	3/12/2025, 01:25
Estado de modelo	[Principal]
Vista de diseño	Default
Posicional	[Principal]
Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	Sí
Separar tensiones en superficies de contacto	Sí
Análisis de cargas de movimiento	No

Nota: Elaboración propia

Figura 22:

Materiales designados en estructura de yugo de izaje para su FEA

Material(es)

Nombre	Acero ASTM A500	
General	Densidad de masa	7.85 g/cm ³
	Límite de elasticidad	248.225 MPa
	Resistencia máxima a tracción	399.9 MPa
Tensión	Módulo de Young	199.959 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.3 su
	Módulo cortante	76.9073 GPa
Nombre(s) de pieza	Reference Skeleton DIN EN 10210-2 150 x 100 x 4 - 2000	
Nombre	Acero ASTM A36	
General	Densidad de masa	7.85 g/cm ³
	Límite de elasticidad	248.225 MPa
	Resistencia máxima a tracción	399.9 MPa
Tensión	Módulo de Young	199.959 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.3 su
	Módulo cortante	76.9073 GPa
Nombre(s) de pieza	6.5.6. Brida carro guía.ipt 6.5.2. Horquilla izaje.ipt 6.5.7. Tapa.ipt 6.5.5. Brida de sujetador de iman.ipt	

Nota: Elaboración propia

Figura 23:

Configuración de malla en FEA de estructura de yugo de izaje

Configuración de malla:

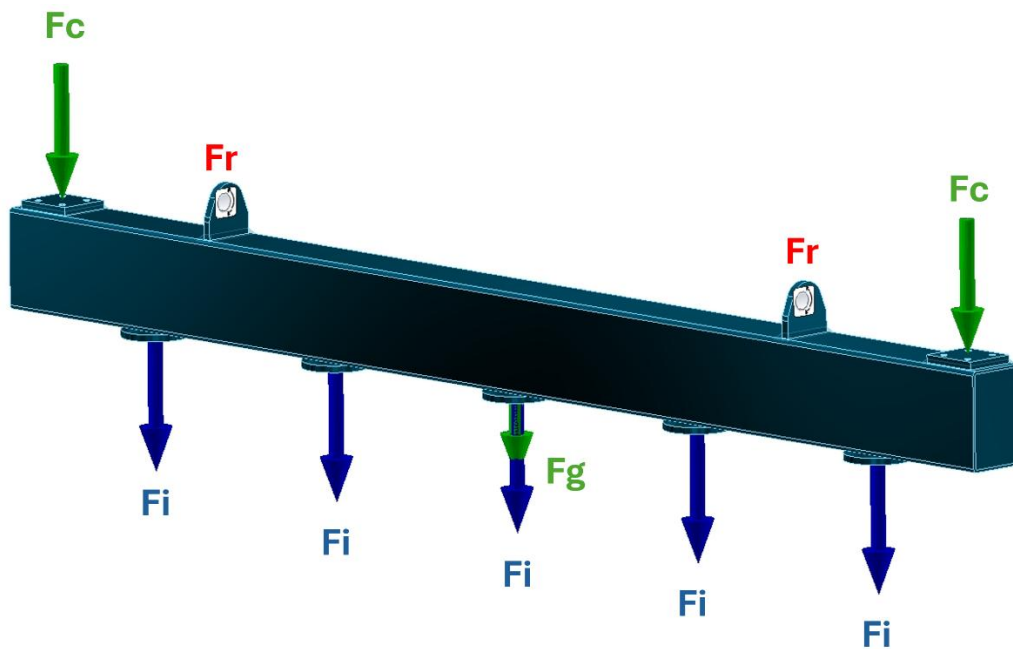
Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.1
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	No
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

Nota: Elaboración propia

Para la distribución de cargas se utiliza la misma descrita en el inicio del análisis, considerando las mismas magnitudes y ubicaciones. Además, se considera un punto fijo en el agujero de la horquilla de izaje.

Figura 24:

Distribución de cargas dentro de FEA de estructura de yugo de izaje

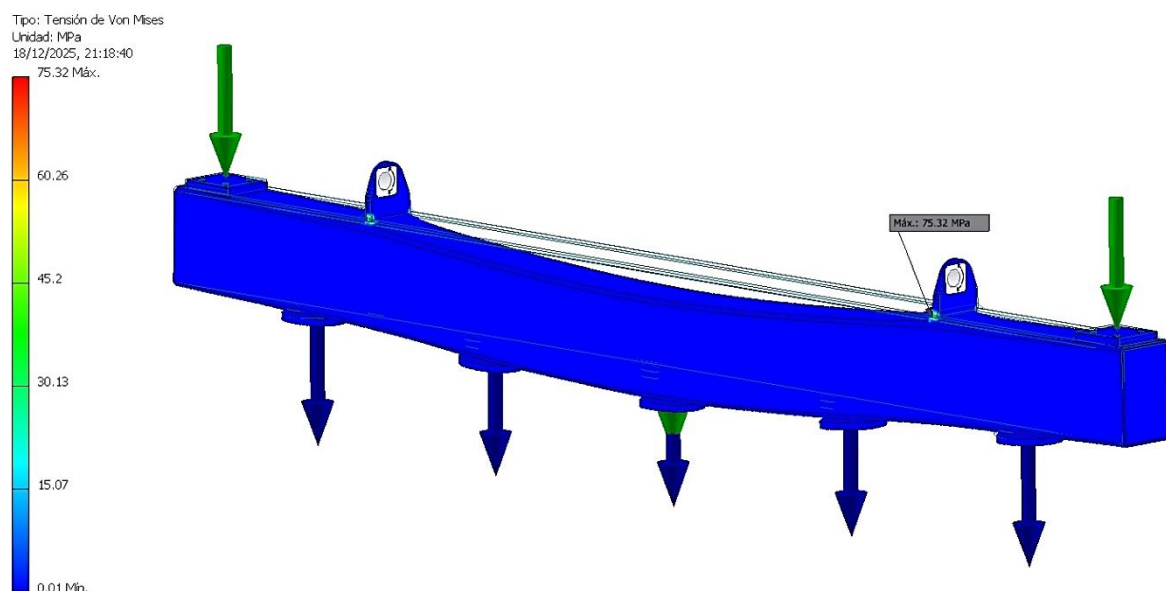


Nota: Elaboración propia

Resultados. Los resultados muestran que el esfuerzo máximo de Von Mises se localiza en la zona inferior de la horquilla de izaje, alcanzando un valor de 75.4 MPa, que se encuentra por debajo del límite de fluencia del material. La deformación máxima registrada fue de 0.4 mm, siendo aceptable para el régimen de operación. El factor de seguridad mínimo obtenido fue de 3.3, valor que cumple con los requerimientos para sistemas de izaje. Para mayor detalle ver Anexo D.

Figura 25:

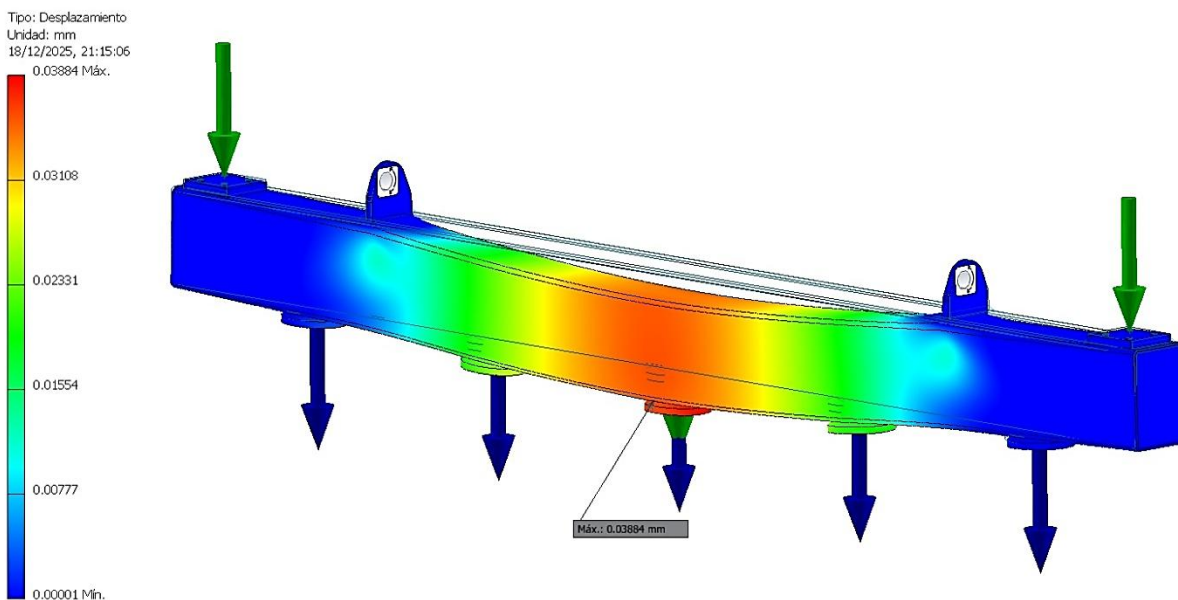
Tensión de Von Mises en estructura de yugo



Nota: Elaboración propia

Figura 26:

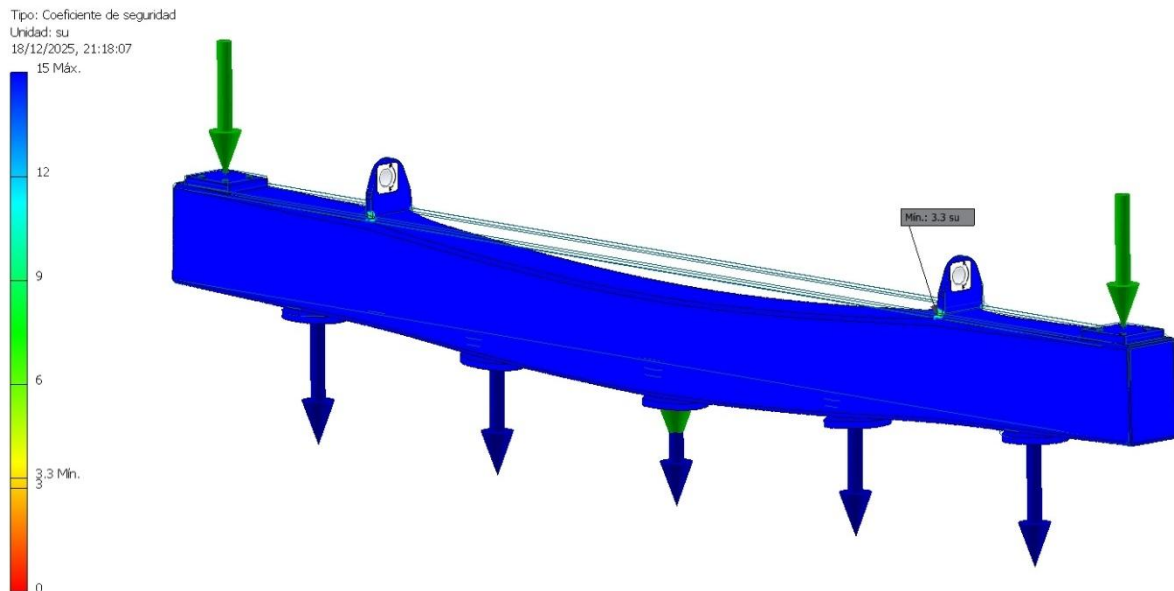
Desplazamiento de estructura de yugo



Nota: Elaboración propia

Figura 27:

Coeficiente de seguridad en estructura de yugo



Nota: Elaboración propia

Conclusión de cálculo estructural. El análisis analítico y por elementos finitos permitió validar la geometría final del yugo de izaje, garantizando su integridad estructural y cumplimiento con los niveles de seguridad requeridos. Los valores de Von Mises obtenidos se mantienen dentro de la capacidad del material, y el factor de seguridad verificado confirma la aptitud del diseño para condiciones reales de operación. Al realizar un sondeo por las zonas exclusivas del tubo rectangular, se observa que las tensiones están próximas a las calculadas analíticamente.

3.5.2. Cálculo estructural de bastidor principal

El bastidor principal constituye la estructura portante del extractor de placas y es el encargado de recibir y transmitir las cargas provenientes del sistema de izaje, del desplazamiento longitudinal y del peso propio del equipo. Su función es garantizar un soporte rígido y estable durante el proceso de extracción y manipulación de las placas filtrantes, evitando deformaciones que puedan comprometer la alineación del carro, el yugo o el sistema imantado utilizado para la sujeción de las placas. En este apartado se describen las

características geométricas del bastidor, las cargas actuantes y el procedimiento de verificación estructural mediante análisis de elementos finitos.

Definición del sistema estructural.

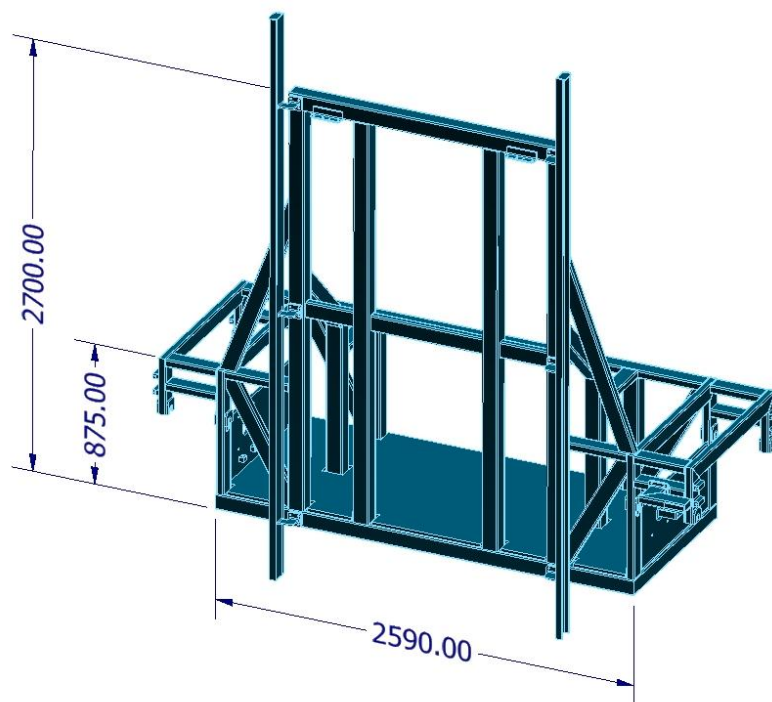
El bastidor está conformado principalmente por perfiles tubulares estructurales:

Tubo principal, tubo cuadrado $100 \times 100 \times 4.5$ mm, utilizado como elemento principal debido a su elevada resistencia a flexión en ambas direcciones y su buen comportamiento ante cargas combinadas. Tubo secundario, tubo rectangular $50 \times 100 \times 4.5$ mm, empleado como refuerzo y como elemento de conectividad entre los miembros principales del bastidor.

Ambos perfiles se consideran fabricados bajo la especificación ASTM A500 Grado A, normativa aplicable a tubos estructurales formados en frío utilizados en marcos portantes y estructuras soldadas. Este estándar define los valores mínimos de resistencia a la cedencia y tracción, así como las tolerancias geométricas necesarias para garantizar un comportamiento mecánico adecuado en aplicaciones sometidas a carga repetitiva.

Figura 28:

Modelo 3D de estructura de bastidor principal



Cálculo estructural mediante elementos finitos. Se realizó un análisis estructural por elementos finitos (FEA) utilizando Autodesk Inventor. Este análisis permite evaluar la distribución de esfuerzos bajo las condiciones de carga descritas anteriormente y determinando la magnitud del esfuerzo equivalente de Von Mises, deformaciones y el Factor de Seguridad (FS) en cada una de las configuraciones evaluadas. Los resultados permiten validar el diseño preliminar, verificar la integridad estructural del yugo y garantizar que los espesores, geometrías y uniones propuestas cumplen con los márgenes de seguridad establecidos para sistemas de izaje.

Descripción del análisis. El propósito del análisis es evaluar la resistencia mecánica de la estructura del bastidor principal bajo la carga máxima de operación, determinando los esfuerzos equivalentes, deformaciones y factor de seguridad. Esto permite verificar que el diseño cumple con los criterios de seguridad establecidos para equipos de elevación.

Parámetros y condiciones. Para iniciar el análisis en el programa, se debe configurar los parámetros de análisis como el tipo de estudio, el mallado y configuración de materiales utilizados.

Figura 29:

Tipo de estudio para estructura de bastidor principal para su FEA

Análisis estático:1

Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Fecha de la última modificación	3/12/2025, 02:50
Estado de modelo	[Principal]
Vista de diseño	Default
Posicional	[Principal]
Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	Sí
Separar tensiones en superficies de contacto	Sí
Análisis de cargas de movimiento	No

Nota: Elaboración propia

Figura 30:

Parte 1 de materiales designados en bastidor principal para su FEA

Material(es)

Nombre	Acero	
General	Densidad de masa	7.85 g/cm ³
	Límite de elasticidad	207 MPa
	Resistencia máxima a tracción	345 MPa
	Módulo de Young	210 GPa
Tensión	Coefficiente de Poisson	0.3 su
	Módulo cortante	80.7692 GPa
Nombre(s) de pieza	ISO 10799-2 100x100x4 - 2590	
	ISO 10799-2 100x100x4 - 1100	
	ISO 10799-2 100x100x4 - 2600	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 395	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 310	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 310	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 310	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 1100	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 1100	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 1100	
	ISO 10799-2 100x100x4 - 970.71	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 310	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 775	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 350	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 775	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 350	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 350	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 350	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 350	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 395	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 310	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 310	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 310	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 310	
	ISO 10799-2 100x100x4 - 707.11	
	ISO 10799-2 100x100x4 - 707.11	
	ISO 10799-2 100x100x4 - 2500	
	ISO 10799-2 100x100x4 - 2500	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 400	
	ISO 10799-2 100x100x4 - 1700	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 2490	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 400	
	ISO 10799-2 100x100x4 - 725	
	ISO 10799-2 100x100x4 - 725	
	ISO 10799-2 100x100x4 - 2600	

Nota: Elaboración propia

Figura 31:

Parte 2 de materiales designados en bastidor principal para su FEA

	ISO 10799-2 100x50x4 - 775 ISO 10799-2 100x50x4 - 775 ISO 10799-2 100x100x4 - 970.71 ISO 10799-2 100x50x4 - 1100 ISO 10799-2 100x100x4 - 2590 ISO 10799-2 100x100x4 - 1100	
Nombre	Acero ASTM A500	
General	Densidad de masa	7.85 g/cm ³
	Límite de elasticidad	248.225 MPa
	Resistencia máxima a tracción	399.9 MPa
Tensión	Módulo de Young	199.959 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.3 su
	Módulo cortante	76.9073 GPa
Nombre(s) de pieza	ISO 10799-2 100x50x4 - 300	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 300	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 300	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 300	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 825.59	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 825.59	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 1262.76	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 700	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 1262.76	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 825.59	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 900	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 825.59	
	ISO 10799-2 100x50x4 - 900	
	ISO 10799-2 100x100x4 - 900	
	ISO 10799-2 100x100x4 - 900	
	ISO 10799-2 100x100x4 - 900	
	ISO 10799-2 100x100x4 - 900	
Nombre	Acero ASTM A36	
General	Densidad de masa	7.85 g/cm ³
	Límite de elasticidad	248.225 MPa
	Resistencia máxima a tracción	399.9 MPa
Tensión	Módulo de Young	199.959 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.3 su
	Módulo cortante	76.9073 GPa
Nombre(s) de pieza	6.2.12. Brida soporte riel guía.ipt	
	6.2.9. Placa refuerzo rueda.ipt	
	6.2.16. Ángulo soporte poleas.ipt	
	6.2.3. Plancha lateral.ipt	
	6.2.13. Soporte guiador.ipt	
	6.2.15. Brida soporte cadena.ipt	
	6.2.7. Tope regulación.ipt	
	Plancha.ipt	

Nota: Elaboración propia

Figura 32:

Configuración de malla en FEA de estructura de bastidor principal

Configuración de malla:

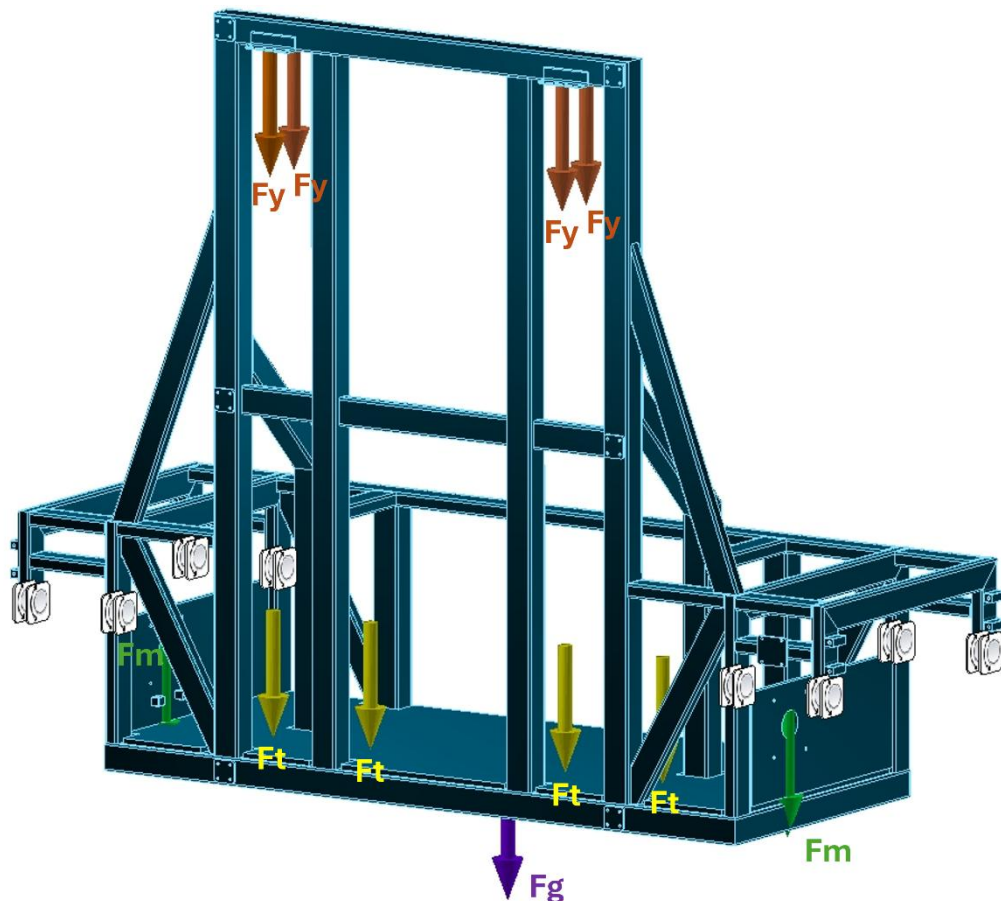
Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.1
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	No
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

Nota: Elaboración propia

Para la distribución de cargas se utiliza la misma descrita en el inicio del análisis, considerando las mismas magnitudes y ubicaciones. Además, se considera un punto fijo en el agujero para las ruedas.

