

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

“Algoritmo de automatización basado en modelo matemático existente para mejorar el tiempo de diseño del sistema de aparejos empleados en el izaje de módulos”

Para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico

Elaborado por:

David Alonzo. Ramirez Neyra

 [0009-0005-1648-5502](#)

Asesor:

Dr. Manuel Villavicencio Chávez

 [0000-0003-0142-7930](#)

Lima – Perú

2024

Cita	Ramírez Neyra [1]
Referencia/Reference	[1] D. Ramírez Neyra, " <i>Algoritmo de automatización basado en modelo matemático existente para mejorar el tiempo de diseño del sistema de aparejos empleados en izaje de módulos</i> " [Trabajo de Suficiencia Profesional]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Cita	(Ramírez, 2024)
Referencia/Reference	Ramírez, D. (2024). <i>Algoritmo de automatización basado en modelo matemático existente para mejorar el tiempo de diseño del sistema de aparejos empleados en izaje de módulos</i> . [Trabajo de Suficiencia Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

DEDICATORIA

A Dios, uno y trino, causa incausada;
y a la santísima Madre del Verbo.

A mis padres, Judith y Gerardo, por
su apoyo y amor incondicional; y a
mis hermanos.

RESUMEN

La presente investigación desarrolla la automatización del diseño del sistema de aparejos para el izaje de módulos sujetos desde su base, para reducir su tiempo de diseño. Como lo señalan investigaciones precedentes, diseñar sistemas de aparejos es una tarea complicada, que consume mucho tiempo y que es propensa a presentar errores.

Para demostrar la efectividad del algoritmo, este es probado en siete casos de estudio (unidad de análisis), siendo estos casos, siete subestaciones eléctricas modulares, elegidas del proyecto de construcción minera “Mina Justa – Planta de sulfuros”, ejecutado en la región de Ica, Perú.

Adicionalmente, un análisis por elementos finitos (FEA) es desarrollado con el fin de calcular las tensiones generadas en el sistema de aparejos durante la actividad de izaje de módulos. Luego, los resultados de las tensiones estimadas por el algoritmo son comparadas con los resultados del FEA. Además, el tiempo requerido por el análisis de elementos finitos, y el tiempo de procesamiento del algoritmo son también comparados.

Finalmente, se demuestra que el algoritmo es capaz de reducir significativamente el tiempo de diseño, manteniendo la precisión de los resultados de las tensiones.

Palabras clave: Sistema de aparejos, izaje, algoritmo, módulos.

ABSTRACT

The current research develops an algorithm to automatize the design of rigging assembly for modules lifted from the bottom, in order to reduce its design time. As previous works point to, designing rigging assemblies for modules is a complicated task, time consuming and error prone activity.

To demonstrate the effectiveness of the code, it is tested on seven study cases. These study cases are seven modular electrical rooms selected from “Mina Justa – Sulfide Plant” mining construction project, which was developed in Ica region, Peru.

In addition to this, a finite element analysis (FEA) is developed to estimate loads generated over the rigging assembly during lifting activities of modules. Then, the loads outcomes obtained by the code are compared with FEA outcomes. Furthermore, the time required for the FEA and the algorithm process time are also compared.

Finally, it is demonstrated that the proposed algorithm is able to reduce significantly the design time, assuring accurate load outcomes.

Key words: Rigging assembly, lifting, algorithm, modules.

ÍNDICE

RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
ÍNDICE.....	VI
PRÓLOGO.....	XIV
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del problema de investigación	1
1.3 Objetivo del estudio	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.4 Antecedentes investigativos	4
1.4.1 Investigaciones internacionales	4
1.4.2 Investigaciones nacionales	10
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	11
2.1 Marco teórico.....	11
2.1.1 Modularización en construcción.....	11
2.1.2 Izaje de cargas pesadas (Heavy Lift Plan).....	15
2.1.3 Plan de izaje (Lift Plan)	17
2.1.4 Tendencias en la Investigación relacionadas al plan de izaje:...	21
2.1.5 Sistema de aparejos (Rigging Arrangement)	22
2.1.6 Conceptos importantes relacionados a izajes	27
2.1.7 Eslingas (Slings):	29
2.1.8 Accesorios de izaje (Rigging Hardware):.....	34
2.2. Marco conceptual.....	38
CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES ...	39
3.1 Hipótesis general.....	39
3.2 Operacionalización de variables.....	39

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	41
4.1 Tipo y diseño de la investigación.....	41
4.2 Unidad de análisis	42
4.3 Matriz de consistencia	44
CAPÍTULO V: DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	45
5.1 Diseño de sistema de aparejos para el izaje de módulos con puntos de sujeción en su base.....	45
5.1.1 Características de la Unidad de análisis	46
5.1.2 Sistema de aparejos propuesto para módulos con puntos de izaje en su base.	49
5.1.3 Lineamientos para el diseño del sistema de aparejos propuesto.....	52
5.2 Modelo matemático para el dimensionamiento de la geometría del sistema de aparejos	53
5.2.1 Modelo matemático para los niveles 1-2:.....	55
5.2.2 Modelo matemático para los niveles 2- 3:.....	62
5.3 Modelo matemático para el cálculo de tensiones en el sistema de aparejos.....	65
5.4 Estimación convencional de la geometría y las tensiones del sistema de aparejos para módulos con puntos de sujeción en su base.	71
5.4.1 Método de estimación convencional de la geometría del sistema de aparejos	71
5.4.2 Método de estimación de las tensiones del sistema de aparejos mediante el método de elementos finitos.....	73
5.5 Desarrollo del algoritmo de selección de aparejos	76
5.6 Alcance del algoritmo	82
5.7 Validación de resultados	83
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	84
6.1 Análisis de resultados geométricos:	84
6.2 Análisis de resultados de tensiones:	91
6.3 Análisis del tiempo de diseño de sistema de aparejos	95
6.4 Análisis de aparejos seleccionados.....	98
6.5 Contrastación de la hipótesis.	100

CONCLUSIONES	102
RECOMENDACIONES	103
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
ANEXOS	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Accidentes ocupacionales fatales relacionados con grúas por tipo de evento, 2011-17; en Estados Unidos. [17]	2
Figura 2:	Diferentes tipos de estructuras modulares. [19].....	5
Figura 3:	Diagrama de metodología de selección de aparejos propuesto por Olearczyk. [11].....	6
Figura 4:	Tres sistemas de aparejos diferentes para izar un módulo con 4 puntos de izaje. [6].....	8
Figura 5:	Sistema de aparejos de módulos con diferentes puntos de izaje. [9].....	9
Figura 6:	Simulación por elementos finitos de sistema de izaje de plancha de clarificador. [12].....	10
Figura 7:	Proceso de construcción modular. [8].....	12
Figura 8:	Transporte de modulo mediante remolque modular autopropulsado (SPMT). [19].....	13
Figura 9:	Transporte de modulo mediante embarcación. [19].....	15
Figura 10:	Metodología de planificación y visualización de izajes. [11]	19
Figura 11:	Metodología de selección de grúa. [11]	20
Figura 12:	Metodología de selección de grúa. [11]	21
Figura 13:	Geometría de sistema de izaje para carga con 4 puntos de sujeción. [13].....	23
Figura 14:	Sistema de aparejos para módulo de 4 puntos de izaje. [9]	23
Figura 15:	Diagrama de cuerpo libre del sistema de aparejos. [6].....	24
Figura 16:	Montaje de módulo con 14 puntos de izaje. [9].....	25
Figura 17:	Selección de aparejos de izaje para módulo. [9].....	26