Figura 33:

Distribución de cargas dentro de FEA de estructura de bastidor principal



Nota: Elaboración propia

Donde,

F_m es el peso que ejerce el motorreductor de desplazamiento en el bastidor

$$F_m = 785 \text{ N}$$

F_t es el peso que ejerce el sistema de izaje incluido el motorreductor de izaje y tambores hacia el bastidor

$$F_t = 2208 \text{ N}$$

F_y es la fuerza de reacción transmitida al cable mediante la tensión.

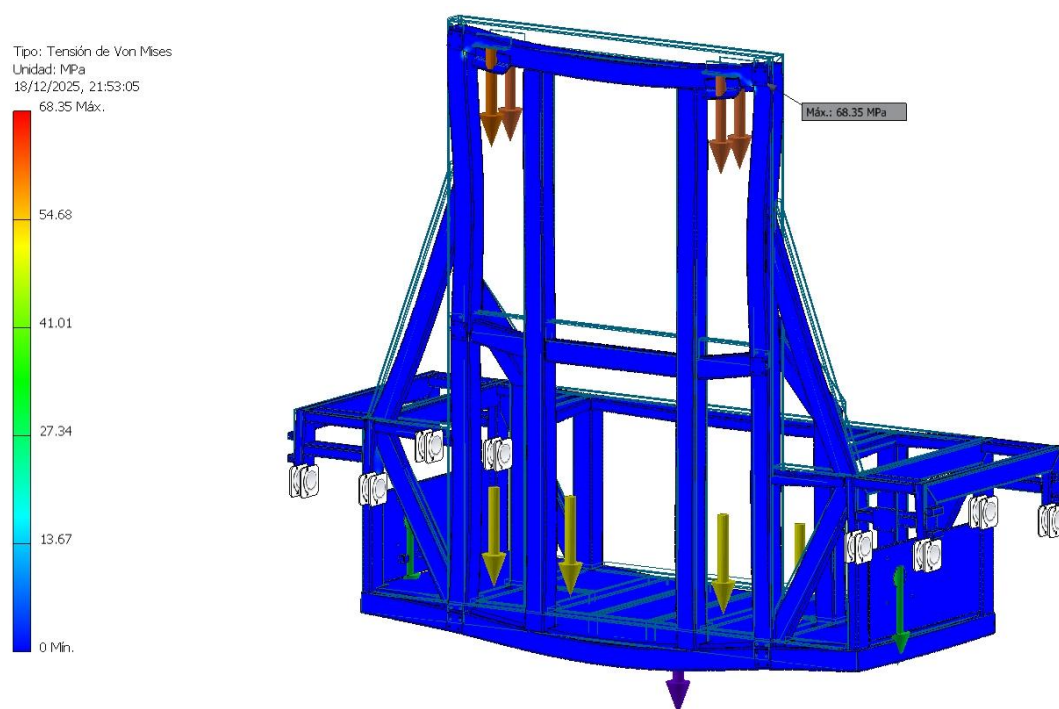
$$F_y = 2114 \text{ N}$$

F_g es la fuerza gravitatoria por la masa de la misma estructura.

Resultados. Los resultados muestran que el esfuerzo máximo de Von Mises se localiza en la zona inferior de la horquilla de izaje, alcanzando un valor de 68.4 MPa, que se encuentra por debajo del límite de fluencia del material. La deformación máxima registrada fue de 0.198 mm, siendo aceptable para el régimen de operación. El factor de seguridad mínimo obtenido fue de 3.03, valor que cumple con los requerimientos para sistemas de izaje. Para mayor detalle ver Anexo E.

Figura 34:

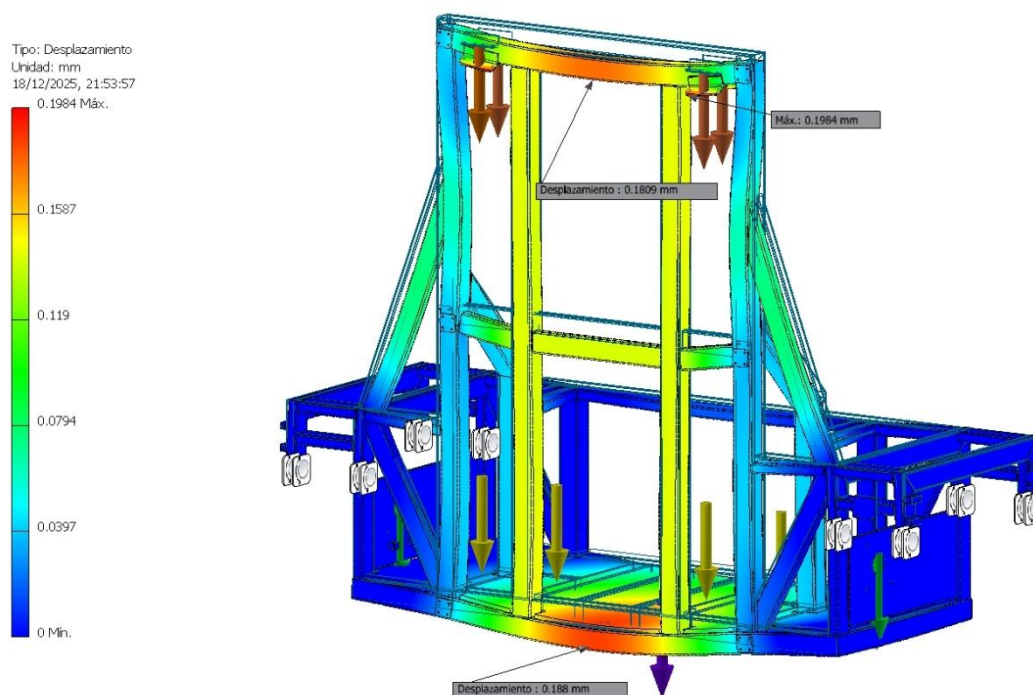
Tensión de Von Mises en estructura de bastidor principal



Nota: Elaboración propia

Figura 35:

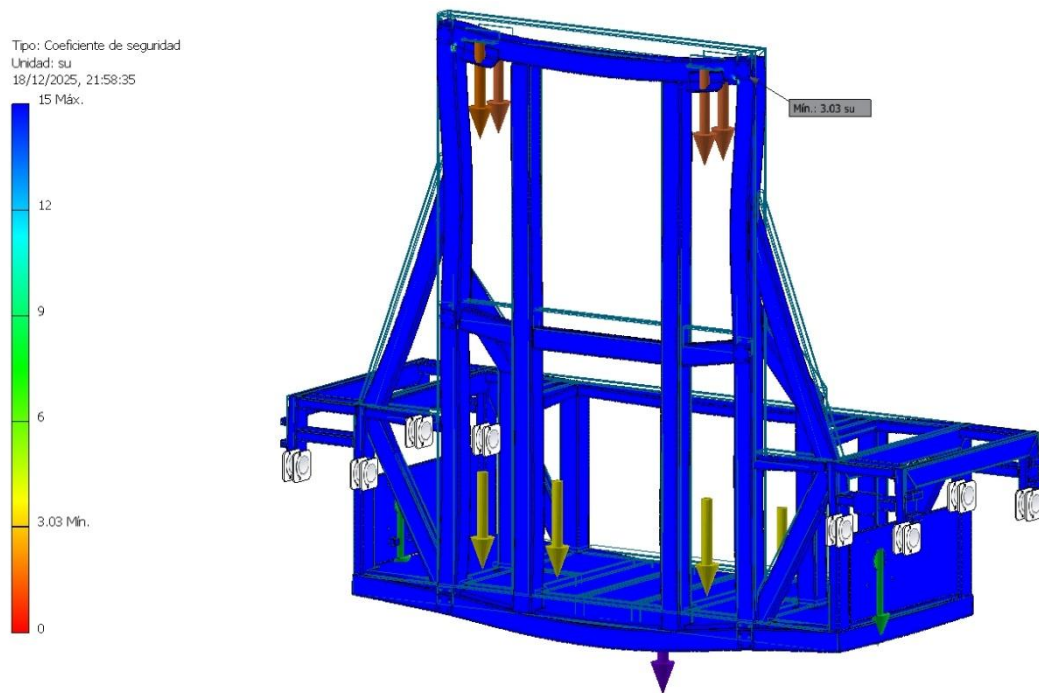
Desplazamiento de estructura de bastidor principal



Nota: Elaboración propia

Figura 36:

Coeficiente de seguridad en estructura de yugo



Nota: Elaboración propia

Conclusión de cálculo estructural. El análisis analítico y por elementos finitos permitió validar la geometría final del yugo de izaje, garantizando su integridad estructural y cumplimiento con los niveles de seguridad requeridos. Los valores de Von Mises obtenidos se mantienen dentro de la capacidad del material, y el factor de seguridad verificado confirma la aptitud del diseño para condiciones reales de operación. Al realizar un sondeo por las zonas exclusivas del tubo rectangular, se observa que las tensiones están próximas a las calculadas analíticamente.

3.6. Cálculo de sistema motriz

El sistema extractor de placas del filtro prensa requiere una selección adecuada de los elementos motrices que permitirán garantizar un desplazamiento controlado y una elevación segura de la carga. Debido a que el funcionamiento del extractor involucra tanto movimientos horizontales (desplazamiento del carro a lo largo de la viga carrilera) como movimientos verticales (izaje del yugo y las placas filtrantes), es necesario dimensionar los

motorreductores considerando la masa total a manejar, las resistencias al movimiento, las velocidades operativas, los coeficientes de seguridad y las condiciones reales de operación dentro de la planta.

3.6.1. Cálculo motriz de motorreductor de izaje

El sistema de izaje interviene directamente en la elevación del yugo y en la manipulación de las placas filtrantes. Por tratarse de un mecanismo vertical, los factores de seguridad y las exigencias de par son mayores en comparación con el desplazamiento horizontal.

Descripción del sistema de izaje. El izaje consiste en un tambor accionado por el motorreductor con el objetivo de retraer o extender el cable de la línea de acción a través de un juego de poleas. El motorreductor de velocidad reducida tiene equipada un freno electromagnético para asegurar la carga ante eventuales fallas. La carga levantada corresponde al peso combinado del yugo, cableado, accesorios y la placa filtrante adherida mediante el sistema electromagnético.

El sistema de izaje requiere un desplazamiento vertical de corta distancia, pero con un alto nivel de control y estabilidad, especialmente durante la retención de la carga en posición de reposo. Aunque el recorrido operativo presenta una velocidad de izaje constante en la zona intermedia, es necesario considerar las fases de aceleración inicial y desaceleración final, ya que generan efectos dinámicos que incrementan temporalmente la carga transmitida al cable y al motorreductor.

El yugo de izaje está diseñado con dos puntos de suspensión, cada uno conectado a un gancho y cable independiente. Cada cable es enrollado en su propio tambor, y ambos tambores son accionados por un motorreductor, encargado de proporcionar el torque y la potencia necesarios para elevar la carga bajo las condiciones de operación establecidas.

Determinación de parámetros de izaje. Se describen los parámetros a usar en los cálculos de esta sección.

Tabla 13:*Parámetros de cálculo de izaje*

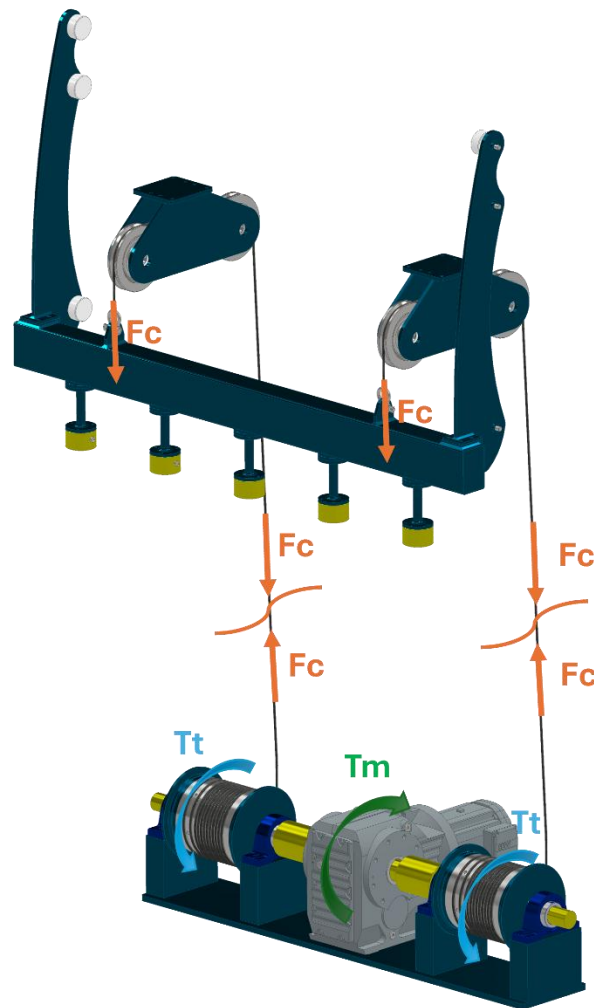
Parámetro	Símbolo	Unidad
Tensión en cable	F_c	N
Factor de corrección	FC	-
Aceleración lineal yugo	a_y	m/s ²
Velocidad lineal yugo	v_y	m/s
Velocidad angular tambor	ω_t	rad/s
Factor de seguridad cable	FS_{cable}	-
Diámetro de tambor	D_t	m
Carga límite de rotura de cable	MBS	N
Diámetro de cable	d_c	mm
Torque en tambor	T_t	N.m
Torque de salida de motorreductor	T_m	N.m
Eficiencia total mecánica	n_m	-
Eficiencia total eléctrica	n_e	-
Derrateo	n_d	-
Potencia de motorreductor	P_m	kW
Velocidad de salida de motorreductor	ω_m	RPM

Nota: Elaboración propia

Diagrama de cuerpo libre. Para el desarrollo del diagrama de cuerpo libre, se presenta la siguiente imagen del sistema de poleas y transmisión mecánica:

Figura 37:

Diagrama de cuerpo libre en sistema de izaje



Nota: Elaboración propia

Selección del cable de izaje.

En la sección del cálculo de yugo de izaje, según su DCL, se determinó la fuerza de reacción en la oreja de izaje. En el extremo del tambor se tiene:

$$F_c = F_r \cdot FC \quad (53)$$

Se utiliza un factor de corrección por la masa no determinada del cáncamo, cable, ganchos y demás accesorios de izaje. Por lo tanto:

$$F_c = 2113.4 \cdot 1.5$$

$$F_c = 3170.2 \text{ N}$$

Para la determinación del diámetro del cable, se utiliza un factor de seguridad mayor a cinco según ASME BTH-1, con ello se determina la mínima carga límite de rotura del cable a seleccionar.

$$MBS \geq F_c \cdot FS \quad (54)$$

$$MBS \geq 3170.2 \cdot 5$$

$$MBS \geq 15851 \text{ N} = 1.62 \text{ TON}$$

Para determinar el diámetro, se utiliza una composición de cable 6x36 Warrington Seale y alma de acero, es decir IWR. Esto debido a su mejor flexibilidad, buena resistencia y comercialmente adquirible en acero galvanizado.

Figura 38:

Tabla de cable de acero tipo cascabel

			
CONST./SERIE :		6*36	
TIPO :		TIPO CASCABEL	
ALMA :		ACERO	
ACERO :		ARADO MEJORADO	
ACABADO :		NEGRO/GALV.	
DIAMETRO		PESO	CARGA DE RUPTURA
mm.	Nom.	Kg/m	Ton
3.00	1/8"		
5.00	3/16"		
6.00	1/4"	0.17	2.67
8.00	5/16"	0.27	4.16
10.00	3/8"	0.39	5.95
11.11	7/16"	0.52	8.07
12.00	1/2"	0.68	10.40
14.00	9/16"	0.88	13.20
16.00	5/8"	1.07	16.20
20.00	3/4"	1.55	23.20
22.00	7/8"	2.11	31.40
26.00	1"	2.75	40.70
28.00	1 1/8"	3.48	51.30
31.00	1 1/4"	4.30	63.00

Nota: Extraído de Cable de izaje Perú. <https://cablesizaje.pe/product/cable-de-acero-tipo-cascabel/>

Por lo tanto, se pueden usar los diámetros desde 6mm en adelante, por motivos de practicidad de compra comercial, se utiliza:

$$d_c = 8 \text{ mm}$$

Determinación del diámetro del tambor. Como método recomendado, se utiliza la siguiente relación para determinar el diámetro de tambor mínimo para mitigar fatiga en el sistema.

$$\frac{D_t}{d_c} \geq 25$$

$$D_t \geq 0.2 \text{ m}$$

Se escoge el valor más próximo:

$$D_t = 0.25 \text{ m}$$

Cálculo de torque requerido en motorreductor. Con el diámetro del tambor determinado, se puede calcular el torque que tendrá el tambor, para su rotación.

$$T_t = F_c \cdot \frac{D_t}{2} \quad (55)$$

$$T_t = 3170.2 \cdot 0.125$$

$$T_t = 396.3 \text{ N.m}$$

Además, se asume la eficiencia mecánica del sistema:

$$n_m = 0.85$$

Entonces, se tiene el torque requerido del motorreductor:

$$T_m = \frac{2 \cdot T_t \cdot FC}{n_m}$$

$$T_m = \frac{2 \cdot 396.3 \cdot 1.5}{0.85}$$

$$T_m = 1398.6 \text{ N.m}$$

Cálculo de potencia requerida en motorreductor. Para este cálculo, se requiere realizar la cinemática del yugo y calcular la velocidad angular del tambor.

Se maneja el rango de velocidad lineal de acuerdo con requerimientos de izaje, al ser un sistema de precisión:

$$5 \text{ m/min} \leq v_y \leq 8 \text{ m/min}$$

Por lo tanto:

$$0.08 \text{ m/s} \leq v_y \leq 0.133 \text{ m/s}$$

Se utiliza el valor:

$$v_y = 0.133 \text{ m/s}$$

Entonces, en el tambor:

$$\omega_t = \frac{2 \cdot v_y}{D_t} \quad (56)$$

$$\omega_t = \frac{2 \cdot 0.133}{0.25}$$

$$\omega_t = 1.07 \text{ rad/s}$$

Al estar acoplado en el mismo eje:

$$\omega_m = \omega_t \cdot FC$$

$$\omega_m = 1.07 \cdot 1.2$$

$$\omega_m = 1.28 \text{ rad/s}$$

$$\omega_m = 12.2 \text{ RPM}$$

Además, el motorreductor estará ubicado en una minera a elevada altura, se tiene la siguiente figura:

Figura 39:

Tabla de determinación de factor de derrateo

T(° C)	Altitud (m)								
	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
10							0.97	0.92	0.88
15						0.98	0.94	0.9	0.86
20					1	0.95	0.91	0.87	0.83
25				1	0.95	0.93	0.89	0.85	0.81
30			1	0.96	0.92	0.9	0.86	0.82	0.78
35		1	0.95	0.93	0.9	0.88	0.84	0.8	0.75
40	1	0.97	0.94	0.9	0.86	0.82	0.8	0.76	0.71
45	0.95	0.92	0.9	0.88	0.85	0.81	0.78	0.74	0.69
50	0.92	0.9	0.87	0.85	0.82	0.8	0.77	0.72	0.67
55	0.88	0.85	0.83	0.81	0.78	0.76	0.73	0.7	0.65
60	0.83	0.82	0.8	0.77	0.75	0.73	0.7	0.67	0.62
65	0.79	0.76	0.74	0.72	0.7	0.68	0.66	0.62	0.58
70	0.74	0.71	0.69	0.67	0.66	0.64	0.62	0.58	0.53
75	0.7	0.68	0.66	0.64	0.62	0.6	0.58	0.53	0.49
80	0.65	0.64	0.62	0.6	0.58	0.56	0.55	0.48	0.44

Nota: Tomado de <https://www.scribd.com/document/399255637/DERRATEO-DE-MOTORES-POR-EFECTO-DE-LA-ALTURA-Y-TEMPERATURA>

Entonces, para una altura de 4500 M.S.N.M. y un trabajo a 25°C, se tiene:

$$n_d = 0.85$$

Y se considera la eficiencia eléctrica, al usarse un motor premium:

$$n_e = 0.9$$

Entonces, se puede determinar la potencia requerida del motorreductor mediante la ecuación (20):

$$P_m = \frac{T \cdot \omega}{n}$$

$$P_m = \frac{T_m \cdot \omega_m}{n_d \cdot n_e}$$

$$P_m = \frac{1398.6 \cdot 1.28}{0.85 \cdot 0.9}$$

$$P_m = 2.34 \text{ kW}$$

Selección de motorreductor de izaje. Para la selección del motorreductor encargado del izaje se emplearon los valores obtenidos en el desarrollo del cálculo motriz: torque

requerido, potencia eléctrica necesaria, velocidad de operación, relación de reducción requerida y parámetros dinámicos del sistema. Con estos datos se procedió a seleccionar un conjunto motor–reductor comercial que garantice la capacidad de elevación, el cumplimiento de la velocidad establecida, la disposición requerida en el bastidor principal y el margen de seguridad adecuado.

Dado que el sistema opera bajo régimen de variador de frecuencia, con aceleración y desaceleración controladas, y considerando que la aplicación corresponde a un sistema de izaje, se optó por realizar la selección mediante el configurador oficial SSC de SEW-EURODRIVE, el cual permite introducir las condiciones reales de operación y obtener una recomendación verificada por el fabricante. La hoja de selección generada por el software se presenta en el Anexo B.

El configurador SEW, considerando los parámetros de entrada (masa total de izaje, diámetro del tambor, velocidad de izaje, eficiencia del sistema, régimen VFD y ciclo de carga), recomendó el siguiente equipo:

Motorreductor seleccionado.

Modelo: KA97DRN100L4/BE5

Tipo: Motorreductor cónico

Potencia nominal: 3 kW

Velocidad nominal del motor: 1763 rpm

Relación total de reducción: 153.21

Velocidad de salida: 12 rpm

Par nominal de salida: 2490 N.m

Par máximo permitido: 4300 N.m

Torque del freno: 40 N.m

Verificaciones de capacidad.

Par de aplicación requerido: 1398.6 N·m

Par disponible del reductor: 2490 N·m

Utilización del motorreductor: 56 %

Estos resultados muestran que el motorreductor opera muy por debajo de su capacidad límite, garantizando un adecuado margen de seguridad para esfuerzos transitorios y condiciones de arranque bajo carga.

Justificación de la selección.

Cumplimiento del torque requerido. El par nominal del reductor (2490 N.m) supera ampliamente el torque calculado para el sistema (1400 N.m), proporcionando un margen seguro frente a cargas dinámicas, frenados y pérdidas adicionales no consideradas.

Adecuación a la velocidad especificada. La velocidad de salida obtenida (12 rpm) permite alcanzar la velocidad lineal de izaje solicitada (0.13 m/s), manteniendo estabilidad durante las etapas de aceleración y desaceleración.

Eficiencia y confiabilidad del reductor cónico. Los reductores cónicos KA de SEW poseen alta eficiencia, permitiendo reducir pérdidas mecánicas y térmicas, lo cual es deseable en aplicaciones de izaje con servicio continuo e intermitente.

Compatibilidad con operación mediante variador de frecuencia. El motor IE3 seleccionado cumple los requisitos para operación con VFD, y la hoja de selección confirma que el torque disponible en baja velocidad es suficiente para iniciar el movimiento con carga.

Sistema de frenado adecuado para izaje. El freno electromagnético fail-safe (40 N.m) cumple la función de mantener la carga suspendida cuando el sistema está detenido, requisito fundamental en mecanismos de elevación.

Cumplimiento de factores de servicio y normas aplicables. El configurador considera automáticamente los factores de servicio recomendados por SEW para aplicaciones de grúa, asegurando que el equipo seleccionado es apropiado para cargas verticales.

Conclusión de cálculo motriz de izaje. El cálculo motriz permitió determinar el torque, la potencia y la velocidad necesarios para el funcionamiento del sistema de izaje, considerando las cargas aplicadas, el diámetro del tambor, la eficiencia mecánica y los factores de servicio. A partir de estos valores se verificó que la potencia eléctrica requerida y la relación de reducción seleccionada garantizan un movimiento estable y seguro durante todo el ciclo de elevación.

El motorreductor seleccionado de modelo: KA97DRN100L4/BE5 cumple holgadamente con el torque de operación, manteniendo una utilización por debajo del 60 % y asegurando capacidad suficiente frente a condiciones dinámicas. Asimismo, el reductor cónico y el freno electromagnético fail-safe ofrecen la robustez y seguridad exigidas para sistemas de izaje. En conjunto, el equipo elegido satisface los criterios de diseño, estabilidad y protección necesarios para garantizar un funcionamiento confiable del mecanismo.

3.6.2. Cálculo motriz de motorreductor de desplazamiento

El sistema de desplazamiento permite el movimiento horizontal del sistema de izaje sobre la viga carrilera. A diferencia del izaje, este movimiento presenta menores cargas verticales, pero requiere un control suave, estabilidad dinámica y capacidad para vencer la fricción de rodadura del carro. El desplazamiento se realiza mediante dos motorreductores que accionan cada extremo del carro, transmitiendo el movimiento a través de un sistema cremallera - piñón y unas ruedas guiadas sobre la viga carrilera. El diseño considera operación a velocidad constante, arranques suaves mediante variador de frecuencia y márgenes de seguridad adecuados.

Descripción del sistema de desplazamiento. El sistema de desplazamiento del carro contiene cuatro ruedas, las cuales se desplazan a lo largo de una viga carrilera que actúa como camino de rodadura y guía del movimiento. El avance longitudinal no se genera por fricción de las ruedas, sino mediante un mecanismo piñón-cremallera instalada a lo largo de la viga. Sobre cada extremo del carro se dispone un piñón motriz, el cual engrana directamente con la cremallera, transmitiendo así el empuje necesario para el movimiento horizontal.

Cada piñón es accionado por un motorreductor independiente, permitiendo que la fuerza de tracción se distribuya simétricamente y garantizando una operación estable, sin torsiones ni desalineamientos del carro frente a la viga carrilera. Las ruedas cumplen la función de soporte vertical, guiado lateral y control de reacción, mientras que la tracción efectiva se produce exclusivamente a través del engrane piñón-cremallera, evitando problemas de patinaje o pérdida de adherencia.

Este arreglo proporciona un desplazamiento uniforme, controlado mediante variador de frecuencia, y asegura una transmisión positiva del movimiento incluso bajo condiciones de carga variable, ambientes con presencia de humedad o polvo, o eventuales irregularidades en la superficie de rodadura. Además, el uso de dos piñones motrices incrementa la capacidad del sistema, reduce el torque requerido por cada motor y mejora la precisión del posicionamiento del carro.

Determinación de parámetros de desplazamiento. Se describen los parámetros a usar en los cálculos de esta sección.

Tabla 14:

Parámetros de cálculo de desplazamiento

Parámetro	Símbolo	Unidad
Masa total del sistema	m_t	kg
Coefficiente de rodadura acero-nylon	μ_r	-

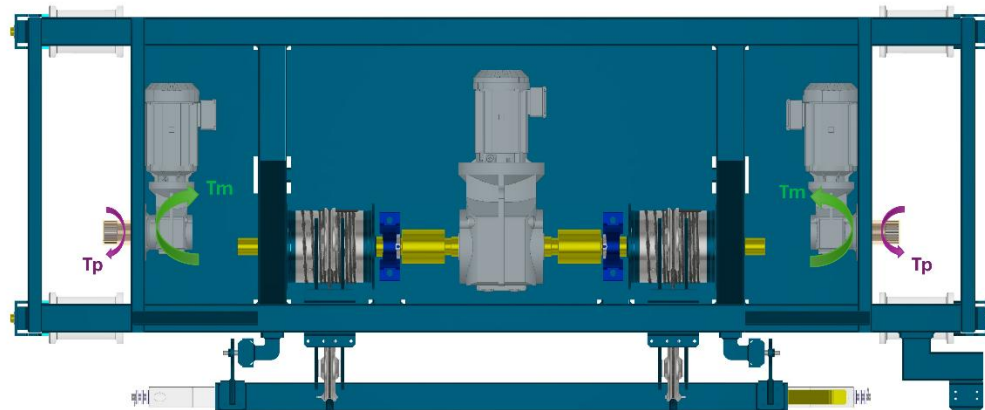
Velocidad de desplazamiento del sistema	v	m/s
Aceleración del sistema	a	m/s ²
Tiempo de aceleración del sistema	t	s
Fuerza requerida en piñón	F_p	N
Diámetro de paso de piñón	D_p	m
Velocidad angular de piñón	ω_p	rad/s
Factor de corrección	FC	-
Torque en piñón	T_p	N.m
Torque de salida de motorreductor	T_m	N.m
Eficiencia total mecánica	n_m	-
Eficiencia total eléctrica	n_e	-
Derrateo	n_d	-
Potencia de motorreductor	P_m	kW
Velocidad de salida de motorreductor	ω_m	RPM

Nota: Elaboración propia

Diagrama de cuerpo libre. Para el desarrollo del diagrama de cuerpo libre, se presenta la siguiente figura del sistema de desplazamiento:

Figura 40:

Diagrama de cuerpo libre sistema desplazamiento

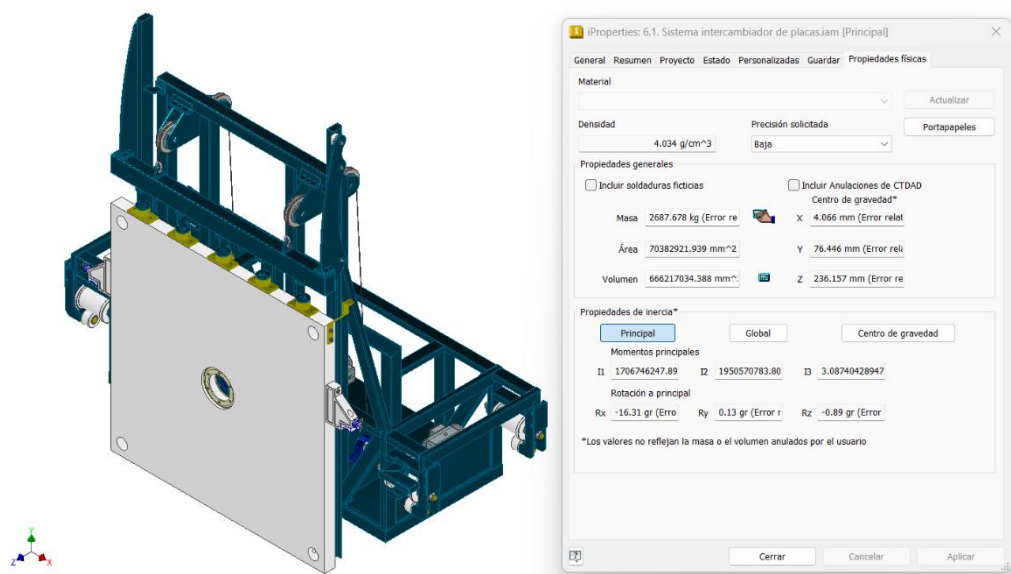


Nota: Elaboración propia

Determinación de masa del sistema. Con la ayuda del modelado 3D se determina la masa total del sistema cuando se eleve una placa con mayor masa, como la placa cola.

Figura 41:

Propiedades físicas de Sistema extractor de placas



Nota: Elaboración propia

Se determina que:

$$m_t = 2700 \text{ kg}$$

Cálculo de torque requerido en motorreductor. Para este cálculo, se requiere realizar la cinemática del carro extractor y calcular la aceleración que tendrá el sistema al inicio de movimiento:

La velocidad

$$8 \text{ m/min} \leq v \leq 12 \text{ m/min}$$

Por lo tanto:

$$0.13 \text{ m/s} \leq v \leq 0.2 \text{ m/s}$$

Se utiliza el valor:

$$v = 0.2 \text{ m/s}$$

El sistema cuenta contará con variador de frecuencia, por tal motivo se podrá regular la rampa de aceleración al iniciar el movimiento, por lo que se requiere que este se realice en 0.5 segundos.

$$t = 0.5 \text{ s}$$

Entonces se puede calcular la aceleración en el sistema:

$$a = \frac{v}{t}$$

$$a = \frac{0.2}{0.5} = 0.4 \text{ m/s}^2$$

Se tiene que la fuerza requerida de los piñones es la siguiente:

$$2 \cdot F_p = (m_t \cdot a + m_t \cdot g \cdot \mu_r) \cdot FC \quad (57)$$

La rueda del carro extractor es de material Nylon, mientras que la viga carrilera es de acero, por lo cual se considera:

$$\mu_r = 0.05$$

Entonces en la ecuación (51)

$$2 \cdot F_p = (2700 \cdot 0.4 + 2700 \cdot 9.81 \cdot 0.05) \cdot 1.5$$

$$F_p = 1803.3 \text{ N}$$

Para el sistema piñón cremallera, se considera un piñón de módulo 3, número de dientes 24 y por ende diámetro de paso 72 milímetros

$$D_p = 0.072 \text{ m}$$

Por lo tanto, se puede calcular el torque requerido en cada piñón,

$$T_p = F_p \cdot \frac{D_p}{2} \quad (58)$$

$$T_p = 1803.3 \cdot 0.036$$

$$T_p = 65 \text{ N.m}$$

Además, se asume la eficiencia mecánica del sistema:

$$n_m = 0.9$$

Entonces, se tiene el torque requerido del motorreductor:

$$T_m = \frac{T_p \cdot FC}{n_m}$$

$$T_m = \frac{65 \cdot 1.5}{0.9}$$

$$T_m = 108.2 \text{ N.m}$$

Cálculo de potencia requerida en motorreductor. Con la velocidad determinada anteriormente, se procede a calcular la velocidad angular del piñón,

$$v = 0.2 \text{ m/s}$$

Entonces, en el piñón:

$$\omega_p = \frac{2 \cdot v}{D_p} \quad (59)$$

$$\omega_p = \frac{2 \cdot 0.2}{0.072}$$

$$\omega_p = 5.55 \text{ rad/s}$$

Al estar acoplado en el mismo eje del motorreductor:

$$\omega_m = \omega_t \cdot FC$$

$$\omega_m = 5.55 \cdot 1.2$$

$$\omega_m = 6.7 \text{ rad/s}$$

$$\omega_m = 64 \text{ RPM}$$

Además, el motorreductor estará ubicado a 4550 MSNM, al igual que el motorreductor de izaje de carga, por lo tanto:

$$n_d = 0.85$$

Y se considera la eficiencia eléctrica, al usarse un motor premium:

$$n_e = 0.9$$

Entonces, se puede determinar la potencia requerida del motorreductor mediante la ecuación (20):

$$P_m = \frac{T \cdot \omega}{n}$$

$$P_m = \frac{T_m \cdot \omega_m}{n_d \cdot n_e}$$

$$P_m = \frac{108.2 \cdot 6.7}{0.85 \cdot 0.9}$$

$$P_m = 0.95 \text{ kW}$$

Selección de motorreductor de izaje. Para la selección del motorreductor encargado del izaje se emplearon los valores obtenidos en el desarrollo del cálculo motriz: torque requerido, potencia eléctrica necesaria, velocidad de operación, relación de reducción requerida y parámetros dinámicos del sistema. Con estos datos se procedió a seleccionar un conjunto motor–reductor comercial que garantice la capacidad de elevación, el cumplimiento de la velocidad establecida, la disposición requerida en el bastidor principal y el margen de seguridad adecuado.

Dado que el sistema opera bajo régimen de variador de frecuencia, con aceleración y desaceleración controladas, y considerando que la aplicación corresponde a un sistema de izaje, se optó por realizar la selección mediante el configurador oficial SSC de SEW-EURODRIVE, el cual permite introducir las condiciones reales de operación y obtener una recomendación verificada por el fabricante. La hoja de selección generada por el software se presenta en el Anexo C.

El configurador SEW, considerando los parámetros de entrada (masa total de izaje, diámetro del tambor, velocidad de izaje, eficiencia del sistema, régimen VFD y ciclo de carga), recomendó el siguiente equipo:

Motorreductor seleccionado.

Modelo: KF47DRN100L4

Tipo: Motorreductor cónico

Potencia nominal: 3 kW

Velocidad nominal del motor: 1763 rpm

Relación total de reducción: 19.58

Velocidad de salida: 90 rpm

Par nominal de salida: 320 N.m

Par máximo permitido: 430 N·m

Verificaciones de capacidad.

Par de aplicación requerido: 108.2 N·m

Par disponible del reductor: 320 N·m

Utilización del motorreductor: 34 %

Estos resultados muestran que el motorreductor opera muy por debajo de su capacidad límite, garantizando un adecuado margen de seguridad para esfuerzos transitorios y condiciones de arranque bajo carga.

Justificación de la selección. La selección del motorreductor para el desplazamiento se fundamenta en la verificación del par y la potencia requeridos para movilizar el carro sobre la viga carrilera mediante el sistema piñón–cremallera. El análisis realizado confirma que el modelo propuesto no solo cubre las exigencias operativas, sino que también ofrece un margen adecuado frente a condiciones dinámicas y variaciones de carga.

Cumplimiento del torque requerido. El par nominal entregado por el reductor (320 N·m) supera ampliamente el par dinámico calculado para el desplazamiento (109 N·m), lo que proporciona un margen holgado ante efectos de aceleración, frenado, rozamiento adicional y posibles desalineaciones en el sistema. Este nivel de reserva es indispensable en mecanismos sometidos a esfuerzos repetitivos y ciclos intermitentes.

Adecuación a la velocidad especificada. La relación total seleccionada ($i \approx 19.58$) permite obtener una velocidad de salida aproximada de 90 rpm, que se traduce en la velocidad lineal establecida para el movimiento del carro (≈ 0.30 m/s). Esta coincidencia asegura que el sistema de desplazamiento trabaje dentro del régimen previsto, evitando sobre aceleraciones o esfuerzos excesivos sobre la cremallera.

Eficiencia y confiabilidad del reductor cónico. Los reductores cónicos de la serie F/K de SEW se caracterizan por su alta eficiencia mecánica y capacidad para transmitir torque

con bajas pérdidas, lo que favorece un funcionamiento más estable y con menor generación de calor, especialmente adecuado para movimientos frecuentes de arranque y parada.

Compatibilidad con operación mediante variador de frecuencia. El motor IE3 asociado al reductor es apto para operar con VFD, lo que permite controlar suavemente las aceleraciones y desaceleraciones del carro, reduciendo impactos dinámicos en la cremallera y mejorando la precisión en la posición final. La hoja de selección confirma que el motor mantiene capacidad suficiente incluso a bajas velocidades.

Cumplimiento de factores de servicio y normas aplicables. El configurador SEW aplica factores de servicio para aplicaciones con desplazamiento horizontal, validando que el motorreductor trabaja muy por debajo de sus límites térmicos y mecánicos. La utilización del reductor registrada indica que el equipo opera con reservas suficientes para posibles sobrecargas transitorias.

Conclusión del cálculo motriz de desplazamiento. El proceso de cálculo permitió definir los esfuerzos de rodadura, el par requerido en el piñón, la potencia necesaria y la velocidad de operación del sistema piñón–cremallera. A partir de estos valores, se confirmó que el motorreductor KF47DRN100L4 satisface plenamente las exigencias de operación, manteniendo adecuados márgenes de seguridad tanto en par como en potencia. La selección realizada garantiza un desplazamiento uniforme, seguro y confiable del carro a lo largo de la viga carrilera.

3.7. Cálculo de tiempo de operación de extractor de placas

El tiempo de operación del extractor de placas constituye un parámetro fundamental para evaluar la eficiencia global del proceso de cambio de placas filtrantes. Este tiempo está directamente relacionado con la secuencia de movimientos mecánicos y acciones de control que ejecuta el sistema, tales como el desplazamiento del carro extractor, el accionamiento del yugo de izaje y la activación del imán electropermanente. Para efectos de estandarizar la evaluación del desempeño operativo, se descompone el ciclo completo en etapas

elementales, cada una de las cuales representa una tarea independiente dentro del proceso de desmontaje y montaje de la placa filtrante. A partir de esta desagregación se determinan los tiempos parciales de cada operación y se obtiene el tiempo total de operación del extractor. Este valor es indispensable para estimar la productividad del sistema, comparar alternativas de diseño y validar la pertinencia del uso del mecanismo electropermanente frente a métodos tradicionales.

Para evaluar la eficiencia operativa del sistema extractor de placas, es necesario determinar los tiempos asociados a las dos etapas principales del proceso de reemplazo de una placa filtrante: el desmontaje de la placa antigua y el montaje de la placa nueva. Cada una de estas etapas involucra una serie de operaciones mecánicas secuenciales que el extractor ejecuta mediante el desplazamiento del carro, el accionamiento del yugo de izaje y el control del imán electropermanente. La descomposición del ciclo en tareas elementales permite cuantificar los tiempos parciales de cada operación y, a partir de ello, obtener los tiempos totales de desmontaje y montaje. Estos valores resultan esenciales para analizar la productividad del sistema, comparar alternativas de diseño y estimar la reducción del tiempo de mantenimiento frente a procedimientos manuales tradicionales.

Para determinar el tiempo de operación del extractor de placas se tienen la siguiente ecuación:

$$t_{op} = t_d + t_m \quad (60)$$

Donde, t_d es el tiempo de desmontaje de la placa filtrante y t_m es el tiempo de montaje de la placa filtrante nueva.