Figura 18: Selección de aparejos de izaje para módulo. [10].....	27
Figura 19: Elevación de una carga directamente sobre su centro de gravedad. [7].....	28
Figura 20: Tipos de nudo empleados en eslingas. [7].....	30
Figura 21: Estrobo tipo cable. [1]	31
Figura 22: Configuraciones de estrobos: a) Ojo-Ojo y b) Sinfín. [7].....	32
Figura 23: Configuración múltiple de estrobos. a) dos líneas, b) tres líneas y c) cuatro líneas. [7]	33
Figura 24: Relación D/d, en estrobos. [1].....	34
Figura 25: Tipos de grilletes. Izquierda: Grilletes tipo D. Centro: Grillete para cadena. Derecha: Grillete para eslinga sintética. [2].....	35
Figura 26: Ángulo de carga en grilletes. [2].....	36
Figura 27: Partes de un grillete. [2]	37
Figura 28: Tipos de grilletes. [2].....	37
Figura 29: Sala eléctrica modular con 8 puntos de izaje ubicados en su base.	43
Figura 30: Subestación eléctrica modular con 8 puntos de izaje (4 por lado) ubicados en el bastidor.	46
Figura 31: Orejas de izaje de subestaciones modulares.	47
Figura 32: Orientación de orejas de izaje de subestaciones modulares. ...	47
Figura 33: Posición de puntos de izaje en módulo.....	48
Figura 34: Sistema de aparejos propuesto para el izaje de módulo con puntos de sujeción en su bastidor.....	50
Figura 35: Modelo matemático aplicado a módulo con 8 puntos de sujeción ubicados en su base.	54
Figura 36: Diagrama de cuerpo libre del modelo para los niveles 1-2.	55

Figura 37: Esquema de parte inferior del modelo para los niveles 1-2, con origen de coordenadas en el punto O.....	57
Figura 38: Esquema de parte superior del modelo para los niveles 1-2, con el origen de coordenadas en el punto P.	60
Figura 39: Diagrama de cuerpo libre del modelo para los niveles 2-3.	63
Figura 40: Esquema simplificado del modelo para los niveles 2-3, considerando el punto O como origen.	64
Figura 41: Codificación de líneas del sistema de aparejos.	66
Figura 42: División del módulo en función de la ubicación del centro de gravedad.....	67
Figura 43: Codificación de ángulos principales del sistema de aparejos. ..	68
Figura 44: Tensiones generadas en el sistema de aparejos.....	69
Figura 45: Modelo geométrico alámbrico en 3D del módulo.....	72
Figura 46: Modelo alámbrico 3D del módulo, utilizado en el FEA.....	74
Figura 47: Aplicación de carga y condiciones de contorno en el FEA.	75
Figura 48: Tensiones axiales en aparejos obtenidas mediante el FEA.....	76
Figura 49: Diagrama de flujo del algoritmo de selección de aparejos.....	77
Figura 50: Código de estimación de geometría.	79
Figura 51: Solución numérica de la ecuación (11) del modelo matemático.	80
Figura 52: Cadena de grilletes para compensar dimensión del sistema de aparejos.....	81
Figura 53: Comparación de resultados de longitudes del módulo 2371-SS-201.....	86
Figura 54: Comparación de resultados de ángulos del módulo 2371-SS-201.....	89

Figura 55: Comparación de resultados de tensiones del módulo 2371-SS-201.....	94
Figura 56: Comparación de tiempos de diseño del módulo 2373-SS-203-1.....	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Indicadores de la investigación.	40
Tabla 2:	Matriz de consistencia	44
Tabla 3:	Información de dimensiones de las subestaciones modulares.	49
Tabla 4:	Longitudes estimadas por método convencional.	85
Tabla 5:	Longitudes estimadas por algoritmo.	85
Tabla 6:	Error (%) entre longitudes estimadas por método convencional y algoritmo.	87
Tabla 7:	Ángulos estimados por método convencional.	88
Tabla 8:	Ángulos estimados por algoritmo.	88
Tabla 9:	Error (%) entre ángulos estimados por ambos métodos.	90
Tabla 10:	Diferencia entre ángulos estimados por ambos métodos.	90
Tabla 11:	Tensiones estimadas por método convencional.	92
Tabla 12:	Tensiones estimadas por algoritmo.	92
Tabla 13:	Error (%) entre tensiones estimadas por ambos métodos.	93
Tabla 14:	Diferencia entre tensiones estimadas por ambos métodos.	95
Tabla 15:	Tiempo de diseño de sistema de aparejos por método convencional.	96
Tabla 16:	Tiempo de diseño de sistema de aparejos por algoritmo.	96
Tabla 17:	Reducción de tiempo (s) de algoritmo vs método convencional.	98
Tabla 18:	Reducción de tiempo (%) de algoritmo.	98
Tabla 19:	Estrobos seleccionados por algoritmo para módulos.	99

PRÓLOGO

El presente documento trata sobre la automatización del proceso de diseño de sistemas de aparejos para el izaje de módulos sujetos desde su base.

El primer capítulo es una introducción a la investigación, en la que se exponen aspectos generales relacionados al izaje de módulos y al sistema de sujeción que requieren para ser manipulados en forma segura. Adicionalmente, esta sección desarrolla la problemática de la investigación, y se exhiben los últimos progresos académicos realizados en este campo.

En contraste, en el segundo capítulo se exponen las bases teóricas sobre las que se erige la presente investigación. En primer lugar, se presenta la modularización, como estrategia con creciente presencia en proyectos de construcción, pero que presenta desafíos. Luego, se aborda el izaje de cargas pesadas y la planificación que requiere, por ser una actividad de alto riesgo. Mientras que, los tópicos restantes están relacionados a los sistemas de aparejos, y su inclusión es crucial para el desarrollo de este trabajo de investigación.

Por otra parte, en el tercer capítulo se desarrolla la hipótesis de la investigación y se definen las variables, tanto dependiente como independiente, y los indicadores que operacionalizan dichas variables.

Luego, el cuarto capítulo define el tipo y diseño de la investigación, proporcionando información referente a la unidad de análisis elegida. Además, presenta la matriz de consistencia, en la que se muestra la relación lógica entre el problema, el objetivo, la hipótesis y las variables de la investigación.

El quinto capítulo, es el centro de la investigación. En él se detalla el proceso de diseño de sistemas de aparejos, relacionando las características principales de los módulos estudiados con la forma del sistema de aparejos propuesto. A partir de esto, desarrolla los modelos matemáticos requeridos para la estimación de la geometría del sistema y el cálculo de las tensiones que soporta durante su funcionamiento. Además, presenta los métodos convencionales que sirven de referencia para la evaluación del algoritmo. Luego, presenta el desarrollo del algoritmo, explicando cómo funciona y que entregables genera. Finalmente, brinda información sobre el alcance del algoritmo.

En el sexto capítulo se desarrollan las comparaciones de resultados obtenidos por el algoritmo y por el método convencional; y se contrasta la hipótesis.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

1.2 Descripción del problema de investigación

Las operaciones de izaje con grúas, aunque comunes en la industria, son actividades con muchos peligros asociados que, cuando se materializan, pueden generar consecuencias fatales, tal y como se muestra en la gráfica de la Figura 1, elaborada por la Oficina de Estadísticas Laborales de Estados Unidos, donde se observa que aproximadamente 40 accidentes fatales por año ocurrieron en ese país, durante el periodo 2011-2017 [17]. El gráfico muestra que aproximadamente la mitad de los accidentes son ocasionados por “golpe por un objeto o equipo” (154 ocurrencias), y el reporte, asociado al gráfico, señala que 91 de las 154 ocurrencias fueron “caídas” de objetos o equipos [17].