3.7.1. Tiempo de desmontaje de placa filtrante antigua

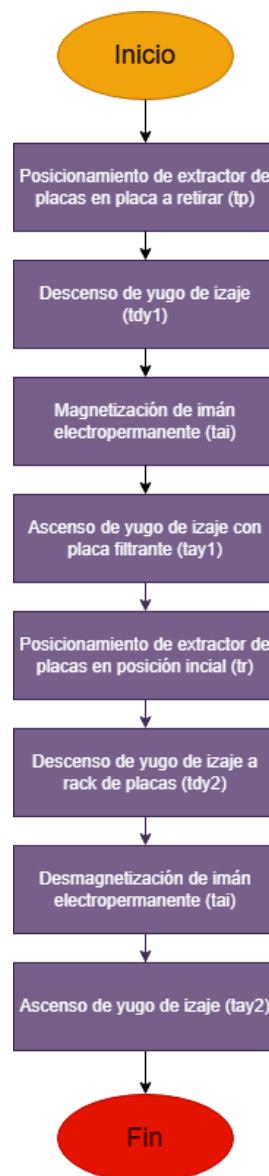
El tiempo de desmontaje corresponde al intervalo necesario para retirar la placa filtrante que ha completado su ciclo de operación. Este proceso incluye el posicionamiento del extractor, el descenso y ascenso del yugo, la activación y desactivación del imán electropermanente y el desplazamiento del carro hacia la zona de retiro. La secuencia

ordenada de estas operaciones permite determinar el tiempo total de desmontaje como la suma de los tiempos parciales requeridos para cada acción del sistema.

Para poder determinar los tiempos de desmontaje de placas filtrantes se tiene el siguiente diagrama de flujo.

Figura 42:

Flujo de procesos para desmontaje de placas filtrantes



Nota. Elaboración propia.

Con lo descrito, se tiene la siguiente ecuación que describe el tiempo de desmontaje de placas filtrantes:

$$t_d = t_p + t_{dy1} + t_{ai} + t_{ay1} + t_r + t_{dy2} + t_{ai} + t_{ay2} \quad (61)$$

Donde, t_p es el tiempo de posicionamiento del extractor de placas, t_{dy} es el tiempo de descenso del yugo, t_{ai} es el tiempo de activación del imán electropermanente, t_{ay} es el tiempo de ascenso del yugo y t_r es el tiempo de retorno del extractor de placas.

Mediante la ayuda del modelo 3D se detalla la siguiente tabla con valores de velocidades anteriormente determinados, distancias y tiempo calculados.

Tabla 15:

Determinación de tiempo de desmontaje de placas filtrantes

Parámetro	Símbolo	Velocidad [m/s]	Distancia [m]	Tiempo [s]
Posicionamiento promedio de extractor de placas	t_p	0.2	6.75	33.75
Descenso de yugo de izaje 1	t_{dy1}	0.133	2.4	18.05
Magnetización de imán electropermanente	t_{ai}	-	-	1
Ascenso de yugo de izaje 1	t_{ay1}	0.133	2.4	18.05
Retorno promedio de extractor de placas a posición inicial	t_r	0.2	6.75	33.75
Descenso de yugo de izaje 2	t_{dy2}	0.133	3.1	23.31
Desmagnetización de imán electropermanente	t_{ai}	-	-	1
Ascenso de yugo de izaje 2	t_{ay2}	0.133	3.1	23.31
Desmontaje promedio de placa filtrante	t_d	-	-	152.22

Nota: Elaboración propia

Por lo tanto, el tiempo promedio de desmontaje de las placas filtrantes antiguas es de 152.22 segundos (2.5 minutos).

3.7.2. Tiempo de montaje de placa filtrantes nueva

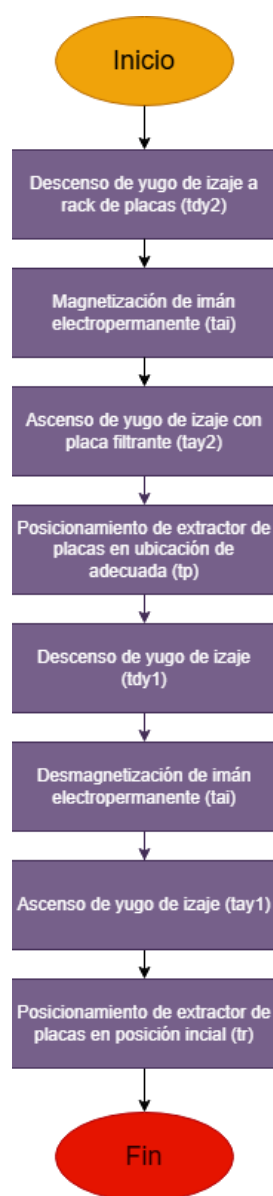
El tiempo de montaje contempla las operaciones necesarias para instalar una placa filtrante nueva en sustitución de la retirada. Este proceso involucra el posicionamiento del

extractor sobre la nueva placa, la activación del imán para su izaje, el transporte hacia la estructura del filtro prensa y el posicionamiento final para su montaje. Al igual que en el desmontaje, el tiempo total de montaje se obtiene al sumar los tiempos parciales de cada etapa, permitiendo con ello evaluar la eficiencia del proceso de reposición de placas y estimar el impacto del diseño propuesto en la reducción del tiempo de operación.

Para poder determinar los tiempos de montaje de placas filtrantes nuevas se tiene el siguiente diagrama de flujo.

Figura 43:

Flujo de procesos para montaje de placas filtrantes



Nota. Elaboración propia.

Con lo descrito, se tiene la siguiente ecuación que describe el tiempo de montaje de placas filtrantes:

$$t_m = t_{dy2} + t_{ai} + t_{ay2} + t_p + t_{dy1} + t_{ai} + t_{ay1} + t_r \quad (62)$$

Donde, t_p es el tiempo de posicionamiento del extractor de placas, t_{dy} es el tiempo de descenso del yugo, t_{ai} es el tiempo de activación del imán electro permanente, t_{ay} es el tiempo de ascenso del yugo y t_r es el tiempo de retorno del extractor de placas.

Mediante la ayuda del modelo 3D se detalla la siguiente tabla con valores de velocidades anteriormente determinados, distancias y tiempo calculados.

Tabla 16:

Determinación de tiempo de montaje de placas filtrantes

Parámetro	Símbolo	Velocidad [m/s]	Distancia [m]	Tiempo [s]
Descenso de yugo de izaje 2	t_{dy2}	0.133	3.1	23.31
Magnetización de imán electropermanente	t_{ai}	-	-	1
Ascenso de yugo de izaje 2	t_{ay2}	0.133	3.1	23.31
Posicionamiento promedio de extractor de placas	t_p	0.2	6.75	33.75
Descenso de yugo de izaje 1	t_{dy1}	0.133	2.4	18.05
Desmagnetización de imán electropermanente	t_{ai}	-	-	1
Ascenso de yugo de izaje 1	t_{ay1}	0.133	2.4	18.05
Retorno promedio de extractor de placas a posición inicial	t_r	0.2	6.75	33.75
Montaje promedio de placa filtrante	t_m	-	-	152.22

Nota: Elaboración propia

Por lo tanto, el tiempo promedio de montaje de las placas filtrantes nuevas es de 152.22 segundos (2.5 minutos).

CAPÍTULO IV. Resultados, Contrastación de Hipótesis y Discusión de Resultados

4.1. Resultados

4.1.1. *Determinación de carga de izaje*

La masa total por placa filtrante se determinó considerando el peso propio de la placa de polipropilenos, sus accesorios y los factores de seguridad operativos. El valor resultante permitió establecer la carga de izaje total, utilizada como entrada principal para el dimensionamiento del yugo de izaje, el carro extractor y el sistema electromagnético de sujeción. El valor obtenido es de 348 kg.

4.1.2. *Selección del sistema electromagnético*

El sistema electromagnético seleccionado presenta una capacidad de sujeción superior al 300% de la carga de diseño, cumpliendo con los factores de seguridad exigidos para manipuladores magnéticos destinados a izaje industrial. Además, al tratarse de un imán electropermanente, garantiza la ausencia de pérdida de sujeción ante fallas energéticas, manteniendo la placa asegurada incluso en condiciones de interrupción eléctrica. Esto, en conjunto con la eliminación de mecanismos de sujeción manual, contribuye a una reducción significativa del riesgo operativo y a una mayor seguridad para el personal encargado del cambio de placas filtrantes.

El modelo seleccionado es el ESPM125C de la marca Eclipse Magnetic.

Figura 44:

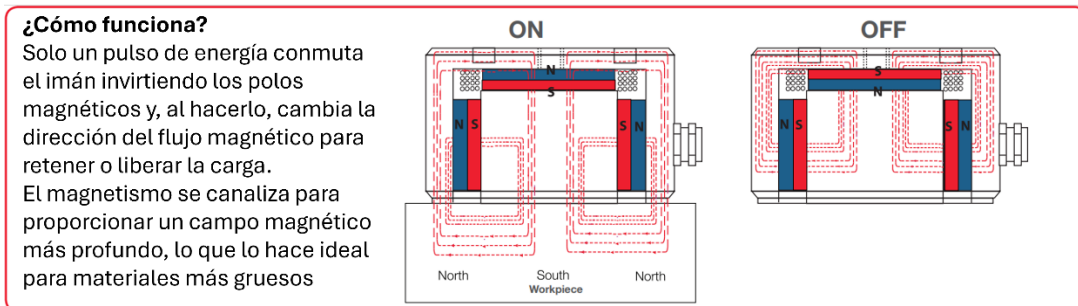
Imán electropermanente de la serie Optimag E



Nota: Tomado de <https://www.eclipsemagnetics.com/en-us/products/lifting-and-handling/optimag-e-electronically-activated-handling-system/>

Figura 45:

Principio de funcionamiento del imán electropermanente



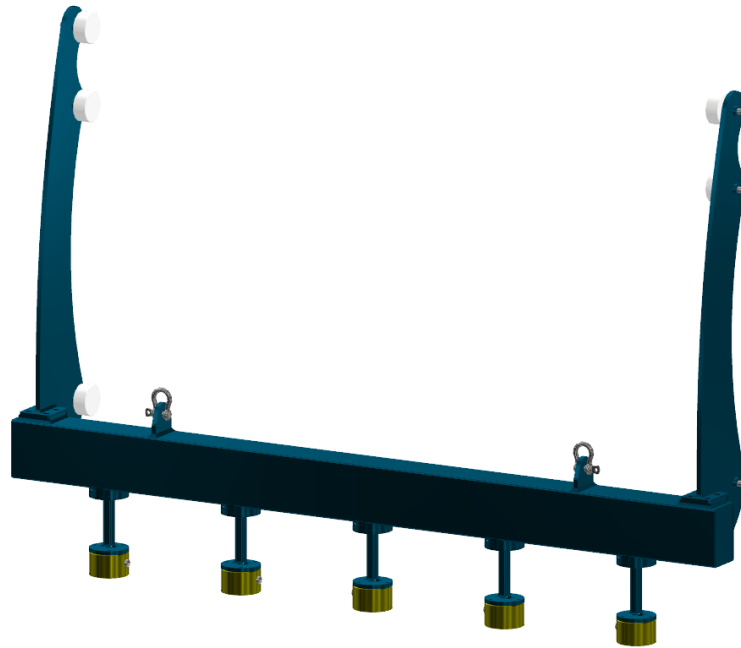
Nota: Adaptado de <https://www.eclipsemagnetics.com/en-us/products/lifting-and-handling/optimag-e-electronically-activated-handling-system/>

4.1.3. Diseño y cálculo de yugo de izaje

Los análisis realizados indican que el mayor esfuerzo equivalente de Von Mises es de 75.4 MPa, valor que permanece por debajo del límite de fluencia del acero utilizado. La deformación máxima obtenida fue de 0.4 mm, magnitud considerada adecuada para las condiciones normales de operación. Asimismo, el factor de seguridad mínimo calculado fue de 3.3, cumpliendo holgadamente con los criterios exigidos para equipos destinados a operaciones de izaje. Para información detallada, consultar el Anexo D.

Figura 46:

Modelo 3D de yugo de izaje



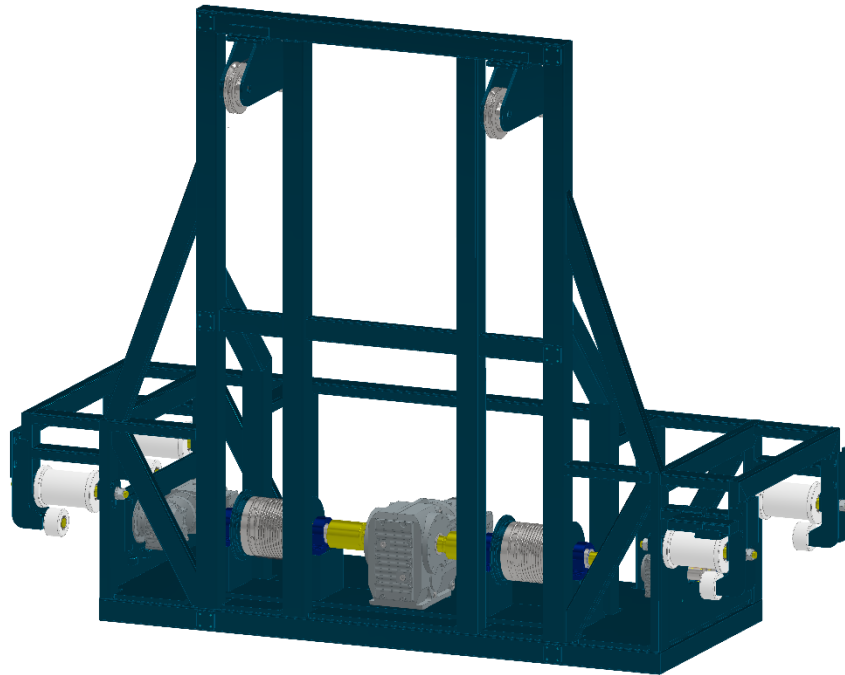
Nota. Elaboración propia.

4.1.4. Diseño y cálculo del bastidor principal

Los análisis realizados indican que el mayor esfuerzo equivalente de Von Mises es de 68.4 MPa, valor que permanece por debajo del límite de fluencia del acero utilizado. La deformación máxima obtenida fue de 0.2 mm, magnitud considerada adecuada para las condiciones normales de operación. Asimismo, el factor de seguridad mínimo calculado fue de 3.03, cumpliendo holgadamente con los criterios exigidos para equipos destinados a operaciones de izaje. Para información detallada, consultar el Anexo E.

Figura 47:

Modelo 3D de bastidor principal y componentes



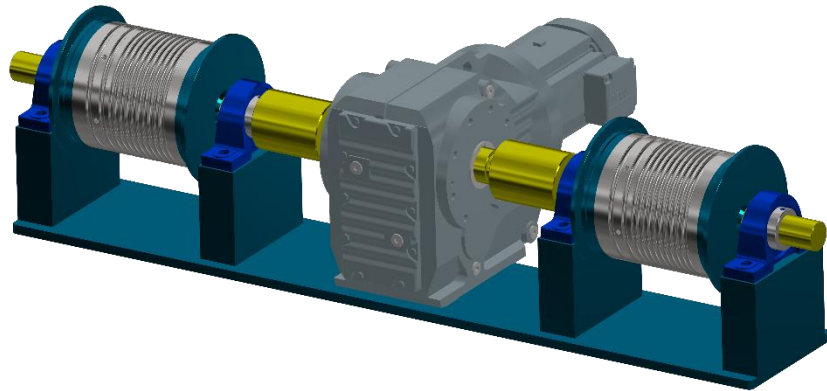
Nota. Elaboración propia.

4.1.5. Selección de motorreductor de izaje

El motorreductor seleccionado, modelo KA97DRN100L4/BE5 de la marca SEW EURODRIVE, supera ampliamente el torque requerido para la operación, trabajando con una demanda inferior al 60 % de su capacidad y asegurando un margen adecuado frente a efectos dinámicos. De igual manera, la configuración con reductor cónico y freno electromagnético *fail-safe* proporciona la robustez y seguridad necesarias para aplicaciones de izaje. En conjunto, este equipo cumple plenamente con los criterios de diseño, estabilidad y protección establecidos, garantizando un funcionamiento confiable del sistema.

Figura 48:

Modelo 3D de sistema de izaje



Nota. Elaboración propia.

Figura 49:

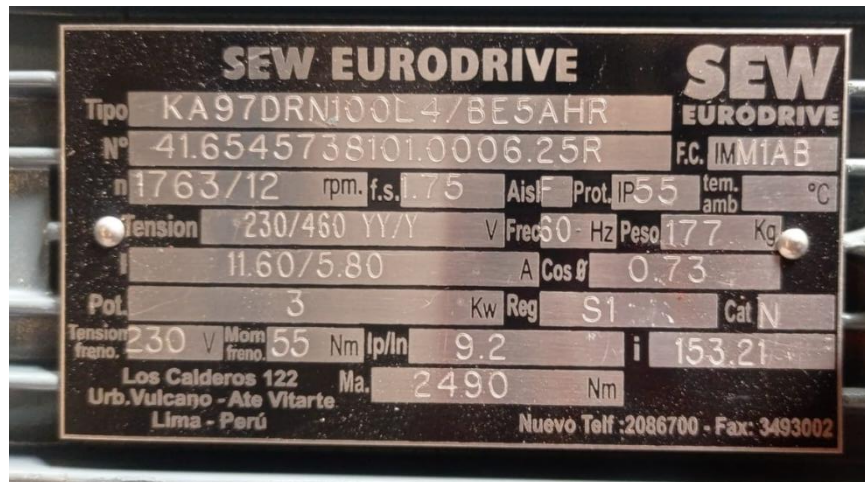
Motorreductor modelo KA97DRN100L4/BE5AHR



Nota. Elaboración propia.

Figura 50:

Placa de motorreductor de izaje



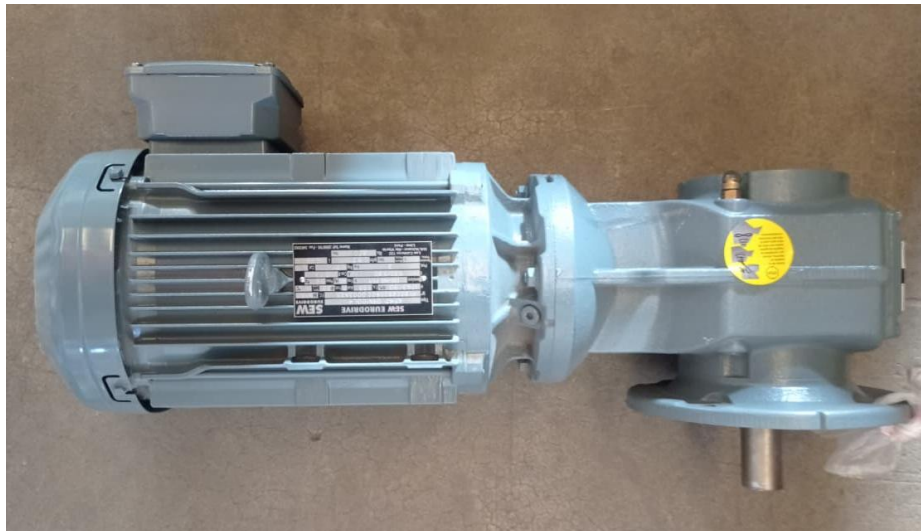
Nota. Elaboración propia.

4.1.6. Selección de motorreductor de desplazamiento

El desarrollo de los cálculos permitió determinar los esfuerzos de rodadura, el torque demandado por el piñón, la potencia requerida y la velocidad de operación del conjunto piñón–cremallera. Con estos parámetros, se verificó que el motorreductor KF47DRN100L4 de la marca SEW EURODRIVE cumple holgadamente con las condiciones de operación, conservando márgenes de seguridad apropiados tanto en par como en potencia. Esta elección asegura un desplazamiento uniforme, seguro y confiable del carro a lo largo de la viga carrilera. Se contempla la instalación de un motorreductor en la disposición izquierda y otro en la disposición derecha, siendo este último una configuración en espejo respecto al primero.

Figura 51:

Motorreductor KF47DRN100L4 de desplazamiento lado izquierdo



Nota. Elaboración propia.

Figura 52:

Placa de motorreductor de desplazamiento lado izquierdo



Nota. Elaboración propia.

Figura 53:

Motorreductor KF47DRN100L4 de desplazamiento lado derecho



Nota. Elaboración propia.

Figura 54:

Placa de motorreductor de desplazamiento lado derecho



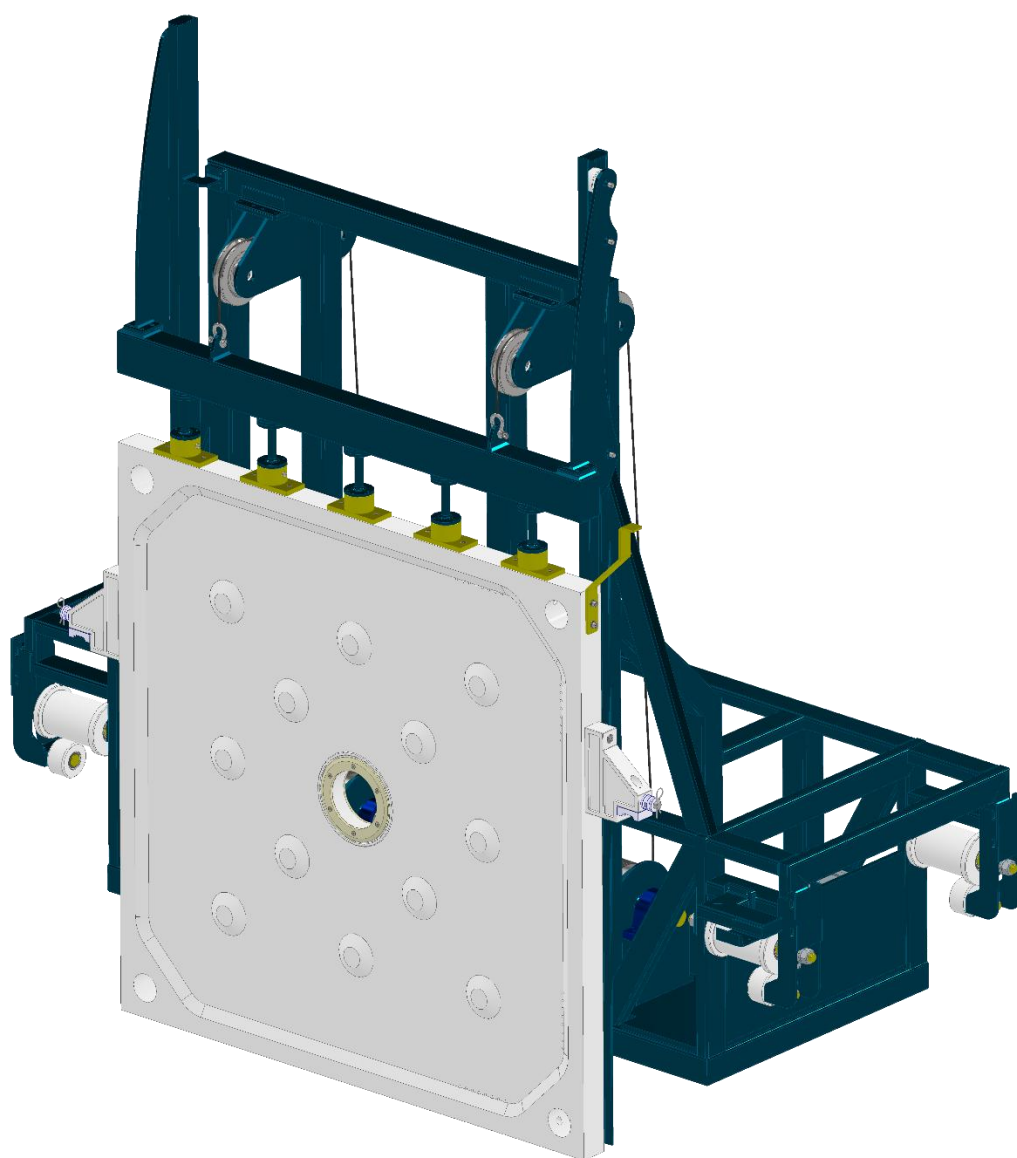
Nota. Elaboración propia.

4.1.7. Diseño de extractor de placas

Finalmente, se presenta el diseño del extractor de placas con todos sus componentes.

Figura 55:

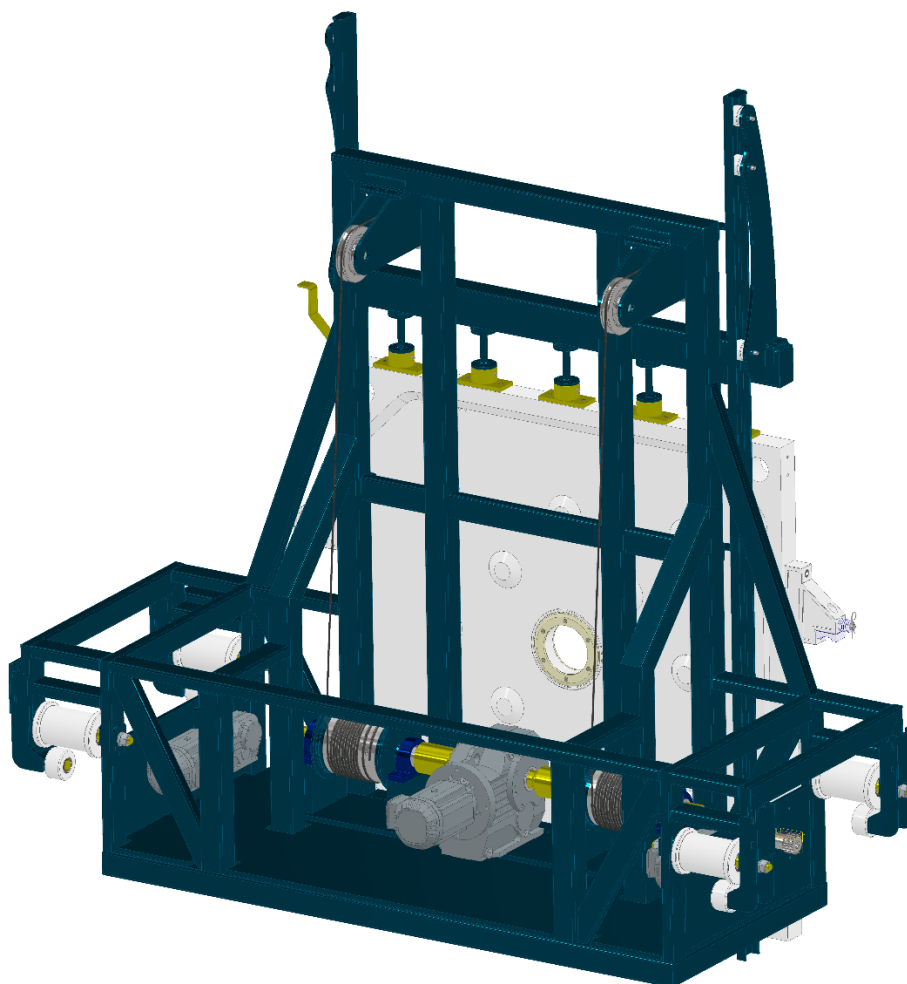
Vista isométrica de modelo 3D de extractor de placas



Nota. Elaboración propia.

Figura 56:

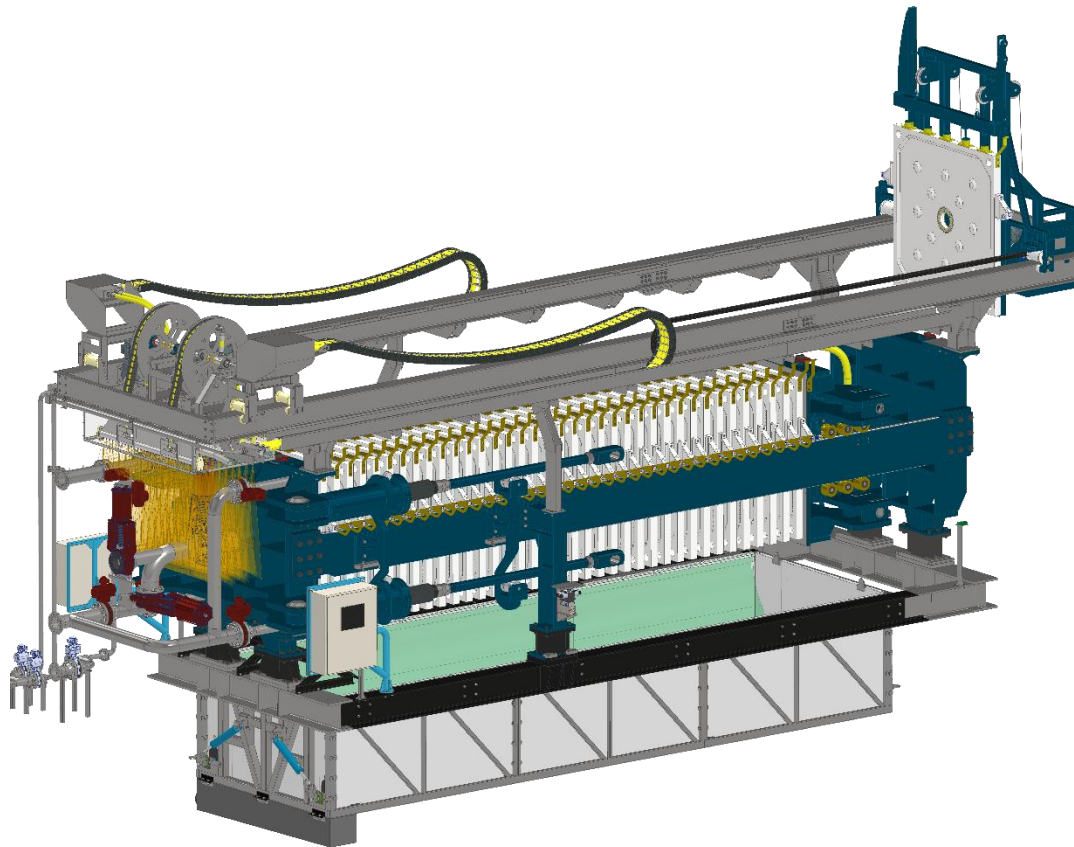
Vista isométrica posterior de modelo 3D de extractor de placas



Nota. Elaboración propia.

Figura 57:

Vista isométrica de filtro prensa con extractor de placas



Nota. Elaboración propia.

4.1.8. Tiempos de operación de extracción de placas filtrantes.

Con el fin de establecer una referencia cuantitativa del tiempo total requerido para realizar el cambio de un conjunto completo de placas filtrantes en el filtro prensa, se presenta a continuación la desagregación detallada de todas las actividades involucradas en el proceso actual. Para ello, cada operación se ha caracterizado según su duración promedio, la cantidad de placas intervenidas y el tiempo global resultante. Esta información permite identificar las actividades críticas que concentran la mayor carga operativa, así como cuantificar el tiempo total invertido en el procedimiento manual tradicional.

Los valores obtenidos constituyen la línea base para evaluar el impacto del sistema extractor de placas propuesto en la reducción del tiempo total de intervención.

Tabla 17:*Tiempo total de cambio completo de placas filtrantes con extractor de placas*

Actividad	Tiempo [min]	Cantidad de placas	Tiempo global [min]	Total [hr]
Traslado de nuevas placas al punto de trabajo	240	-	240	
Apertura de Filtro Prensa	2	-	2	
Desmontaje de distanciador de placas	1	37	37	
Desmontaje de placas filtrantes antiguas (1 placa en promedio)	2.5	37	92.5	
Colocación de telas filtrantes a placas nuevas	3	37	111	
Montaje de placas filtrantes nuevas (1 placa en promedio)	2.5	37	92.5	
Montaje de distanciador de placas	1	37	37	
Retiro de placas filtrantes usadas	120	-	120	
Orden y limpieza	60	-	60	
TOTAL	432		792	13.2

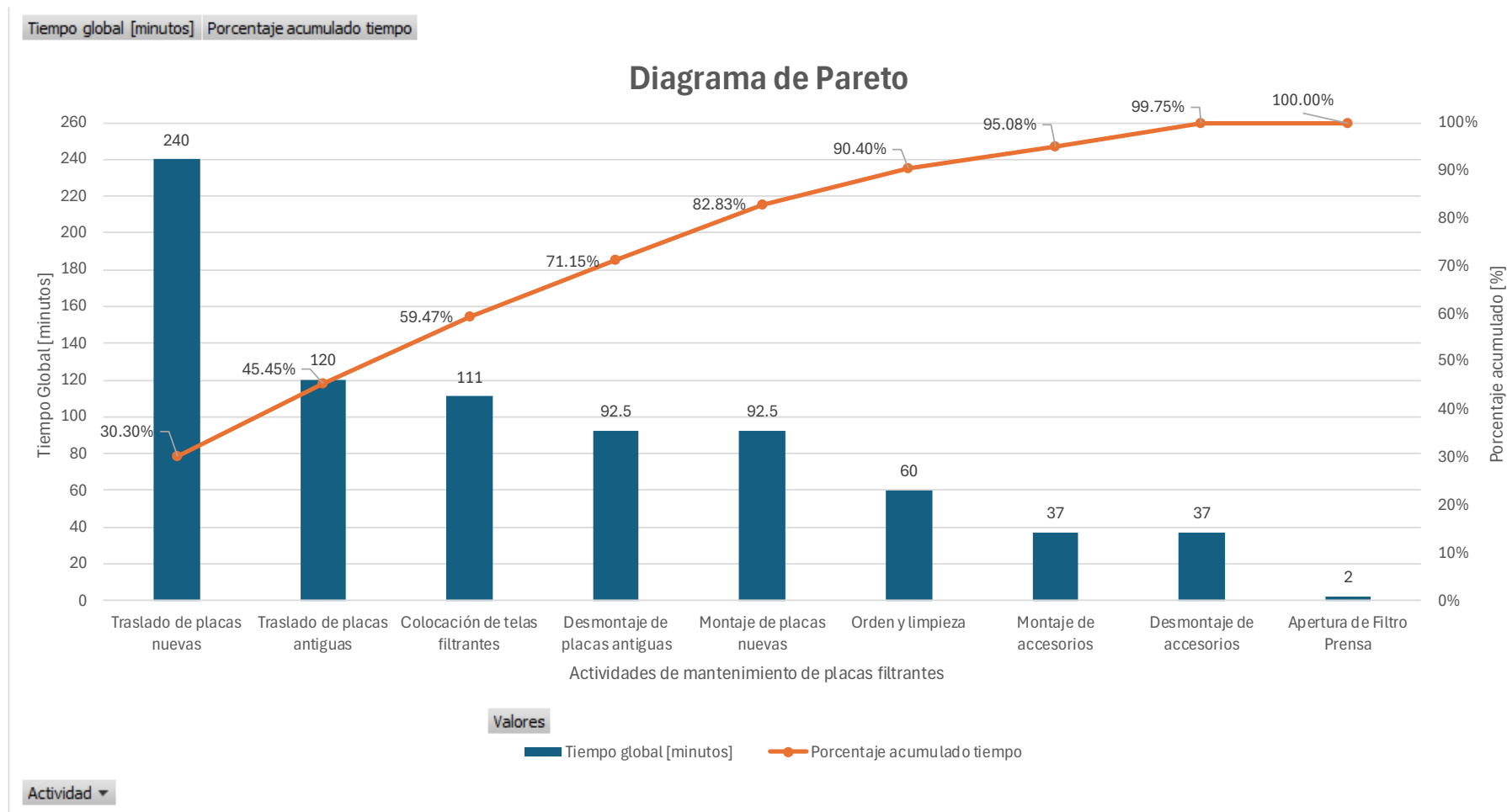
Nota. Elaboración propia.

En global se requiere 792 minutos (13.2 horas) la actividad de cambio de placas filtrantes en todo el filtro prensa 2000x2000-37. Esto implica una reducción del 50% de la actividad de desmontaje promedio de placa filtrante, una reducción del 75% de la actividad de montaje promedio de placa filtrante y una reducción del 44% de la actividad global de cambio de placas filtrantes en todo el filtro prensa de análisis.

Con la finalidad de identificar y priorizar las actividades que presentan mayor incidencia en el tiempo total del proceso de mantenimiento de placas filtrantes del filtro prensa, se elaboró un diagrama de Pareto utilizando como criterio el tiempo global de ejecución de cada actividad, permitiendo aplicar el principio 80/20 y determinar las etapas críticas que concentran la mayor parte del tiempo operativo.

Figura 58:

Diagrama de Pareto de actividades de cambio de placas filtrantes



Nota. Elaboración propia

El diagrama de Pareto permitió identificar que las actividades de traslado de placas nuevas, traslado de placas antiguas, colocación de telas y montaje de placas concentran aproximadamente el 83 % del tiempo total del proceso de mantenimiento del filtro prensa. Este resultado confirma que la implementación de un sistema electromecánico de extracción enfocado en la manipulación y posicionamiento de placas constituye la alternativa más efectiva para reducir el tiempo operativo total y mejorar la seguridad del proceso.

4.2. Contrastación de hipótesis

Con el fin de evaluar el impacto del sistema extractor de placas en la optimización del proceso de cambio de placas filtrantes, se realizó un análisis comparativo entre el tiempo total requerido antes y después de la implementación del sistema. Este análisis permite determinar si la mejora observada es atribuible al extractor y si dicha reducción del tiempo es estadísticamente significativa.

Para ello, se establece la siguiente hipótesis general:

Hipótesis de investigación (H_1): El uso de un sistema electromecánico para sujeción de placas sí reduce el tiempo de mantenimiento de filtros prensa.

Hipótesis nula (H_0): El uso de un sistema electromecánico para sujeción de placas no reduce el tiempo de mantenimiento de filtros prensa.

Los resultados experimentales muestran que el tiempo medio total del proceso se redujo de 1410 minutos (antes) a 792 minutos (después), lo que representa una disminución del 44 % del tiempo global de cambio de placas. Esta reducción evidencia una mejora sustancial en los tiempos de mantenimiento del filtro prensa. En consecuencia, se acepta la hipótesis de investigación (H_1) y se rechaza la hipótesis nula (H_0).

La selección de los imanes electropermanentes demostró ser un factor determinante para asegurar un proceso eficiente y seguro durante la extracción y el cambio de placas filtrantes. Su capacidad para mantener una fuerza de retención estable, incluso ante variaciones de carga y posición, permitió garantizar un agarre confiable de las placas,

reduciendo riesgos operativos y evitando interrupciones en la maniobra. Asimismo, la elección de un modelo con características magnéticas y geométricas adecuadas contribuyó a estandarizar el tiempo de izaje y manipulación, lo que se refleja directamente en la mejora del tiempo total de operación. Por ello, la adecuada selección de los imanes electropermanentes sí asegura un proceso eficiente y seguro en la extracción y cambio de placas filtrantes.

El diseño estructural del bastidor principal y del yugo de izaje, evaluado mediante el análisis de esfuerzos de flexión, cortante y esfuerzos equivalentes de Von Mises, permitió garantizar la resistencia y seguridad del sistema extractor durante su funcionamiento. La verificación estructural confirmó que las tensiones máximas se mantuvieron dentro de los límites admisibles del material, evitando riesgos de deformación permanente o falla por fatiga. Esto asegura que la estructura soporte trabajo de manera confiable bajo las condiciones reales de operación, contribuyendo a un proceso continuo, seguro y sin interrupciones. Por tal motivo, el correcto diseño del bastidor principal y el yugo de izaje del sistema extractor mediante esfuerzos de flexión, cortantes y equivalente de Von Mises sí garantiza un funcionamiento seguro del sistema.

Finalmente, el dimensionamiento de los motorreductores del sistema extractor permitió alcanzar una combinación óptima entre torque disponible y velocidad de operación. Esta selección no solo garantizó un desplazamiento uniforme y controlado del extractor durante las etapas de posicionamiento, izaje y retorno, sino que también contribuyó directamente a la reducción del tiempo de ciclo. Al disponer de una potencia y relación de reducción apropiadas, los motorreductores lograron ejecutar las maniobras con mayor estabilidad y precisión, eliminando sobrecargas innecesarias y asegurando un rendimiento operativo consistente a lo largo del proceso. Por lo tanto, el dimensionamiento adecuado de los motorreductores del sistema extractor sí permite disminuir los tiempos de operación en el cambio de placas filtrantes.

4.3. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran una reducción significativa del tiempo total de cambio de placas, pasando de 1410 minutos a 792 minutos, equivalente a una mejora del 44 %. Este resultado se encuentra en línea con lo evidenciado en los trabajos previos analizados, donde las mejoras en diseño, ergonomía y mecanismos de izaje tienen un impacto directo en la eficiencia operativa.

En primer lugar, los hallazgos de la investigación se relacionan con lo expuesto por (Miranda, 2019), quien señala que en los filtros prensa de placas de polipropileno, las telas filtrantes constituyen uno de los elementos de mayor desgaste y rotación, por lo que el proceso de cambio debe realizarse con eficiencia y bajo condiciones de seguridad. La reducción del tiempo total obtenida en esta tesis coincide con la importancia operacional destacada por Miranda, confirmando que intervenciones en el proceso de mantenimiento, como el uso de un sistema extractor especializado, contribuyen a optimizar la disponibilidad del equipo y disminuir la exposición del personal.

Asimismo, los resultados también guardan coherencia con lo planteado por (Huayta, 2019), quien demuestra que la implementación de sistemas mecánicos de izaje mejora sustancialmente los tiempos de trabajo y reduce riesgos ergonómicos para el operario. En el presente estudio, el uso de un extractor automatizado con motorreductores dimensionados adecuadamente permite obtener un desempeño similar: disminución del tiempo de operación, reducción del esfuerzo físico del operario y mejora en la seguridad del proceso. Ello refuerza la conclusión de que los sistemas de izaje diseñados con criterios mecánicos adecuados generan mejoras sustanciales en procesos repetitivos y de alta manipulación.

Finalmente, los hallazgos se ven respaldados por los aportes de (Batchuluun, 2016), quien evidencia que la manipulación de placas de filtro prensa constituye una actividad crítica y riesgosa en la industria minera. Su estudio identifica la carencia de sistemas estandarizados y propone alternativas para evitar maniobras peligrosas como el uso improvisado de eslingas.

En esta tesis, la implementación de imanes electropermanentes y un yugo diseñado estructuralmente bajo criterios de seguridad responde a la misma necesidad identificada por Batchuluum: reducir la exposición del operario y mejorar la confiabilidad de la operación. Aunque Batchuluum descarta el uso de electroimanes por su dependencia energética, la solución de esta investigación utiliza imanes electropermanentes, que no requieren energía continua para mantener la fuerza de retención, superando precisamente la limitación identificada en dicho antecedente.

En conjunto, la comparación con estos estudios previos permite afirmar que los resultados obtenidos en esta tesis no solo son coherentes con la literatura técnica disponible, sino que además aportan una alternativa innovadora y más segura para el izaje de placas filtrantes en filtros prensa utilizados en minería.

Conclusiones

El sistema extractor con imanes electropermanentes demostró ser altamente efectivo, logrando reducir el tiempo total del proceso de cambio de placas filtrantes de 1410 min a 792 min, lo que representa una reducción del 44 %. Esta reducción confirma que el diseño del método de izaje, el control del movimiento y la automatización parcial del proceso influyen directamente en la eficiencia operativa. El procedimiento permite estandarizar las maniobras y disminuir variaciones asociadas al trabajo manual.

El imán electropermanente seleccionado (modelo: ESPM125C) cumplió los requisitos operativos de carga, ofreciendo una fuerza de sujeción de 2.45 kN cada uno de los cinco, suficiente para manipular placas filtrantes de polipropileno de 2 m × 2 m. Las pruebas y cálculos realizados mostraron un factor de seguridad aproximado de $FS = 3.07$ para el izaje estático, garantizando adherencia, distribución y estabilidad incluso ante pequeñas excentricidades. Además, al tratarse de un sistema electropermanente, la capacidad de retención independiente de la alimentación eléctrica incrementa la seguridad al evitar pérdidas de sujeción por fallas de energía.