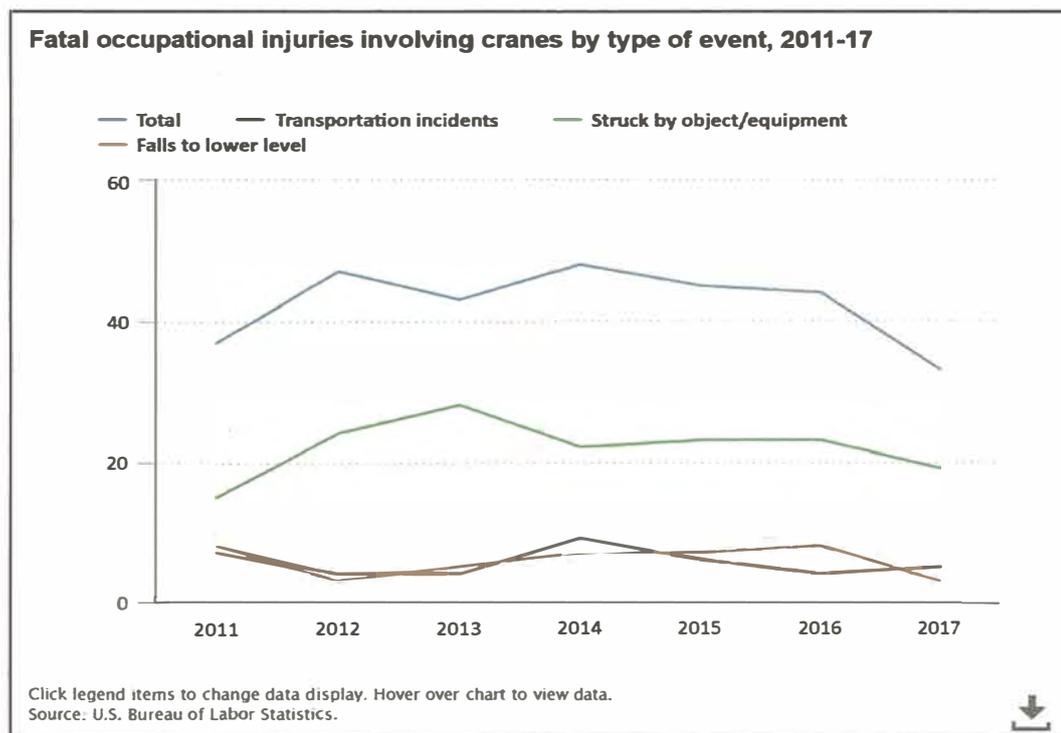


Figura 1: Accidentes ocupacionales fatales relacionados con grúas por tipo de evento, 2011-17; en Estados Unidos. [17]

De forma similar, Tomakov et al. [16] señalan que, en Rusia, durante el año 2015 ocurrieron 59 accidentes relacionados con grúas en instalaciones industriales y obras de construcción, donde 58 personas murieron; mientras que, en 2016, fallecieron 38 personas en 62 accidentes. En el mismo artículo, Tomakov et al. [16], también presentan una recopilación de las causas de estos accidentes, identificando, entre otras, las siguientes: la elevación inclinada de la carga y la sobrecarga de tensiones en el sistema de aparejos. Por otro lado, Generalova et al. [5] concluyen que la aplicación de la construcción modular se ha incrementado en diferentes proyectos de construcción de edificios. Por su parte, el sector de la construcción de instalaciones industriales también ha adoptado esta tecnología, aplicándola en la construcción de: refinerías [6] [9]; plantas nucleares [8] [14], plantas químicas, minas [19], etc. Sin embargo, como explican Wei et al. [19], a pesar

de la alta productividad que se consigue con esta tecnología, su principal desventaja es que el tamaño (dimensiones y peso) de los módulos está limitado por restricciones de transporte e izaje. Además, Westover [20] et al. demuestran que el sistema de aparejos empleado para izar módulos tiene incidencia en el diseño estructural de los módulos debido a las tensiones y esfuerzos que genera sobre los módulos durante el izaje.

Westover [20] et al. también señalan que el sistema de aparejos “tradicional” empleado en izajes de módulos presenta las siguientes limitaciones: está compuesto por gran cantidad de elementos, especialmente cuando los módulos tienen muchos puntos de sujeción (por ejemplo, 16 puntos); requiere de prolongado tiempo y demandante esfuerzo para alinear la carga tal que sea elevada en forma horizontal (particularmente, cuando el centro de gravedad y el centro geométrico del módulo no coinciden), y, finalmente, genera elevados esfuerzos y tensiones sobre el módulo durante su izaje.

El diseño del sistema de aparejos es crucial para prevenir accidentes [3]. No obstante, dicha actividad es de carácter iterativo, pues la determinación de la geometría del sistema está en función de las longitudes de los aparejos disponibles y la selección de los aparejos depende de la geometría del sistema [6]. Adicionalmente, Minayhashemi et al. [9] indican que, aún en la actualidad, el diseño del sistema de aparejos para izar módulos basado en el enfoque tradicional se realiza en forma manual, apoyándose en suposiciones y en el método del ensayo y error. Por tal motivo, esta actividad resulta lenta e imprecisa [9] [10].

Finalmente, a pesar de que diferentes autores, como Westover et al. [20] o Minayhashemi et al. [9] y [10], han abordado el diseño de sistemas de sujeción para manipular estructuras modulares, estos trabajos se han enfocado en módulos izados desde su parte superior. Sin embargo, como expone Minayhashemi [9], existen módulos con los puntos de izaje ubicados en su base, que no requieren que el primer nivel de sujeción sea vertical; estando este tipo de módulos fuera del alcance de las investigaciones realizadas.

En consecuencia, ¿Cómo afectan las limitaciones del sistema de aparejos tradicional a la selección de aparejos para izaje de módulos con puntos de sujeción ubicados en su base?

1.3 Objetivo del estudio

1.3.1 Objetivo general

Mejorar el tiempo de diseño del sistema de aparejos empleado en el izaje de módulos con puntos de sujeción ubicados en su base.

1.4 Antecedentes investigativos

1.4.1 Investigaciones internacionales

A. Westover et al. (2014) en su investigación, "Analysis of rigging assembly for lifting heavy industrial modules" [20], estudian el izaje de estructuras modulares pesadas empleando el sistema de aparejos tradicional con el fin de exponer el comportamiento mecánico del sistema de aparejos durante dicha actividad y el efecto que genera la distribución de tensiones del sistema sobre dichos módulos.

Mediante el método de elementos finitos (FEM) se estima la distribución de tensiones en tres tipos de módulos (ver figura 2) aplicando distintos escenarios de carga para cada uno. Concluyendo que la redistribución de tensiones generada por el sistema tradicional ocasiona un incremento significativo de las fuerzas internas del módulo, principalmente por la flexibilidad que tiene el arreglo triangular (base del sistema tradicional), independientemente del tipo de módulo.

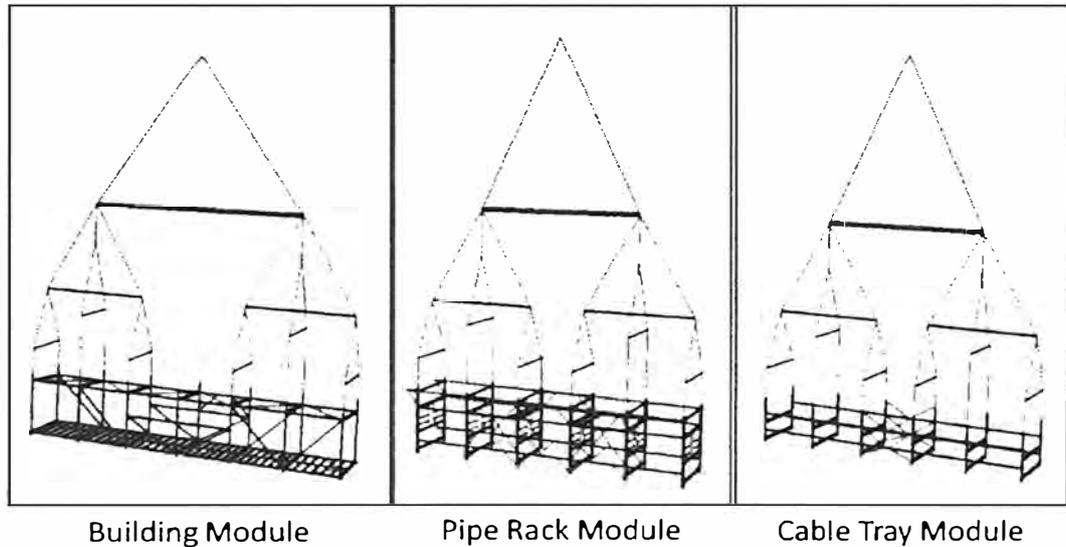


Figura 2: Diferentes tipos de estructuras modulares. [19]

Posteriormente, los investigadores proponen un balancín para izar las estructuras modulares que supere las limitaciones del sistema tradicional.

Finalmente, los autores observan que el balancín genera una redistribución de tensiones con menores magnitudes a las mostradas por el sistema tradicional, permitiendo al diseñador de los módulos reducir el tamaño de los elementos estructurales y sus conexiones, derivando en una reducción del peso total de la estructura modular.

B. Olearczyk et al. (2015) en su publicación, “Intelligent Crane Management Algorithm for Construction Operation (iCrane)” [11], formulan una metodología única que combina los procesos de: selección de grúa, evaluación (individual) de izajes de cargas pesadas del proyecto, optimización de la estrategia de izaje general del proyecto y generación de modelos 3D de los izajes de cargas pesadas. El propósito de este trabajo es reducir costos y tiempo en proyectos de construcción de refinerías, y otras instalaciones industriales, por medio

de la gestión óptima de las grúas (de alta capacidad) del proyecto, como consecuencia de la planificación automatizada de las operaciones individuales de izaje de cargas pesadas, particularmente, de módulos.

La selección de los aparejos, que unen la carga a la grúa, es parte esencial de la planificación de izajes de cargas pesadas, por tal motivo, los autores desarrollan una metodología que permite automatizar dicho proceso. (Ver figura 3)

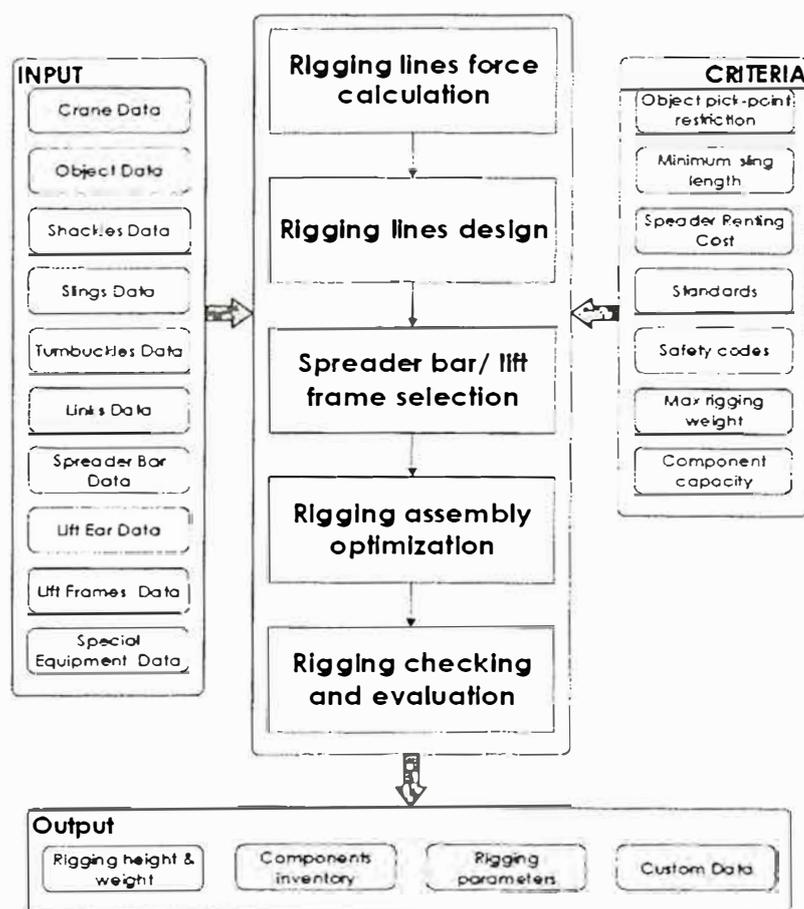


Figura 3: Diagrama de metodología de selección de aparejos propuesto por Olearczyk. [11]

Adicionalmente, la metodología es aplicada a un caso de estudio, observándose que el tiempo asignado a operaciones de izaje señalado

inicialmente en el cronograma se reduce aproximadamente a la mitad. Finalmente, los autores concluyen que la metodología incrementa la eficiencia en la planificación de los izajes de cargas pesadas, además de generar automáticamente los planos de izaje críticos y animaciones 3D de las operaciones de izaje del proyecto.

- C. Hashemi et al. (2019) en su investigación, "Automated Mathematical-Based Design Framework for The Selection of Rigging Configuration" [6], presentan una estructura de diseño, basada en matemáticas, que automatiza la selección de aparejos de izaje de módulos con 4 puntos de sujeción ubicados en su parte superior. Los autores eligen el sistema de aparejos "c" de la Figura 4, porque alinea el gancho del equipo de izaje (grúa) con el centro de gravedad del módulo asegurando la elevación del módulo de forma vertical, y por ende, segura.

Los investigadores desarrollan una estructura de automatización que consta de 4 etapas: Primero, recolecta información del módulo. Segundo, genera un sistema de aparejos preliminar escogiendo los componentes desde una base de datos de aparejos. Tercero, optimiza el número, tamaño y capacidad de los aparejos elegidos preliminarmente, asegurando que el sistema definitivo mantenga el módulo horizontal (sin inclinaciones). Cuarto, genera una lista de aparejos elegidos y crea un esquema de la solución.

El modelo matemático, propuesto por Hashemi et al. [6], consiste en encontrar las longitudes y ángulos del sistema de aparejos, tal que, la intersección de la proyección de las eslingas, tanto de las ubicadas sobre el balancín como de las ubicadas debajo, se intercepten con la línea perpendicular que pasa por el centro de gravedad del módulo.

Finalmente, los autores concluyen que la metodología propuesta permite generar soluciones seguras y eficientes (menor tiempo invertido) respecto de la situación actual.