El bastidor principal y el yugo de izaje, contruidos con perfiles de 100×100×4.5 mm y 50×100×4.5 mm, presentaron tensiones máximas por debajo del límite admisible del acero estructural. El análisis de flexión, cortante y Von Mises permitió verificar factores de seguridad $FS = 3.3$ para el yugo y $FS = 3.03$ para el bastidor principal, confirmando que la estructura trabaja con holgura suficiente para cargas estáticas y dinámicas del proceso. La geometría del yugo desarrollada proporciona rigidez y minimiza deformaciones, lo que asegura un adecuado alineamiento durante el izaje y mejora la vida útil de los componentes.

La selección del motorreductor para izaje (modelo KA97DRN100L4/BE5) y los dos de desplazamiento horizontal (modelo KF47DRN100L4) confirmó que ambos cumplen los requerimientos dinámicos y estáticos del sistema, proporcionando pares de 2490 N·m y 320 N·m, respectivamente, con factores de servicio de 1.75 y 1.25, en el mismo orden. El análisis

de aceleración y desaceleración evidenció que los perfiles de arranque controlado mantienen los esfuerzos transitorios dentro de los límites permisibles del bastidor y del yugo, asegurando la continuidad operacional sin riesgo de sobrecarga mecánica. Asimismo, la holgura disponible entre la capacidad efectiva de los motorreductores y el par máximo exigido por la operación permite una reserva operativa del 44% en izaje y del 66% en desplazamiento, lo que garantiza confiabilidad a largo plazo frente a variaciones en masa izada, fricción o desgaste del sistema.

Recomendaciones

Se recomienda implementar un programa de operación y mantenimiento que asegure la continuidad de los tiempos reducidos obtenidos y preserve la integridad estructural y funcional del sistema a lo largo de su vida útil. Esto incluye capacitaciones periódicas para estandarizar las maniobras, la verificación anual de los valores de fuerza de adherencia y torque disponibles, así como la revisión de desgaste en mecanismos de izaje y desplazamiento para garantizar que los factores de seguridad se mantengan dentro de los márgenes calculados.

Tener en consideración realizar inspecciones semestrales del modelo ESPM125C para confirmar que la fuerza efectiva de retención se mantiene dentro del rango operativo. Adicionalmente, se aconseja verificar las superficies metálicas adheridas a las placas filtrantes para asegurar ausencia de desgaste, corrosión o deformaciones que puedan afectar la eficiencia de sujeción.

Conviene efectuar un monitoreo periódico de deformaciones mediante galgas o mediciones comparativas, especialmente en zonas críticas donde se alcanzaron tensiones máximas cercanas al límite admisible. Debido a que los factores de seguridad obtenidos permiten operar con holgura, se sugiere conservar los mismos espesores y geometrías en futuras ampliaciones o réplicas del sistema, manteniendo así rigidez adecuada y comportamientos predecibles ante cargas dinámicas.

Finalmente, se aconsejable mantener una supervisión continua del comportamiento térmico y vibracional del motorreductor de izaje y los dos motorreductores de desplazamiento. Dado que el sistema cuenta con reservas operativas, se sugiere conservar los perfiles de aceleración y desaceleración establecidos, evitando modificaciones que incrementen esfuerzos transitorios. Asimismo, se recomienda programar un mantenimiento predictivo basado en horas de operación para preservar la confiabilidad del sistema frente a variaciones en masa, fricción o desgaste.

Referencias

- Alexander, C. K., & Sadiku, M. N. (2016). *Fundamentals of Electric Circuits* (7ma ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- American Institute of Steel Construction. (2016). *Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-16)*. Chicago: IL: AISC.
- American Society for Testing and Materials. (2023). *ASTM A500/A500M - Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Rounds and Shapes*. ASTM.
- American Society of Mechanical Engineers. (2018). *ASME B30.5-2018: Mobile and Locomotive Cranes*. ASME.
- American Society of Mechanical Engineers. (2020). *ASME BTH-1–2020: Design of below-the-hook lifting devices*. ASME.
- American Society of Mechanical Engineers. (2023). *ASME B30.30 Ropes: Safety Standard for Cableways, Cranes, Derricks, Hoists, Hooks, Jacks and Slings*. ASME.
- American Society of Mechanical Engineers. (2025). *ASME B30.20-2025: Below-the-Hook Lifting Devices*. ASME.
- Batchuluun, B. (2016). *Development of New Lifting Equipment for VPA plates*. Tesis de título profesional, Uppsala. Obtenido de <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-287646>
- Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazureck, D. F. (2015). *Mechanics of materials* (7ma ed.). New York: McGraw-Hill.
- Biolight SPA. (s.f.). *Biolight SPA*. Obtenido de Filtro de tambor rotatorio: <https://biolight.cl/filtro-de-tambor-rotatorio/>

- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2015). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (10ma ed.). New York: McGraw-Hill.
- Chapman, S. J. (2012). *Máquinas eléctricas* (6ta ed.). McGraw-Hill.
- Chen, Z., Sun, H., & Zhao, X. (2016). *Permanent Magnet Materials and their Applications*. Springer.
- Cheremisinoff, N. P. (2002). *Handbook of Water and Wastewater Treatment Technology*. Butterworth-Heinemann.
- Coey, M. D. (2002). Permanent magnet applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 248(3), 441-456. doi:[https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)00335-9](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00335-9)
- Cullity, B. D., & Graham, C. D. (2008). *Introduction to Magnetic Materials* (2da ed.). Wiley-IEEE press.
- De Dietrich Process Systems. (s.f.). *De Dietrich Process Systems*. Obtenido de Filtros secadores tipo Nutsche: <https://www.dedietrich.com/es/soluciones/productos/nutsche-agitado-filtro-secador>
- Diemme Filtration. (s.f.). *Diemme Filtration*. Obtenido de Filtro prensa de viga superior GHT-F: <https://www.diemmefiltration.com/es/filtros-prensa/filtro-prensa-ght-f/>
- Eclipse Magnetics. (2014). *Magnetic lifting & handling systems*. Eclipse Magnetics Ltd.
- European Committee for Standardization. (2020). *Cranes - Safety - Non-fixed load lifting attachments (EN 13155:2020)*. CEN.
- Gere, J. M., & Goodno, B. J. (2012). *Mechanics of materials*. Boston: Cengage Learning.
- Griffiths, D. J. (2013). *Introduction to Electrodynamics*. Pearson.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walter, J. (2014). *Fundamentals of Physics* (10ma ed.). Wiley.

- Huayta, S. (2019). *Diseño de Estructura para Levante de Carga de dos Toneladas para Taller de Mantenimiento*. Tesis de bachiller, Universidad Continental, Arequipa. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12394/9060>
- International Electrotechnical Commission. (2017). *IEC 60404: Magnetic materials - Methods of measurement*. IEC.
- International Electrotechnical Commission. (2019). *Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance (IEC 60034-1)*. IEC.
- International Organization for Standardization. (2013). *ISO 9927-1: Cranes - Inspections - Part 1: General*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2016). *ISO 13001-3: Cranes - General design - Part 3: Limit states and proof of competence of machinery*. ISO.
- Jackson, J. D. (1999). *Classical Electrodynamics*. Wiley.
- KASAG Swiss AG. (s.f.). KASAG Swiss AG. Obtenido de Filtro de capas horizontales Radium: <https://www.kasag.com/es/producto/tecnica-de-filtracion-de-productos-tecnica-de-filtrado-filtros-de-superficie-torta-de-filtro-filtro-de-placas-horizontales-radium/>
- Ministerio de Energía y Minas. (2024). *Plataforma digital única del estado peruano*. Obtenido de Anuario minero 2024: <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/6827926-anuario-minero-2024>
- Miranda, C. C. (2019). *Diseño de un Plan de Mantenimiento Basado en la Estrategia RCM para un Filtro Prensa Relave que Opera en una Mina Ubicada a 4800 M.S.N.M.* Tesis de título profesional, Universidad de Ingeniería y Tecnología, Lima. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12815/122>
- National Electrical Manufacturers Association. (2014). *Motors and Generators Standard (MG-1)*. NEMA.

Nilson, J., & Riedel, S. (2020). *Electric Circuits*. New York: Pearson.

Occupational Safety and Health Administration. (2011). *29 CFR 1910.179: Overhead and gantry cranes*. OSHA.

O'Handley, R. C. (2000). *Modern Magnetic Materials: Principles and applications*. Wiley.

Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2014). *Physics for Scientists and Engineers*. Cengage Learning.

Sharplex Filters India Pvt. Ltd. (s.f.). *Sharplex*. Obtenido de Vertical Pressure Leaf Filter: <https://www.sharplex.com/spanish/vertical-pressure-leaf-filter.htm>

Svarovsky, L. (2000). *Solid-liquid Separation* (4ta ed.). Londres, Inglaterra: Butterworth-Heinemann.

The International Electrotechnical Commission. (2014). *IEC 60034-30: Efficiency classes of line operated AC motors*. IEC.

Tipler, P. A., & Mosca, G. (2008). *Physics for Scientists and Engineers*. New York: W. H. Freeman and Company.

Wakeman, R., & Tartelon, E. (2005). *Solid Liquid Separation: Scale-up of Industrial Equipment*. Oxford: Elsevier Advance Technology.

Anexos

Anexo A: Ficha técnica de modelos de imanes de serie Optimag E	1
Anexo B: Ficha técnica de motorreductor de izaje seleccionado	2
Anexo C: Ficha técnica de motorreductores de desplazamiento seleccionado	3
Anexo D: Informe de análisis de tensión de yugo de izaje	4
Anexo E: Informe de análisis de tensión de bastidor principal	16
Anexo F: Catálogo de imanes de Eclipse Magnetic.....	33
Anexo G: Fabricación de estructura metálica de bastidor principal.....	37

Anexo A:

Ficha técnica de modelos de imanes de serie Optimag E

Product Number	Load profile	Swl* (kg)	Dim. A (mm)	Dim. B (mm)	Dim. C (mm)	Dim. D (mm)	Unit weight (kg)	Rating @ 240v
ESPM80C	Flat	85	80	55	N/A	N/A	1.5	3.1
ESPM100C	Flat	150	105	55	N/A	N/A	3	4.4
ESPM125C	Flat	250	130	80	N/A	N/A	5.7	4.4
ESPM150C	Flat	400	155	80	N/A	N/A	8	11.5
Rectangular								
ESPM284	Flat	42	N/A	83	40	80	1.4	2.8
ESPM286	Flat	49	N/A	83	60	80	1.9	5.6
ESPM2166	Flat	97	N/A	83	60	160	3.8	11.4
ESPM2246	Flat	146	N/A	83	60	240	5.9	14.3
ESPM2117H	Flat	300	N/A	130	75	170	11	10
ESPM2257H	Flat	450	N/A	130	75	250	16.5	16
ESPM2347H	Flat	600	N/A	130	75	340	22	20

Anexo B:

Ficha técnica de motorreductor de izaje seleccionado



Ilustración similar

Motorreductor cónico KA97DRN100L4/BE5/TF

Designación catálogo	KA97DRN100L4/BE5/TF
Velocidad nominal del motor	1763 1/min
Velocidad de salida	12 1/min
Índice de reducción total	153,21
Par de salida	2490 Nm
Par de salida máximo permitido	4300 Nm
Solo para usuarios registrados	1,75
Salida permitida con carga radial n=1400	40000 N
Potencia del motor	3 kW
Par de frenado	40 Nm

Más datos de catálogo del diseño estándar

Posición de montaje*	M1
Capa de recubrimiento/de base*	Estandar
Posición de conexión/caja de bornas*	0
Entrada de cable/ Posición del conector*	X
Eje hueco*	70 mm
Diámetro de la brida*	-
Par de motor	16 Nm
Factor de duración cíclica	S1-100%
Clase eficiente	IE3
Eficiencia (50/75/100% Pn)	87,63/89,3/89,5 %
Tensión del motor*	460 V
Frecuencia	60 Hz
Corriente nominal	5,8 A
Cos Phi	0,73
Clase de aislamiento*	155(F)
Grado de aislamiento*	IP54
Especificación de diseño	IEC60034 (sin CE)
Momento de inercia de masa del motor	0,01176 kgm²
Peso neto motorreductor (reductor sin aceite)	170,9 kg
Voltaje del freno*	230 V
mando del freno*	BGE
Sensor de temperatura*	TF - 3 PTC termistores (sin unidad de activación)

*Puede ajustar el valor en el configurador de productos.

Potencia recomendada del variador de frecuencia

Potencia recomendada del variador de frecuencia	3 kW
---	------

Sus datos de referencia

Su ref. del proyecto	Filtro Prensa 2000x2000-36
Su aplicación	Extractor de placas filtrantes
Su n° de material	

Información adicional

Datos CAD del accionamiento

Documentación técnica

Disponibilidad	 Disponible
Tiempo de entrega *	3-5 Semanas

*Los cambios en la configuración de este producto pueden influir en el plazo de entrega. Posibilidad de montaje rápido bajo petición.

Datos de su aplicación

Aplicación	Grúa
Modo operativo	Funcionamiento con variador
País/zona de utilización	Otros países (IEC 60Hz)
Masa	970 kg
Contrapeso	0 kg
Diámetro	250 mm
Velocidad	0,133 m/s
Tiempo de aceleración	1 s
Transmisión de engranaje	1
Eficiencia de sistema	65 %

Datos cargados calculados

Potencia estática	1,95 kW
Potencia dinámica	0,0264 kW
Máximo	1,97 kW
Configurador de productos (SSC).	1829 Nm
Par de aplicación dinámico	24,8 Nm
Módulo de energía modular MOVIDRIVE®	1854 Nm
Inercia externa	15,16 kgm²
Velocidad de salida	10,2 1/min

Detalles sobre la recomendación

Utilización de reductor	 43%
Máxima utilización del motor	 62%
Utilización de motor estático	 79%
Máxima utilización del motor	1854,1 Nm
Par de motor máximo	14,8 Nm
MOVIONE® DR2CA.	12,7 Nm
Velocidad motor	1557 1/min
Relación de los momentos de inercia de masa	0,05 ✓
Par de frenado para par de aplicación estático	793 % ✓

Anexo C:

Ficha técnica de motorreductores de desplazamiento seleccionado



Ilustración similar

Motorreductor cónico KF47DRN100L4/TF

Designación catálogo	KF47DRN100L4/TF
Velocidad nominal del motor	1763 1/min
Velocidad de salida	90 1/min
Índice de reducción total	19.58
Par de salida	320 Nm
Par de salida máximo permitido	430 Nm
Factor de servicio SEW	1.35
Salida permitida con carga radial n=1400	4490 N
Potencia del motor	3 kW

Más datos de catálogo del diseño estándar

Posición de montaje*	M1
Capa de recubrimiento/de base*	Estandar
Posición de conexión/caja de bornas*	0
Entrada de cable/ Posición del conector*	X
Eje de salida*	30x60 mm
Diámetro de la brida*	200 mm
Par de motor	16 Nm
Factor de duración cíclica	S1-100%
Clase eficiente	IE3
Eficiencia (50/75/100% Pn)	87,6/89,3/89,5 %
Tensión del motor*	440-460 V
Frecuencia	60 Hz
Corriente nominal	5.8 A
Cos Phi	0.73
Clase de aislamiento*	155(F)
Grado de aislamiento*	IP54
Especificación de diseño	Europa (CE)/USA (UR)/Canada(CSA)
Momento de inercia de masa del motor	0.01116 kgm ²
Peso neto motorreductor (reductor sin aceite)	55 kg
Sensor de temperatura*	TF - 3 PTC termistores (sin unidad de activación)

*Puede ajustar el valor en el configurador de productos.

Potencia recomendada del variador de frecuencia

Potencia recomendada del variador de frecuencia	3 kW
---	------

Sus datos de referencia

Su ref. del proyecto	Filtro Prensa 2000x2000-37
Su aplicación	Sistema extractor de placas
Su n° de material	

Información adicional

Datos CAD del accionamiento

Documentación técnica

Disponibilidad	 Disponible
Tiempo de entrega *	3-5 Semanas

*Los cambios en la configuración de este producto pueden influir en el plazo de entrega. Posibilidad de montaje rápido bajo petición.

Datos de su aplicación

Aplicación	Carro
Modo operativo	Funcionamiento con variador
País/zona de utilización	Global (60 Hz) - selección a 60 Hz
Masa	3500 kg
diámetro de rueda portadora	72 mm
Velocidad	0.3 m/s
Tiempo de aceleración	0.5 s
Factor de fricción	0.06
Transmisión de engranaje	1
Eficiencia de sistema	60 %

Datos cargados calculados

Potencia estática	1.03 kW
Potencia dinámica	1.05 kW
Máximo	2.08 kW
Configurador de productos (SSC).	123 Nm
Par de aplicación dinámico	126 Nm
Módulo de energía modular MOVIDRIVE®	250 Nm
Inercia externa	4.537 kgm ²
Velocidad de salida	79.6 1/min

Detalles sobre la recomendación

Utilización de reductor	 58%
Máxima utilización del motor	 70%
Utilización de motor estático	 41%
Máxima utilización del motor	249.6 Nm
Par de motor máximo	16.9 Nm
MOVIONE® DR2CA.	6.6 Nm
Velocidad motor	1558 1/min
Relación de los momentos de inercia de masa	1.06 

Anexo D:

Informe de análisis de tensión de yugo de izaje

Informe de análisis de tensión de yugo de izaje

Archivo analizado:	6.5.1. Estructura metálica yugo.iam
Versión de Autodesk Inventor:	2026.1 (Build 301233020, 233B)
Fecha de creación:	3/12/2025, 01:26
Autor del estudio:	Joseph Avalos
Resumen:	

Análisis estático:1

Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Fecha de la última modificación	3/12/2025, 01:25
Estado de modelo	[Principal]
Vista de diseño	Default
Posicional	[Principal]
Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	Sí
Separar tensiones en superficies de contacto	Sí
Análisis de cargas de movimiento	No

iProperties

Resumen

Autor	javalos
-------	---------

Proyecto

Nº de pieza	6.3
Diseñador	javalos
Coste estimado	S/0.00
Fecha de creación	18/07/2025

Estado

Estado del diseño	Trabajo en curso
-------------------	------------------

Propiedades físicas

Masa	38.0926 kg
Área	2187140 mm ²
Volumen	4852560 mm ³

Centro de gravedad	x=0.0000371336 mm y=-4.79272 mm z=-0.00000206047 mm
--------------------	---

Nota: los valores físicos pueden ser diferentes de los valores físicos utilizados por CEF indicados a continuación.