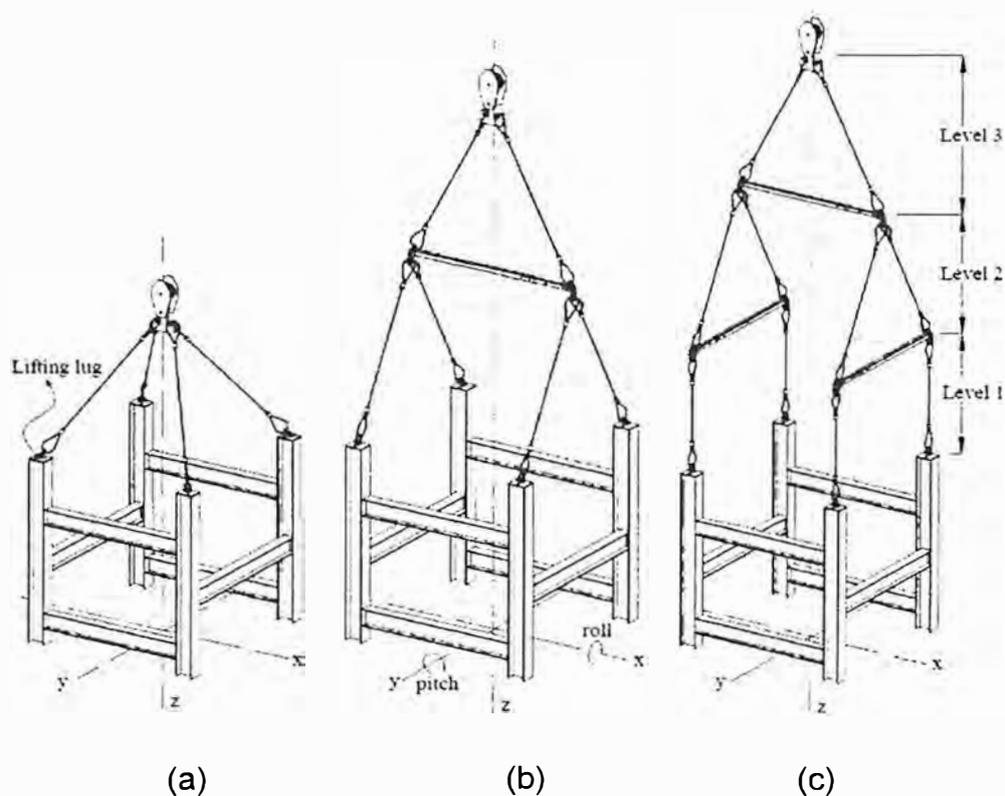


Figura 4: Tres sistemas de aparejos diferentes para izar un módulo con 4 puntos de izaje. [6]

D. Minayhashemi (2019) en su tesis de maestría, “Automated Mathematical-Based Rigging Design System for Heavy Industrial Modules” [9], expande la automatización del diseño del sistema de aparejos de estructuras modulares, abarcando módulos que poseen de 4 a 16 puntos de izaje, mediante la combinación de dos arreglos básicos (ver figura 5)

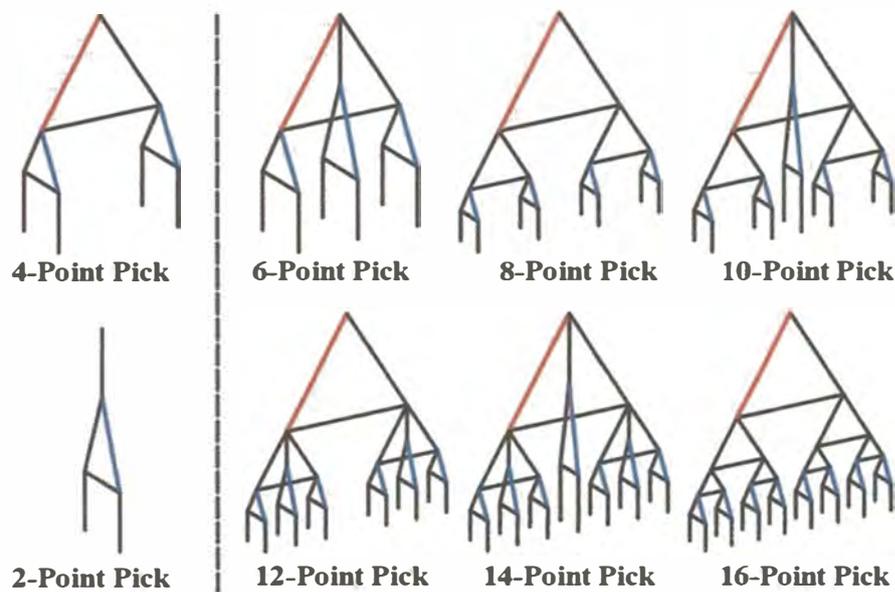


Figura 5: Sistema de aparejos de módulos con diferentes puntos de izaje. [9]

Para ello, el investigador define 3 componentes en el proceso de automatización: El primero, solucionador geométrico, tiene por objetivo calcular los ángulos y longitudes del sistema tal que el centro de gravedad del módulo se encuentre alineado con el gancho de la grúa. El segundo, diseñador del sistema, determina la capacidad requerida y elige los aparejos desde una base de datos. El tercero, visualizador 3D, presenta un modelo en tres dimensiones del sistema de aparejos propuesto. Finalmente, el autor concluye que su trabajo permite a los ingenieros de izaje crear sistemas de aparejos más precisos y rápidos que de la forma habitual (manualmente), independientemente de la cantidad de puntos de izaje.

Adicionalmente, Minayhashemi establece las limitaciones de su investigación, señalando que su algoritmo no es aplicable en módulos, izados desde la base, en cuyo primer nivel se colocan eslingas oblicuas.

1.4.2 Investigaciones nacionales

- A. Quintanilla, K. (2021) en su informe de suficiencia, "Diseño del sistema de izaje de las planchas de un clarificador mediante electroimanes de alta potencia para reducir los costos de montaje en una minería de alta producción" [12], analiza mediante el método de elementos finitos (ver figura 6) el sistema de izaje que emplea electroimanes de alta potencia para la instalación de planchas metálicas que conforman un clarificador, en la fase de construcción de un proyecto minero.

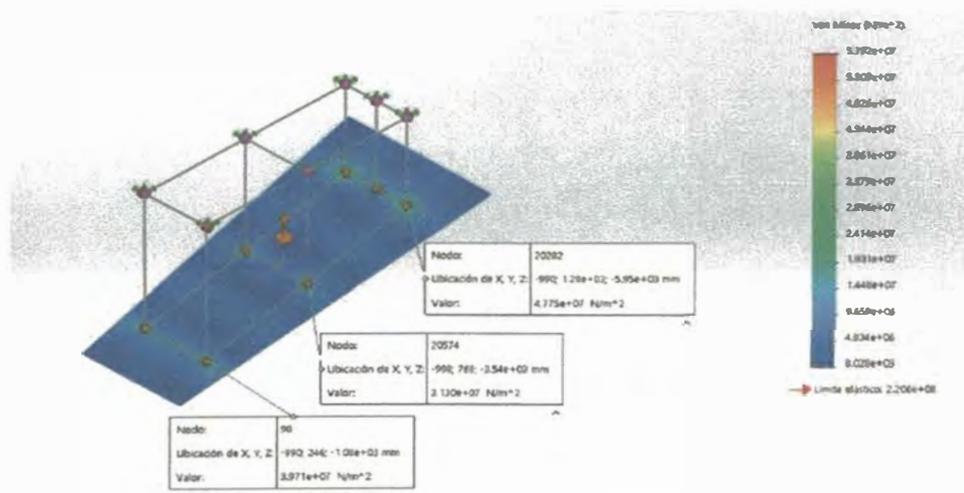


Figura 6: Simulación por elementos finitos de sistema de izaje de plancha de clarificador. [12]

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 Marco teórico

2.1.1 Modularización en construcción

Maronati et al. (2017), en su investigación, “EVAL: a methodological approach to identify NPP Total Capital Investment Cost drivers and sensitivities” [8], definen a la modularización como una técnica de construcción que consiste en la descomposición de una planta o instalación (una unidad de grandes proporciones) en un número de elementos estandarizados, denominados módulos, tal que sean producidos en fábricas o talleres.