Configuración de malla:

Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.1
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	No
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

Material(es)

Nombre	Acero ASTM A500	
General	Densidad de masa	7.85 g/cm ³
	Límite de elasticidad	248.225 MPa
	Resistencia máxima a tracción	399.9 MPa
Tensión	Módulo de Young	199.959 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.3 su
	Módulo cortante	76.9073 GPa
Nombre(s) de pieza	Reference Skeleton DIN EN 10210-2 150 x 100 x 4 - 2000	
Nombre	Acero ASTM A36	
General	Densidad de masa	7.85 g/cm ³
	Límite de elasticidad	248.225 MPa
	Resistencia máxima a tracción	399.9 MPa
Tensión	Módulo de Young	199.959 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.3 su
	Módulo cortante	76.9073 GPa
Nombre(s) de pieza	6.5.6. Brida carro guía.ipt 6.5.2. Horquilla izaje.ipt 6.5.7. Tapa.ipt 6.5.5. Brida de sujetador de iman.ipt	

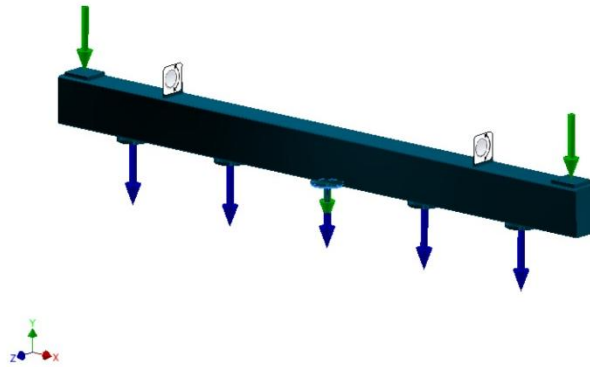
Condiciones de funcionamiento

Fi:2

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	737.500 N
Vector X	0.000 N
Vector Y	-737.500 N

Vector Z	-0.000 N
----------	----------

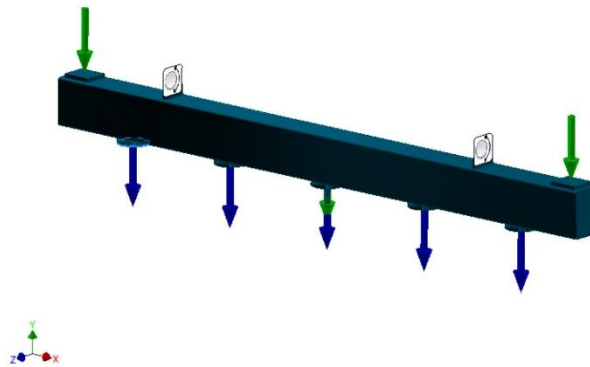
Cara(s) seleccionada(s)



Fi:1

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	737.500 N
Vector X	0.000 N
Vector Y	-737.500 N
Vector Z	-0.000 N

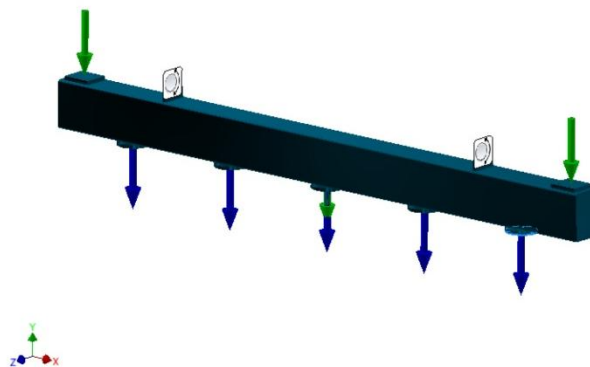
Cara(s) seleccionada(s)



Fi:4

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	737.500 N
Vector X	0.000 N
Vector Y	-737.500 N
Vector Z	-0.000 N

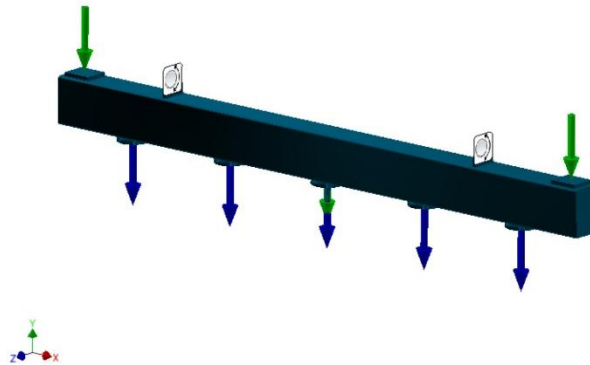
Cara(s) seleccionada(s)



Gravedad

Tipo de carga	Gravedad
Magnitud	9810.000 mm/s ²
Vector X	0.000 mm/s ²
Vector Y	-9810.000 mm/s ²
Vector Z	0.000 mm/s ²

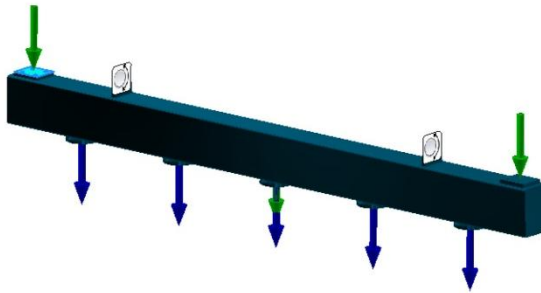
Cara(s) seleccionada(s)



Fc

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	98.100 N
Vector X	0.000 N
Vector Y	-98.100 N
Vector Z	-0.000 N

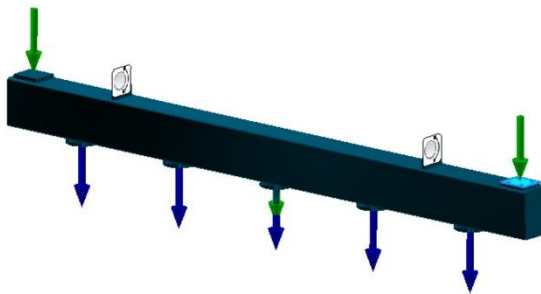
Cara(s) seleccionada(s)



Fc:1

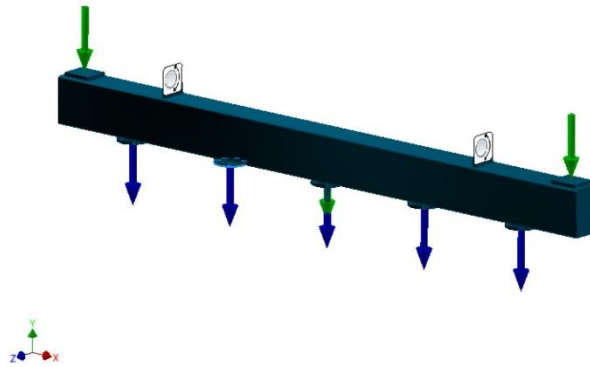
Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	98.100 N
Vector X	-0.000 N
Vector Y	-98.100 N
Vector Z	-0.000 N

Cara(s) seleccionada(s)



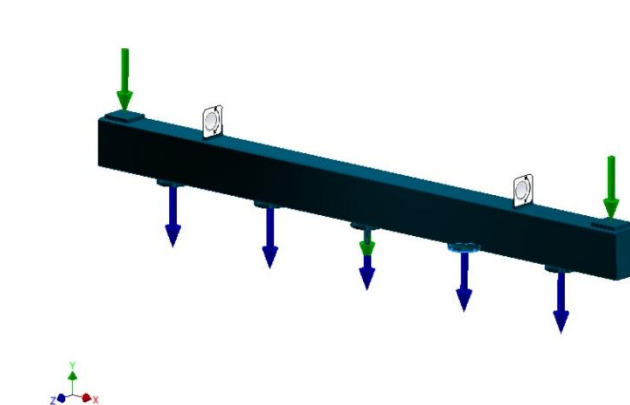
Fi

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	737.500 N
Vector X	-0.000 N
Vector Y	-737.500 N
Vector Z	-0.000 N

Cara(s) seleccionada(s)**Fi:3**

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	737.500 N
Vector X	-0.000 N
Vector Y	-737.500 N
Vector Z	0.000 N

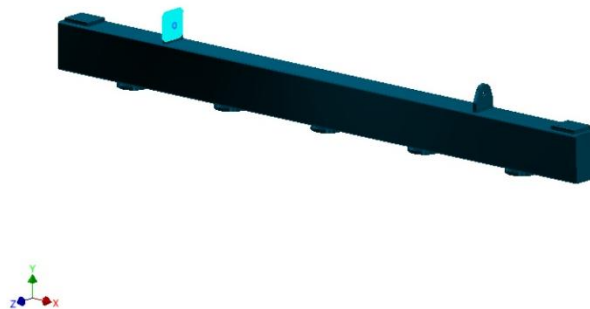
Cara(s) seleccionada(s)



Restricción de pasador:1

Tipo de restricción	Restricción de pasador
Fijar dirección radial	Sí
Fijar dirección axial	Sí
Fijar dirección tangencial	No

Cara(s) seleccionada(s)



Restricción de pasador:2

Tipo de restricción	Restricción de pasador
Fijar dirección radial	Sí
Fijar dirección axial	Sí
Fijar dirección tangencial	No

Cara(s) seleccionada(s)



Resultados

Fuerza y pares de reacción en restricciones

Nombre de la restricción	Fuerza de reacción		Pares de reacción	
	Magnitud	Componente (X, Y, Z)	Magnitud	Componente (X, Y, Z)
Restricción de pasador:1	2139.54 N	-239.914 N	8.13765 N m	0 N m
		2126.04 N		0.0236583 N m
		0 N		-8.13762 N m
Restricción de pasador:2	2139.61 N	240.524 N	8.20168 N m	0 N m
		2126.05 N		-0.0110796 N m
		0 N		8.20167 N m

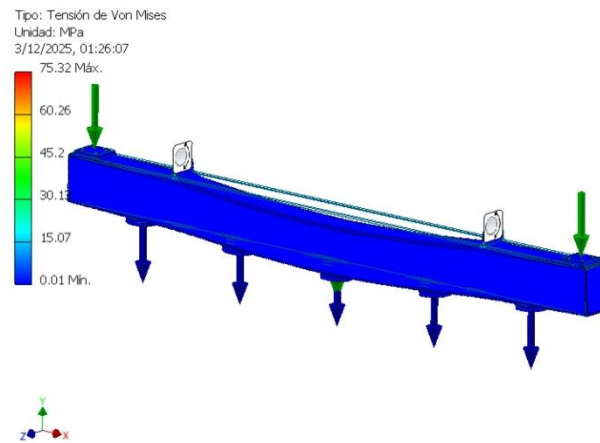
Resumen de resultados

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	4798590 mm ³	
Masa	37.6689 kg	

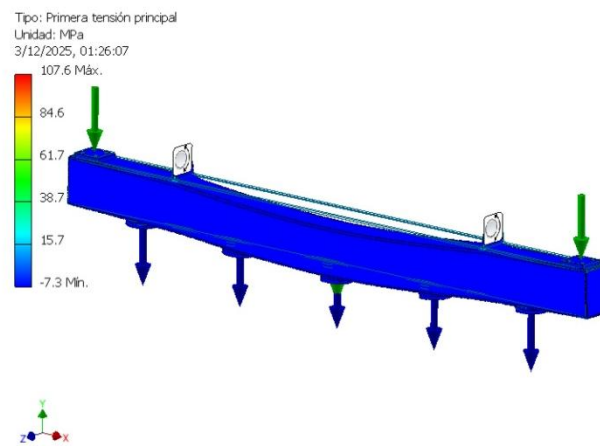
Tensión de Von Mises	0.00717854 MPa	75.3247 MPa
Primera tensión principal	-7.30433 MPa	107.635 MPa
Tercera tensión principal	-43.4897 MPa	24.7543 MPa
Desplazamiento	0.00000725914 mm	0.0388432 mm
Coefficiente de seguridad	3.29539 su	15 su

Figuras

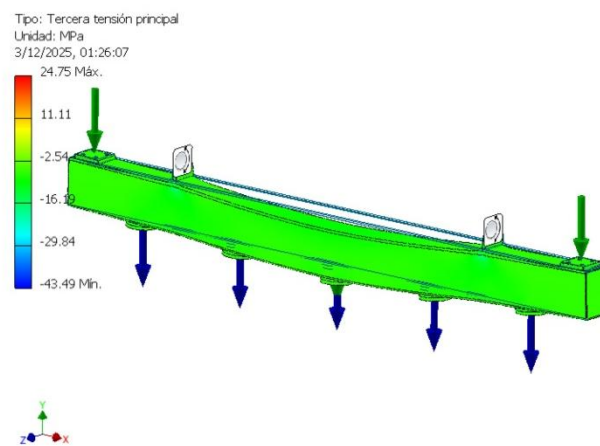
Tensión de Von Mises



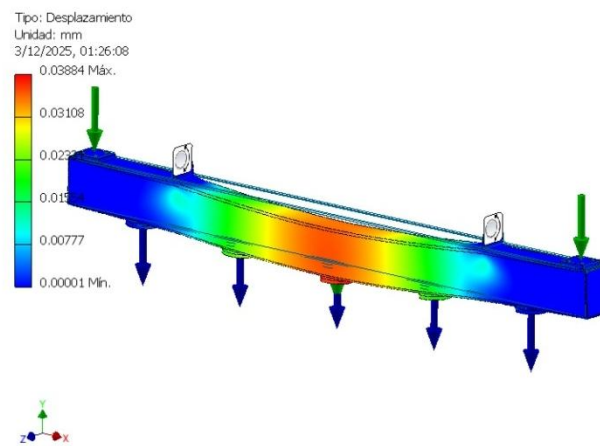
Primera tensión principal



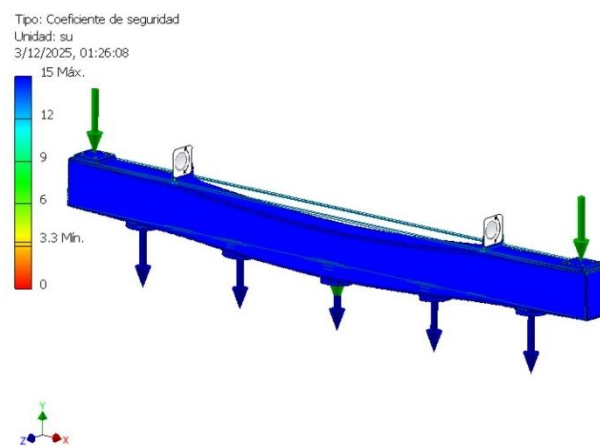
Tercera tensión principal



Desplazamiento



Coefficiente de seguridad



Anexo E:

Informe de análisis de tensión de bastidor principal

Informe de análisis de tensión de estructura de bastidor principal

Archivo analizado:	6.2.1. Estructura metálica bastidor.iam
Versión de Autodesk Inventor:	2026.1 (Build 301233020, 233B)
Fecha de creación:	3/12/2025, 02:57
Autor del estudio:	jsp

Análisis estático:1

Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Fecha de la última modificación	3/12/2025, 02:50
Estado de modelo	[Principal]
Vista de diseño	Default
Posicional	[Principal]
Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	Sí
Separar tensiones en superficies de contacto	Sí
Análisis de cargas de movimiento	No

iProperties

Resumen

Título	
Autor	javalos

Proyecto

Nº de pieza	6.1.1. Estructura metálica bastidor
Diseñador	javalos
Coste estimado	S/0.00

Propiedades físicas

Masa	1027.94 kg
Área	40723200 mm ²
Volumen	130947000 mm ³
Centro de gravedad	x=1.14906 mm y=437.457 mm z=69.0022 mm

Nota: los valores físicos pueden ser diferentes de los valores físicos utilizados por CEF indicados a continuación.

Configuración de malla:

Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.1
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	No
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

Material(es)

Nombre	Acero	
General	Densidad de masa	7.85 g/cm ³
	Límite de elasticidad	207 MPa
	Resistencia máxima a tracción	345 MPa
Tensión	Módulo de Young	210 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.3 su
	Módulo cortante	80.7692 GPa
Nombre(s) de pieza	ISO 10799-2 100x100x4 - 2590 ISO 10799-2 100x100x4 - 1100 ISO 10799-2 100x100x4 - 2600 ISO 10799-2 100x50x4 - 395 ISO 10799-2 100x50x4 - 310 ISO 10799-2 100x50x4 - 310 ISO 10799-2 100x50x4 - 310 ISO 10799-2 100x50x4 - 1100 ISO 10799-2 100x50x4 - 1100 ISO 10799-2 100x50x4 - 1100 ISO 10799-2 100x100x4 - 970.71 ISO 10799-2 100x50x4 - 310 ISO 10799-2 100x50x4 - 775 ISO 10799-2 100x50x4 - 350 ISO 10799-2 100x50x4 - 775 ISO 10799-2 100x50x4 - 350 ISO 10799-2 100x50x4 - 350 ISO 10799-2 100x50x4 - 350 ISO 10799-2 100x50x4 - 395 ISO 10799-2 100x50x4 - 310 ISO 10799-2 100x50x4 - 310 ISO 10799-2 100x50x4 - 310 ISO 10799-2 100x50x4 - 310 ISO 10799-2 100x100x4 - 707.11 ISO 10799-2 100x100x4 - 707.11 ISO 10799-2 100x100x4 - 2500 ISO 10799-2 100x100x4 - 2500 ISO 10799-2 100x50x4 - 400 ISO 10799-2 100x100x4 - 1700 ISO 10799-2 100x50x4 - 2490 ISO 10799-2 100x50x4 - 400 ISO 10799-2 100x100x4 - 725 ISO 10799-2 100x100x4 - 725 ISO 10799-2 100x100x4 - 2600	

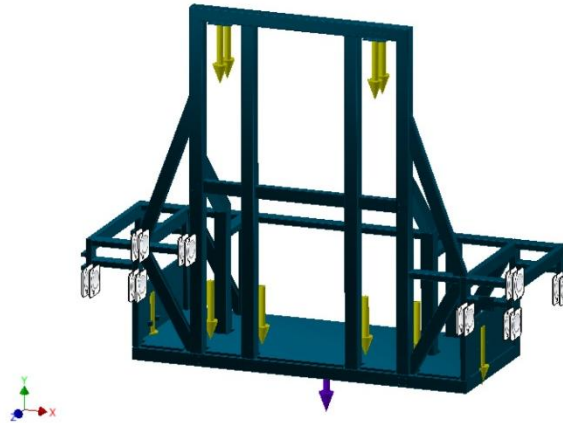
	ISO 10799-2 100x50x4 - 775 ISO 10799-2 100x50x4 - 775 ISO 10799-2 100x100x4 - 970.71 ISO 10799-2 100x50x4 - 1100 ISO 10799-2 100x100x4 - 2590 ISO 10799-2 100x100x4 - 1100	
Nombre	Acero ASTM A500	
General	Densidad de masa	7.85 g/cm ³
	Límite de elasticidad	248.225 MPa
	Resistencia máxima a tracción	399.9 MPa
Tensión	Módulo de Young	199.959 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.3 su
	Módulo cortante	76.9073 GPa
Nombre(s) de pieza	ISO 10799-2 100x50x4 - 300 ISO 10799-2 100x50x4 - 300 ISO 10799-2 100x50x4 - 300 ISO 10799-2 100x50x4 - 300 ISO 10799-2 100x50x4 - 825.59 ISO 10799-2 100x50x4 - 825.59 ISO 10799-2 100x50x4 - 1262.76 ISO 10799-2 100x50x4 - 700 ISO 10799-2 100x50x4 - 1262.76 ISO 10799-2 100x50x4 - 825.59 ISO 10799-2 100x50x4 - 900 ISO 10799-2 100x50x4 - 825.59 ISO 10799-2 100x50x4 - 900 ISO 10799-2 100x100x4 - 900 ISO 10799-2 100x100x4 - 900 ISO 10799-2 100x100x4 - 900 ISO 10799-2 100x100x4 - 900	
Nombre	Acero ASTM A36	
General	Densidad de masa	7.85 g/cm ³
	Límite de elasticidad	248.225 MPa
	Resistencia máxima a tracción	399.9 MPa
Tensión	Módulo de Young	199.959 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.3 su
	Módulo cortante	76.9073 GPa
Nombre(s) de pieza	6.2.12. Brida soporte riel guía.ipt 6.2.9. Placa refuerzo rueda.ipt 6.2.16. Ángulo soporte poleas.ipt 6.2.3. Plancha lateral.ipt 6.2.13. Soporte guiador.ipt 6.2.15. Brida soporte cadena.ipt 6.2.7. Tope regulación.ipt Plancha.ipt	

Condiciones de funcionamiento

Gravedad

Tipo de carga	Gravedad
Magnitud	9810.000 mm/s ²
Vector X	0.000 mm/s ²
Vector Y	-9810.000 mm/s ²
Vector Z	0.000 mm/s ²

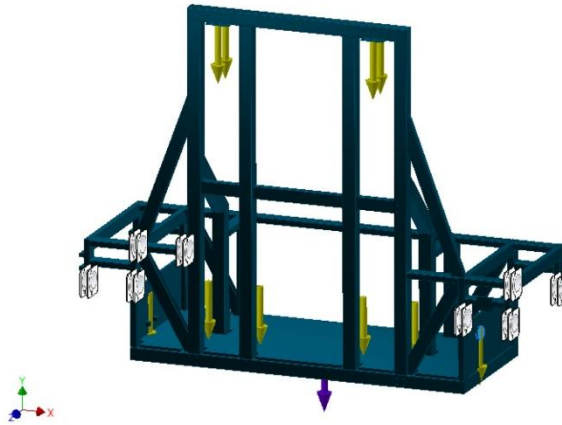
Cara(s) seleccionada(s)



Fuerza:2

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	785.000 N
Vector X	-785.000 N
Vector Y	0.000 N
Vector Z	-0.000 N

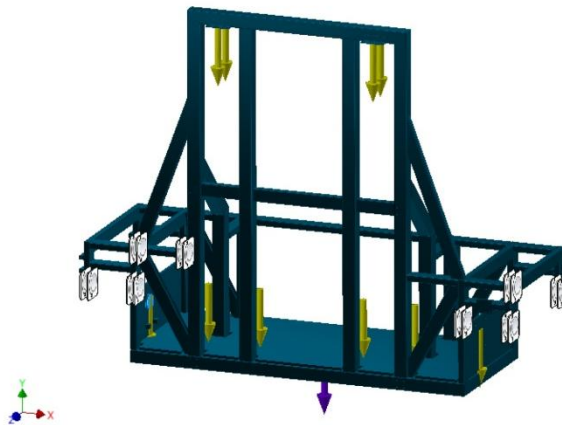
Cara(s) seleccionada(s)



Fuerza:3

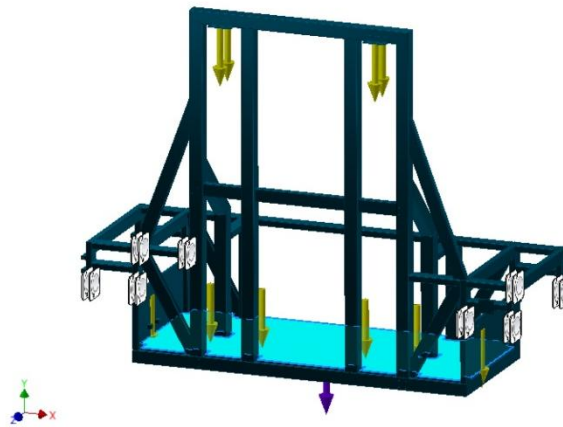
Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	785.000 N
Vector X	-785.000 N
Vector Y	0.000 N
Vector Z	-0.000 N

Cara(s) seleccionada(s)



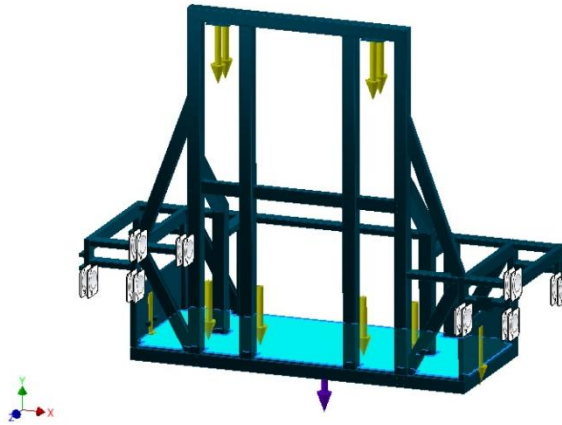
Fuerza remota:1

Tipo de carga	Fuerza remota
Magnitud	2208.000 N
Vector X	0.000 N
Vector Y	-2208.000 N
Vector Z	0.000 N
Punto remoto X	-400.000 mm
Punto remoto Y	69.000 mm
Punto remoto Z	250.000 mm