Los autores enfocan su trabajo en la construcción de centrales nucleares, señalando que la aplicación de este método (modularización) ocasiona el traslado de actividades, que forman parte de la construcción de la central, desde el lugar de ejecución (on-site) hacia otras zonas, como: áreas de ensamblaje, cercanas al lugar de ejecución (on-site), o fábricas y talleres fuera de los límites (off-site) del lugar de ejecución. En la figura 7 se esquematiza el proceso de construcción modular de centrales nucleares.

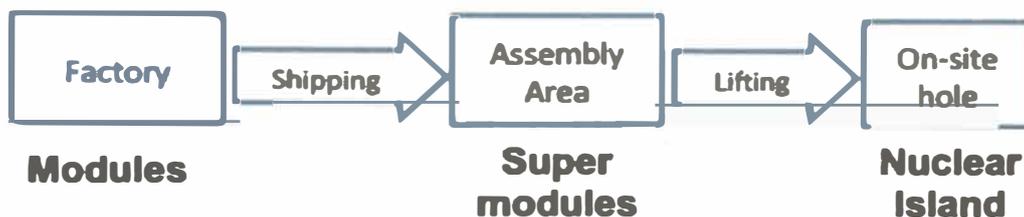


Figura 7: Proceso de construcción modular. [8]

En contraste, el método tradicional de construcción (sitck build), mencionado por Smith et al. (2012) en su publicación “Module Fabrication Strategy for Today’s Nuclear Industry” [14], consiste en construir una instalación completamente en el lugar de ejecución de la obra, sobre sus cimientos, erigiendo la instalación pieza por pieza. Este método de construcción requiere disponer de los diferentes recursos, como: mano obra, componentes, equipos entre otros; desplegados en la zona de ejecución del proyecto.

Por otra parte, Wrigley et al. (2018) en su artículo: Design for plant modularisation nuclear and SMR [21], adoptan el siguiente concepto de modularización: proceso de ingeniería y fabricación que permite segmentar los proyectos de construcción en paquetes transportables, que pueden ser instalados económicamente en su posicional definitiva en obra.

Wei et al. (2014) en su publicación, “Modularization Technology Development Prospects” [19], señalan que la modularización se ha extendido a diferentes sectores, tales como: la industria de generación energía, minería, infraestructura, química, entre otras; impulsada por el incremento en la capacidad de carga tanto de transportes como de equipos de izaje. Por ejemplo, en la figura 8 se ilustra un remolque modular autopropulsado (self-propelled modular transporter, SPMT) transportando una estructura modular.



Figura 8: Transporte de modulo mediante remolque modular autopulsado (SPMT). [19]

2.1.1.1 Ventajas y desventajas de la modularización en construcción:

Subramanya et al. (2020), en su publicación “Modular Construction vs. Traditional Construction: Advantages and Limitations: A Comparative Study” [15], sintetiza las ventajas y desventajas que presenta la construcción modular respecto del método de construcción tradicional. Para este fin, los investigadores revisaron 62 investigaciones relacionadas a la construcción modular.

Análogamente, Smith et al. [14] y Wei et al. [19], exponen tanto los aspectos positivos como negativos que produce la aplicación de la modularización en proyectos construcción.

A continuación, se presentan las principales ventajas de la modularización:

- Reducción de la duración total del proyecto [19], debido a que la fabricación de módulos fuera del lugar de ejecución de la obra permite desarrollar actividades secuenciales del proyecto en paralelo [14].

- Incremento de la productividad del proyecto [19], porque al construir los módulos en entornos controlados, como un taller o una planta especializada, aumenta la productividad individual de los trabajadores y también la calidad del trabajo realizado [14].
- Reducción del costo total del proyecto [14], como consecuencia directa de las dos primeras ventajas. Smith et al. [14], señalan que, en la construcción de plantas petroquímicas, el costo del proyecto se reduce en 8%, debido al incremento de la productividad de los trabajadores en talleres fuera del lugar de ejecución.
- Aumento en el control de la calidad de los entregables [19].
- Reducción de la congestión en el lugar de ejecución del proyecto [14], puesto que, al transferirse parte del trabajo a zonas externas, se reduce la densidad de personal y equipos en la zona de trabajo.
- Aumento del trabajo a nivel de piso [14], porque se reemplaza parte del trabajo que se realiza en altura, bajo el enfoque tradicional, al pre ensamblar los módulos.
- Incremento de la seguridad del proyecto [19], motivada principalmente, por la reducción de la congestión de las áreas de trabajo y a la reducción de la cantidad de trabajo que se desarrolla en altura [14].

Por otro lado, las desventajas de este método son:

- Incremento de costos de transporte [14], porque a diferencia del método tradicional, los módulos son transportados desde diversos lugares, requiriendo equipos de transporte y manipulación de gran capacidad debido a las dimensiones y pesos de los módulos.
- Limitación en el tamaño de módulos propiciada por las restricciones de los equipos de transporte e izaje [19]. En la figura 9, se observa como los módulos ocupan la cubierta de la embarcación.
- Requiere de un plan de interfaces entre módulos [14]. Se incrementa la cantidad de planos que detallen la interface entre módulos. Además,

desde las etapas iniciales del proyecto se debe considerar el plan el arribo de los módulos y su impacto en cronograma.

- Difícil gestión de procura [14].
- Incremento en la planificación de las operaciones de izaje [14].



Figura 9: Transporte de modulo mediante embarcación. [19]

Finalmente, Subramanya et al. [15], concluyen que los aspectos positivos de la construcción modular exceden a sus limitaciones.

2.1.2 Izaje de cargas pesadas (Heavy Lift Plan)

Varghese et al. (1997) en su investigación, “A Heavy Lift Planning System for Crane Lifts” [18], proponen lineamientos para el desarrollo de un sistema computarizado de planificación de izajes de cargas pesadas.

Con este fin, dicho equipo de investigación entrevistó a expertos en izajes de diversas empresas del sector industrial. Los resultados del estudio permitieron observar que, hasta ese momento, no existían prácticas estandarizadas para la planificación de izajes pesados, que sean comunes a todos los sectores de la industria, y que, en su lugar, los planes se desarrollaban principalmente en base a la experiencia de expertos.

Adicionalmente, los autores definen “izaje de carga pesada” (Heavy lift), a aquel izaje que requiere de una planificación detallada, cuya comunicación se realiza mediante planos. También señalan que, en instalaciones industriales, los izajes comúnmente consisten en instalar o reemplazar equipos, cuyo peso oscila entre las 30 toneladas (como el caso de compresores) hasta las 800 o más toneladas (como el caso de columnas de fraccionamiento).

Posteriormente, la ASME (2018) en su estándar, P30.1 “Planning for Load Handling Activities” [3], clasifica a las operaciones de izaje en dos categorías: “izajes estándares” e “izajes críticos”. Estas categorías dependen, tanto de la naturaleza de la actividad, como al grado de exposición a problemas que impacten a la seguridad. Por esta razón, la ASME [3] propone criterios mínimos para determinar a qué categoría pertenece un determinado izaje.

A continuación, se presentan estos criterios:

- Peligros potenciales para personas.
Regla: Si el personal relacionado al izaje estuviera ubicado en lugares con peligro de impacto o aplastamiento durante la operación.

- Peligros en la cercanía del área de trabajo.
Regla: Si el equipo de izaje o la carga invaden la zona prohibida de líneas de tensión.

- Complejidad de la actividad de izaje.
Regla: Si el izaje involucra dos o más equipos de izaje.

- Impacto negativo de las condiciones ambientales.
Regla: Si la visibilidad es afectada (niebla)

- Capacidad o comportamiento del equipo de izaje y del sistema de aparejos.
Regla: Si el peso de la carga es significativo comparado con la capacidad del equipo de izaje o del sistema de aparejos.

- Impacto comercial negativo.
Regla: Si el tiempo de reemplazo de la carga (equipo) es muy prolongado.
- Requisitos exclusivos del lugar de izaje.
Regla: consideraciones o políticas de la empresa dueña del lugar donde se desarrollará el izaje.
- Izajes repetitivos.
Regla: distracciones, fatigas o falta de concentración del personal vinculado a los izajes.

La clasificación de los izajes permite establecer controles adecuados a cada categoría, los cuales se expresan en el plan de izaje.

2.1.3 Plan de izaje (Lift Plan)

La ASME [3], define como “plan de izaje” a la información y/o instrucción, tanto escrita como verbal, empleada para respaldar a las operaciones de izaje de cargas.

En el caso de izajes críticos, la ASME [3] dispone que el plan de izaje debe ser presentado en forma escrita antes de la ejecución de la actividad. Adicionalmente, el plan de izaje crítico debe evaluar los siguientes factores:

- Carga
- Equipo de izaje
- Sistema de aparejos (Rigging) que sujetan la carga
- Trayectoria de la carga y del equipo de izaje
- Personal
- Condiciones del área de izaje, servicios y equipos auxiliares
- Sistema de comunicación
- Control del área de izaje

- Contingencia
- Plan de emergencia

Por otro lado, Varghese et al. [18], enfocan la planificación de los izajes desde la perspectiva de la factibilidad. En ese sentido, los autores proponen criterios indispensables para determinar la factibilidad de realizar un determinado izaje, los cuales son:

- Disponibilidad de grúa.
- Acceso a la instalación industrial.
- Acceso al área de izaje.
- Posicionamiento de la grúa para ejecutar el izaje.
- Holgura de la trayectoria de la carga.
- Capacidad de la grúa durante el izaje.
- Capacidad portante del terreno durante el izaje.
- Retiro de la grúa del área de izaje.

Posteriormente, Olearczyk et al. [11], automatizan el proceso de planificación de izajes de estructuras modulares. La figura 10 esquematiza la metodología propuesta por los autores, en ella se observan los procesos de:

- Selección de grúa
- Selección de aparejos
- Análisis de trayectoria de la carga.

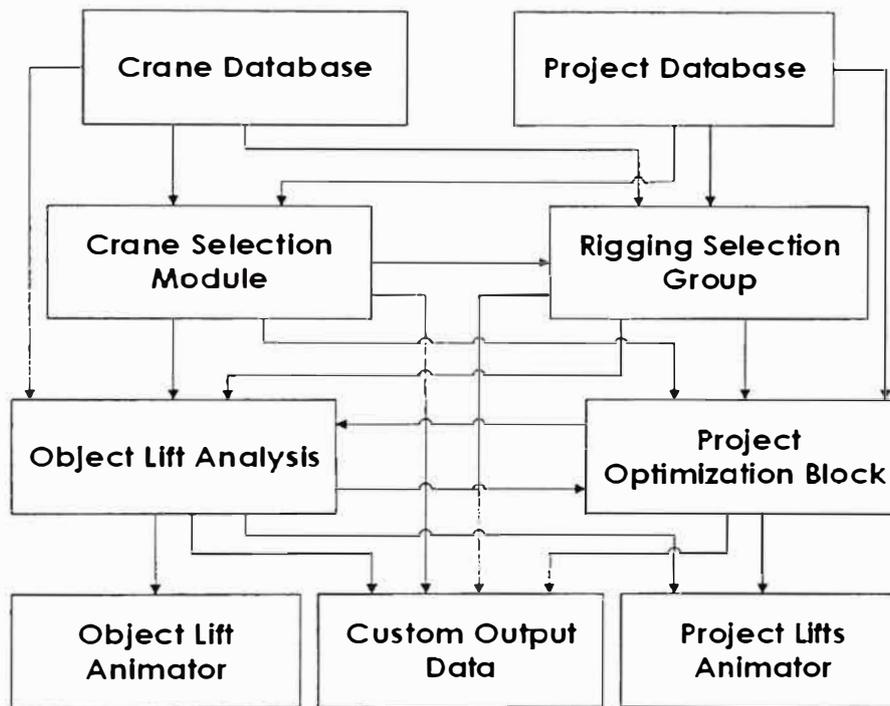


Figura 10: Metodología de planificación y visualización de izajes. [11]

En primer lugar, el proceso de selección de la grúa requiere satisfacer en simultáneo tres condiciones: Disponibilidad del equipo de izaje, capacidad adecuada del equipo y ubicación del equipo. En la figura 11 se muestra la metodología propuesta por Olearczyk et al. [11] para seleccionar la grúa.

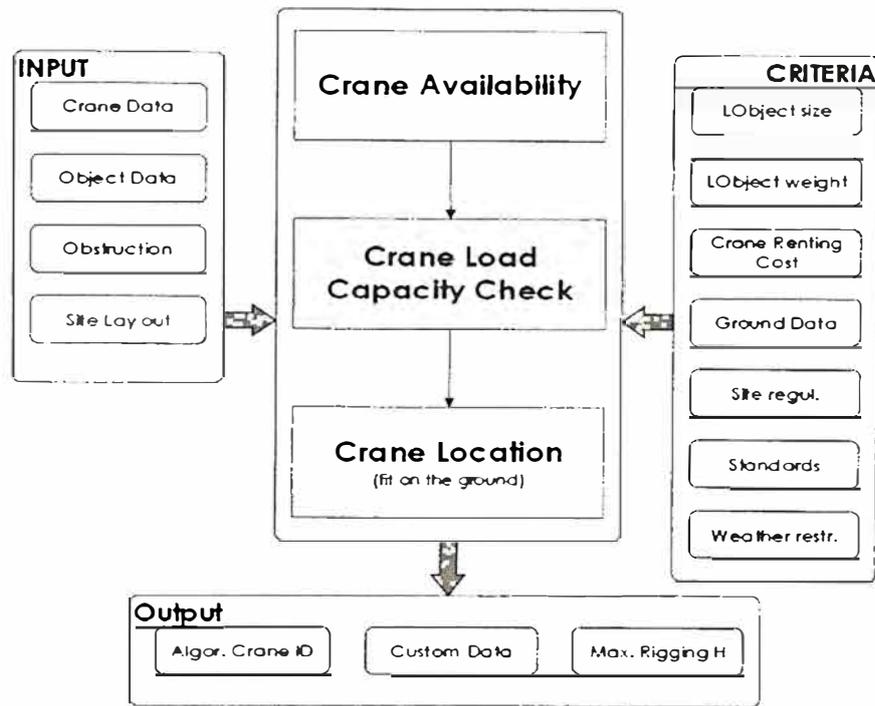


Figura 11: Metodología de selección de grúa. [11]

Para el análisis de la trayectoria de la carga, se requiere previamente haber seleccionado los aparejos y haber encontrado la grúa. Los objetivos del análisis de la trayectoria del objeto son asegurar que no ocurran colisiones entre la pluma de la grúa y la carga; y asegurar que el objeto no colisione con el entorno del área de izaje. En la figura 12 se muestra un análisis de la trayectoria de la carga, además, se muestra la posición inicial (solo se ven las aristas), la posición intermedia (conectada a la grúa) y la posición final de la carga (resaltada en color verde).