Cara(s) seleccionada(s)**Fuerza remota:2**

Tipo de carga	Fuerza remota
Magnitud	2208.000 N
Vector X	0.000 N
Vector Y	-2208.000 N
Vector Z	0.000 N
Punto remoto X	400.000 mm
Punto remoto Y	69.000 mm
Punto remoto Z	250.000 mm

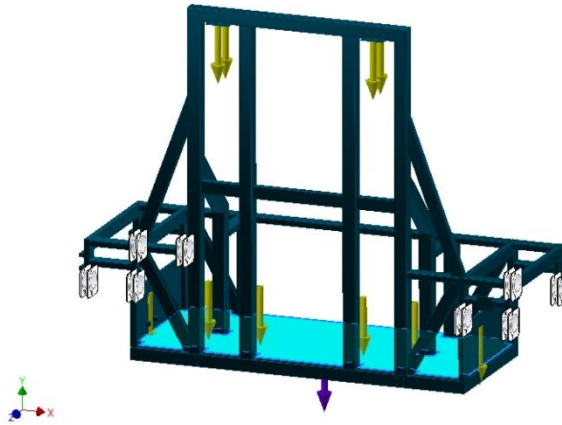
Cara(s) seleccionada(s)



Fuerza remota:3

Tipo de carga	Fuerza remota
Magnitud	2208.000 N
Vector X	0.000 N
Vector Y	-2208.000 N
Vector Z	0.000 N
Punto remoto X	800.000 mm
Punto remoto Y	69.000 mm
Punto remoto Z	250.000 mm

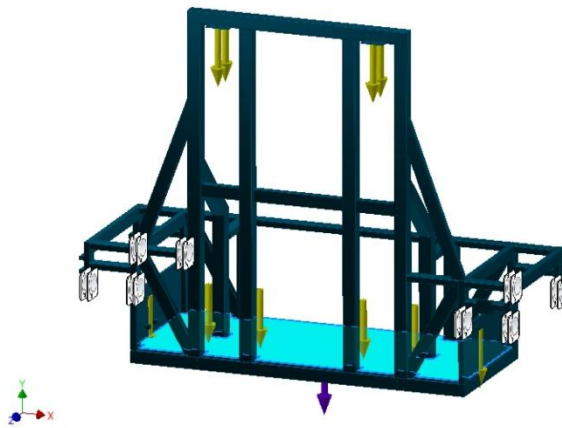
Cara(s) seleccionada(s)



Fuerza remota:4

Tipo de carga	Fuerza remota
Magnitud	2208.000 N
Vector X	0.000 N
Vector Y	-2208.000 N
Vector Z	0.000 N
Punto remoto X	-800.000 mm
Punto remoto Y	69.000 mm
Punto remoto Z	250.000 mm

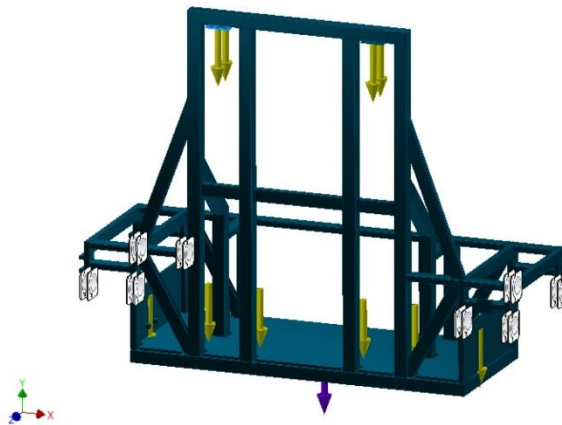
Cara(s) seleccionada(s)



Fuerza:1

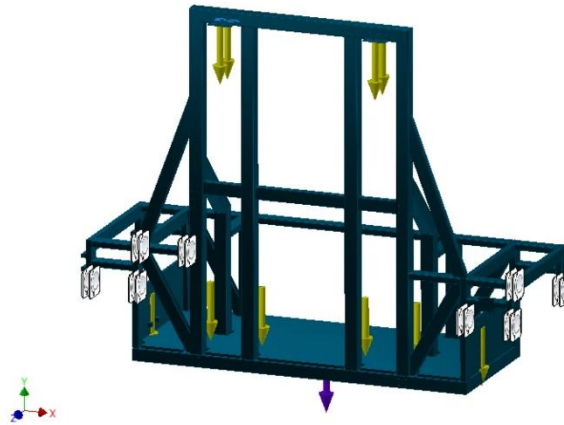
Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	2114.000 N
Vector X	0.000 N
Vector Y	-2114.000 N
Vector Z	0.000 N

Cara(s) seleccionada(s)



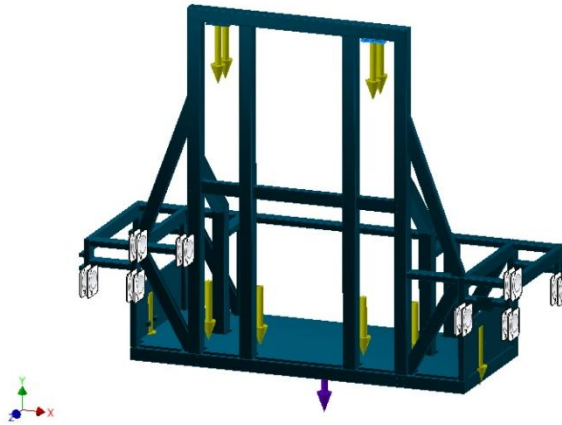
Fuerza:4

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	2114.000 N
Vector X	0.000 N
Vector Y	-2114.000 N
Vector Z	0.000 N

Cara(s) seleccionada(s)**Fuerza:5**

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	2114.000 N
Vector X	-0.000 N
Vector Y	-2114.000 N
Vector Z	0.000 N

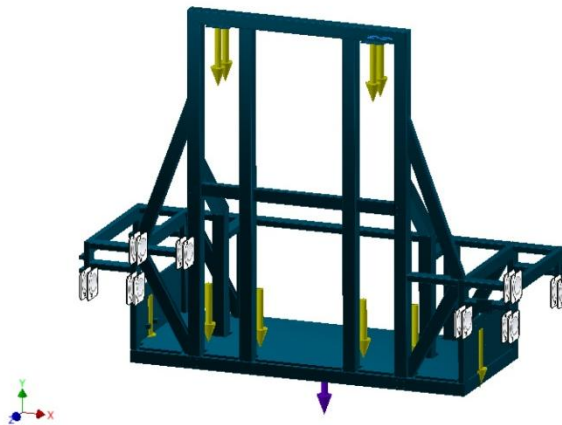
Cara(s) seleccionada(s)



Fuerza:6

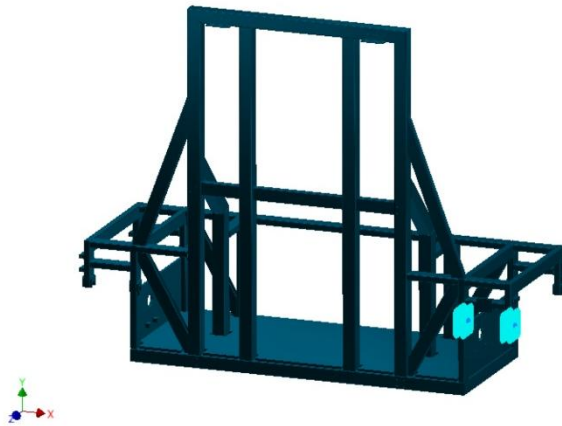
Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	2114.000 N
Vector X	-0.000 N
Vector Y	-2114.000 N
Vector Z	0.000 N

Cara(s) seleccionada(s)



Restricción de pasador:1

Tipo de restricción	Restricción de pasador
Fijar dirección radial	Sí
Fijar dirección axial	Sí
Fijar dirección tangencial	No

Cara(s) seleccionada(s)**Restricción de pasador:2**

Tipo de restricción	Restricción de pasador
Fijar dirección radial	Sí
Fijar dirección axial	Sí
Fijar dirección tangencial	No

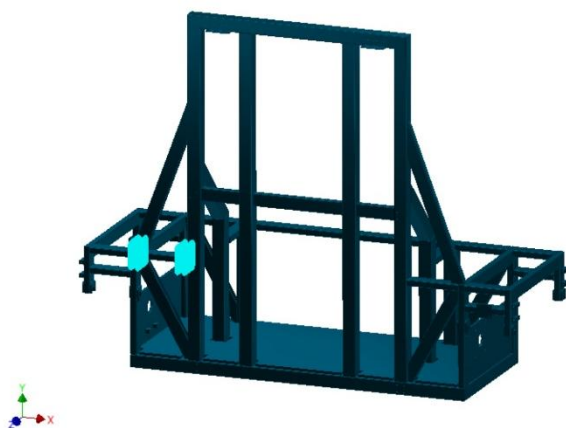
Cara(s) seleccionada(s)



Restricción de pasador:3

Tipo de restricción	Restricción de pasador
Fijar dirección radial	Sí
Fijar dirección axial	Sí
Fijar dirección tangencial	No

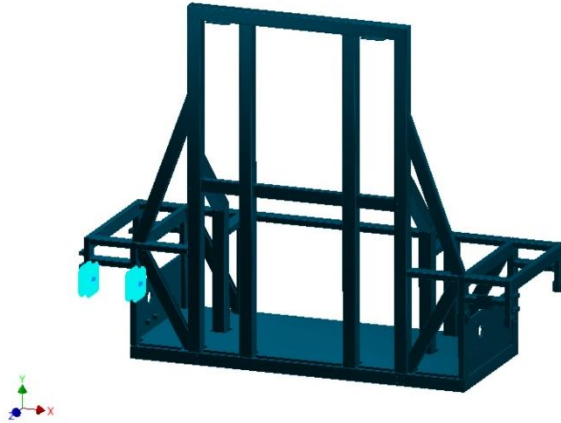
Cara(s) seleccionada(s)



Restricción de pasador:4

Tipo de restricción	Restricción de pasador
Fijar dirección radial	Sí
Fijar dirección axial	Sí
Fijar dirección tangencial	No

Cara(s) seleccionada(s)



Resultados

Fuerza y pares de reacción en restricciones

Nombre de la restricción	Fuerza de reacción		Pares de reacción	
	Magnitud	Componente (X, Y, Z)	Magnitud	Componente (X, Y, Z)
Restricción de pasador:1	10420.2 N	714.296 N	2076.77 N m	0 N m
		10395.4 N		35.4313 N m
		80.918 N		-2076.47 N m
Restricción de pasador:2	3270.32 N	-7.51641 N	627.877 N m	0 N m
		3269.32 N		-23.5579 N m
		-80.356 N		-627.435 N m
Restricción de pasador:3	3268.7 N	9.2183 N	627.742 N m	0 N m
		3267.81 N		22.8285 N m
		-75.764 N		627.327 N m
Restricción de pasador:4	10410.5 N	-706.45 N	2084.23 N m	0 N m
		10386.2 N		-34.6416 N m

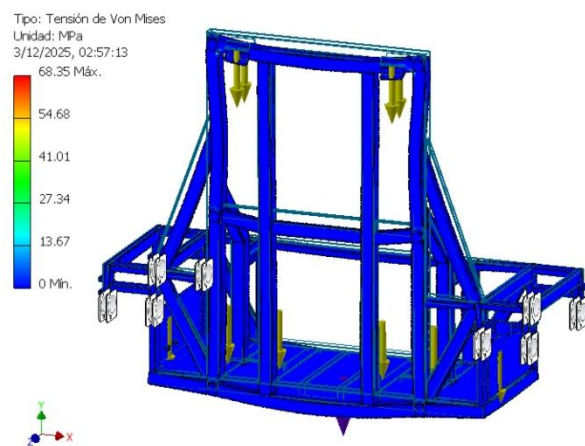
	75.2332 N	2083.94 N m
--	-----------	-------------

Resumen de resultados

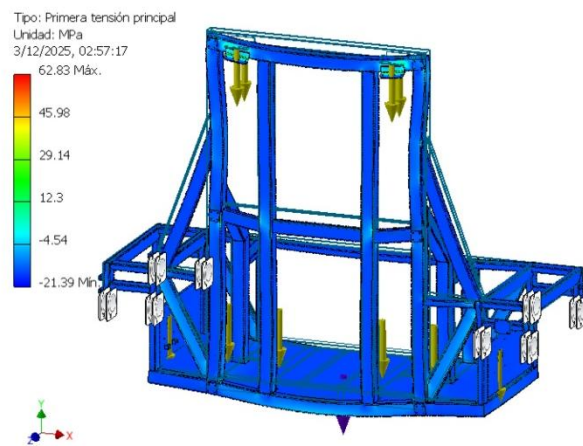
Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	130947000 mm ³	
Masa	1027.93 kg	
Tensión de Von Mises	0.000109123 MPa	68.3531 MPa
Primera tensión principal	-21.3865 MPa	62.8255 MPa
Tercera tensión principal	-83.8795 MPa	18.7466 MPa
Desplazamiento	0.0000000618946 mm	0.198406 mm
Coefficiente de seguridad	3.02839 su	15 su

Figuras

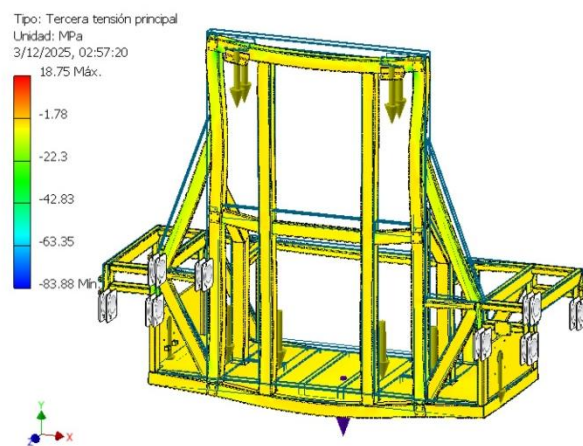
Tensión de Von Mises



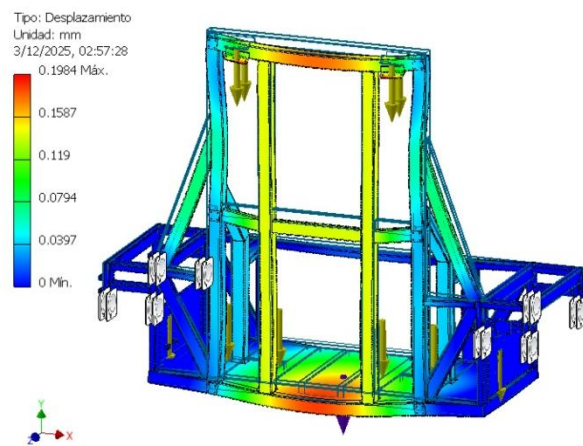
Primera tensión principal



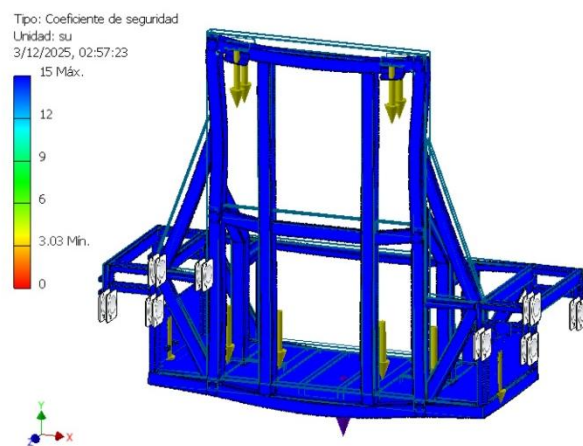
Tercera tensión principal



Desplazamiento



Coefficiente de seguridad



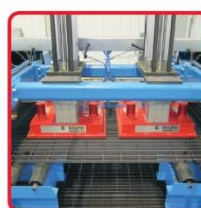
Anexo F:

Catálogo de imanes de Eclipse Magnetic



Magnetic Lifting & Handling Systems

Safe & efficient handling for manufacturing and assembly lines.



Innovative Magnetic Solutions

Optimum Lifting & Handling Solutions

Important considerations when choosing your product

Permanent Lifters



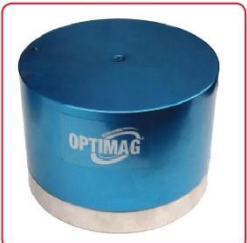
Manually Switchable Permanent Magnet

Optimag E



Electronically Switchable Permanent Magnet (ESPM)

Optimag P



Pneumatically Switchable Permanent Magnet (PSPM)

Product Selector

A guide on how to use our standard products. Please speak to our sales department for more information.

Product Type	Page	Material shape		Recommended material thickness inches						Surface	
		Flat	Round	0.04-0.16	0.20-0.31	0.31-0.47	0.47-0.79	0.79 +	1.97 +	Bright	Black
UL+ Lifters	9	✓	✓					✓		✓	
LM Lifters	11	✓	✓					✓		✓	
TP Lifters	12	✓			✓	✓	✓	✓		✓	
90 Degree Lifter	15	✓					✓	✓		✓	
Battery Lifters	16	✓	✓					✓	✓	✓	
Optimag E	17	✓	✓			✓	✓	✓		✓	
Optimag P	18	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	

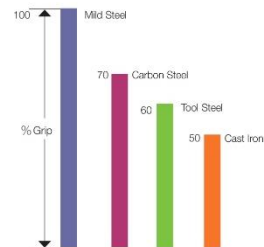
Note: Table is an approximate guide, for specific applications please contact us.

Important factors to consider

Material Type

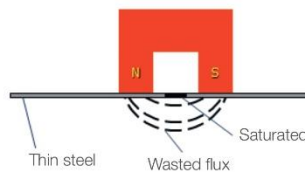
The scale opposite highlights the effect material type has on clamping forces.

Workpiece Material

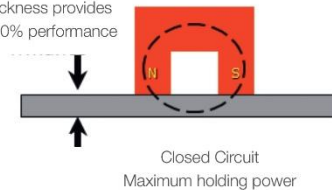


Material Thickness

To achieve maximum clamping force minimum material thickness should be observed.



Minimum part thickness provides 100% performance





partment for more information.

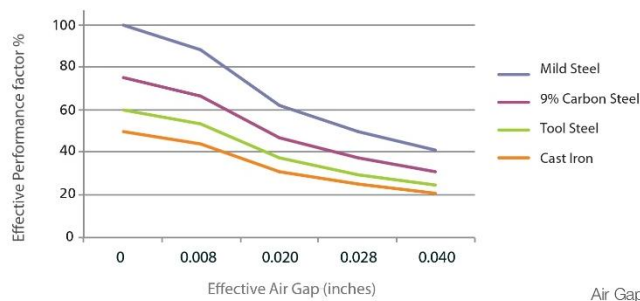
Surface finish		Actuation method		
Black	Scaled	Manual	Electronically	Pneumatically
✓	✓	✓		
✓	✓	✓		
✓		✓		
✓	✓		✓	
			✓	
				✓



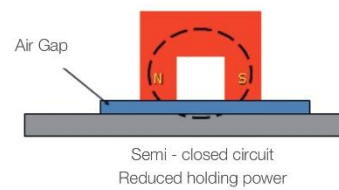
Please Note:- All specifications shown are based on a straight vertical lift. Should the load be rotated through 90° the safe working load will be reduced by 80% of the stated values.

Air Gaps

An air gap between the magnet and the load will also affect lifter performance. The chart below shows the general effect on different materials.



As the air gap increases the magnetic performance reduces.



Please note information on these pages is an approximate guide, for specific applications please contact us.

Optimag E

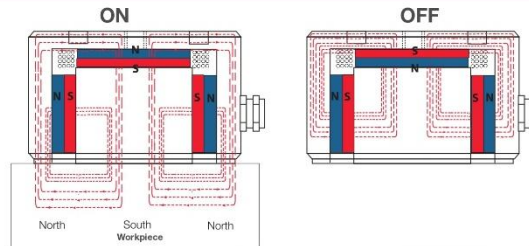
Electronically switchable permanent magnets (ESPM)

- Ideal for clamping or lifting loads with clean, even, flat surfaces
- Suitable for applications which require sensing or built-in PLC control
- Failsafe operation - lose power it will retain the hold
- Ideal for materials from 0.4" thick

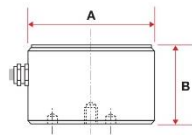


How it works

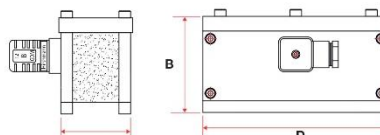
A single pulse of power switches the magnet by reversing the magnetic poles and in doing so changes the magnetic flux direction to hold or release the load. Magnetism is channelled to provide a deeper magnetic field making it ideal for thicker materials



Technical Data



Circular Optimag E



Rectangular Optimag E



ESPM Controller

Product	Load Profile	SWL*	Dimensions inches				Unit Weight
		lbs	A	B	C	D	lbs
Circular							
ESPM80C	Flat	190	3.1	2.2	N/A	N/A	3.3
ESPM100C	Flat	330	4.1	2.2	N/A	N/A	6.6
ESPM125C	Flat	550	5.1	3.1	N/A	N/A	12.6
ESPM150C	Flat	880	6.1	3.1	N/A	N/A	17.6
Rectangular**							
ESPM2166	Flat	215	N/A	3.3	2.4	6.3	8.4
ESPM2177H	Flat	660	N/A	5.1	3.0	6.7	24.3

Control Unit	Operating Voltage V	Rating	Dimensions inches		
			Width	Height	Depth
M24388/SC	240	50	11.8	11.8	6.1
M24388/DC	240	100	11.8	11.8	6.1
6001/CONT	415	180	15.7	11.8	6.1
M24388/HAND	N/A	N/A	4.4	2.6	2.2
6001/MH	N/A	N/A	4.4	2.6	2.2

Standard 240V - alternate voltages made to order

*Safe working load

**Can be manufactured to lift flat or round

Anexo G:

Fabricación de estructura metálica de bastidor principal