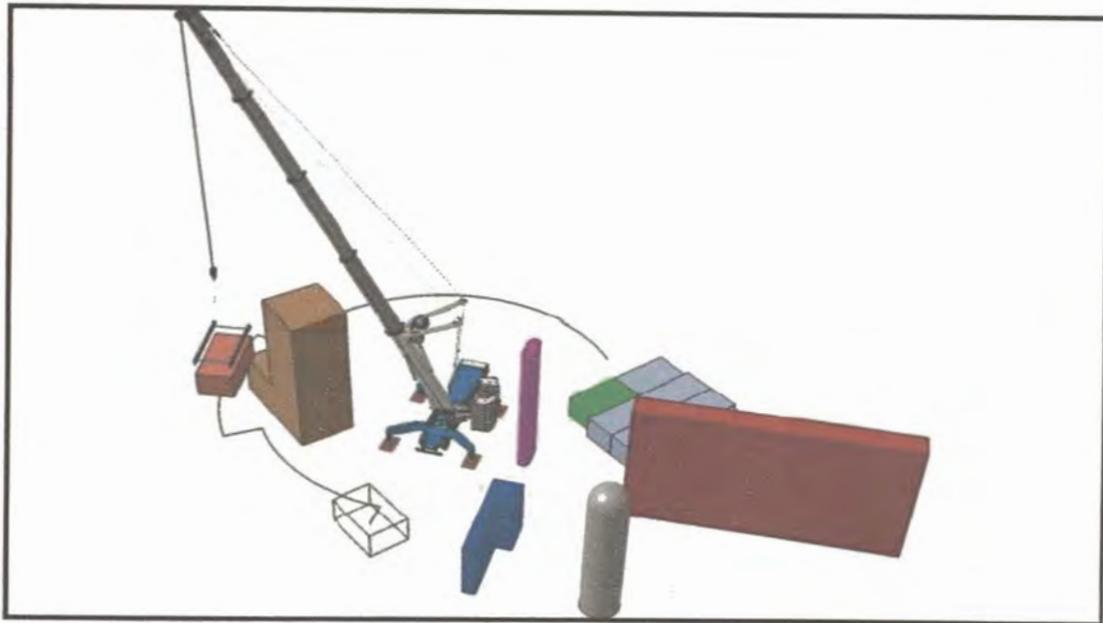


Figura 12: Metodología de selección de grúa. [11]

2.1.4 Tendencias en la Investigación relacionadas al plan de izaje:

Zhang et al. (2020), en su trabajo, “Lift planning and optimization in construction: A thirty-year review” [22], realizan una revisión de 108 publicaciones elaboradas en el periodo 1990-2019. Los autores señalan que se ha producido un incremento significativo en la cantidad de investigaciones relacionadas a este tema. Los tópicos sobre los que tratan son:

- Selección de grúa
- Planificación de trayectoria de grúa
- Análisis de colisiones
- Optimización de la ubicación de grúas
- Optimización del cronograma de grúas.

2.1.5 Sistema de aparejos (Rigging Arrangement)

Según Det Norske Veritas (2014), en su estándar DNV-OS-H205 “Lifting operations” [4], un sistema de aparejos es aquel conformado por el conjunto de eslingas, grilletes, y balancines (tipo viga o marco), según corresponda, que conectan un objeto a ser izado con el equipo que lo manipulará (grúa).

Adicionalmente, la ASME [3] considera que el sistema de aparejos (Rigging) que sujetan la carga, es un aspecto fundamental del plan de izaje crítico, en consecuencia, la norma exige lo siguiente:

- Establecer el sistema de aparejos (rigging) que sujetará la carga
- Asegurar que el sistema de aparejos tenga la capacidad de soportar la carga, según su configuración y geometría.
- Identificar los pesos de los aparejos de izaje y la fuente que respalda esta información.
- Establecer un proceso que asegure que los aparejos satisfacen las especificaciones del fabricante, las normas, y estándares reconocidos por la industria.
- Identificar todas las pruebas e inspecciones que los aparejos requieran para estar operativos.

Con relación al diseño de un sistema de aparejos, Sam [13] presenta una metodología que permite automatizar el cálculo de tensiones en los aparejos de izaje de cargas que poseen 2, 3 ó 4 puntos de izaje, siendo estos puntos conectados directamente al gancho de un equipo de izaje (ver figura 13). Además, dicha metodología contempla los casos donde la posición del centro de gravedad y el centro geométrico de la carga difieren.

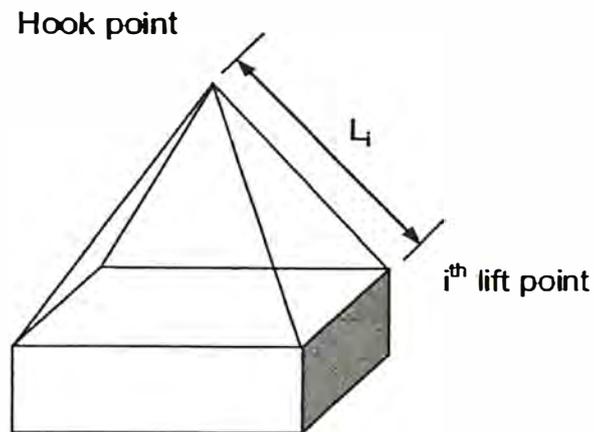


Figura 13: Geometría de sistema de izaje para carga con 4 puntos de sujeción. [13]

Para el izaje de módulos, Hashemi et al. [6], sostienen que el empleo del sistema de aparejos mostrado en la figura 14, garantiza el izaje vertical de un módulo con 4 puntos de sujeción. En el caso general, donde los módulos cuyo centro de gravedad y geométrico difieren, el sistema propuesto permite corregir el desfase mediante el uso de las eslingas de diferentes longitudes.

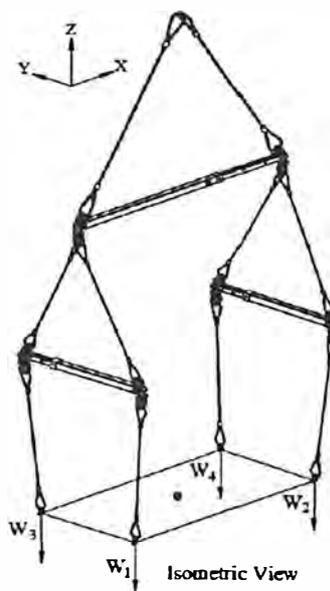


Figura 14: Sistema de aparejos para módulo de 4 puntos de izaje. [9]

En ese sentido, Hashemi et al. [6], desarrollan un modelo matemático para determinar la geometría del sistema de izaje, considerando el desfase del centro de gravedad de la carga en dos direcciones. En el diagrama de cuerpo libre, presentado en la figura 15, los autores demuestran que para que exista equilibrio y no se presente rotación de la carga, la recta vertical que pasa por el centro de gravedad del módulo debe coincidir con la intersección de las proyecciones de las eslingas, tanto de las ubicadas debajo del balancín como de las ubicadas en su parte superior.

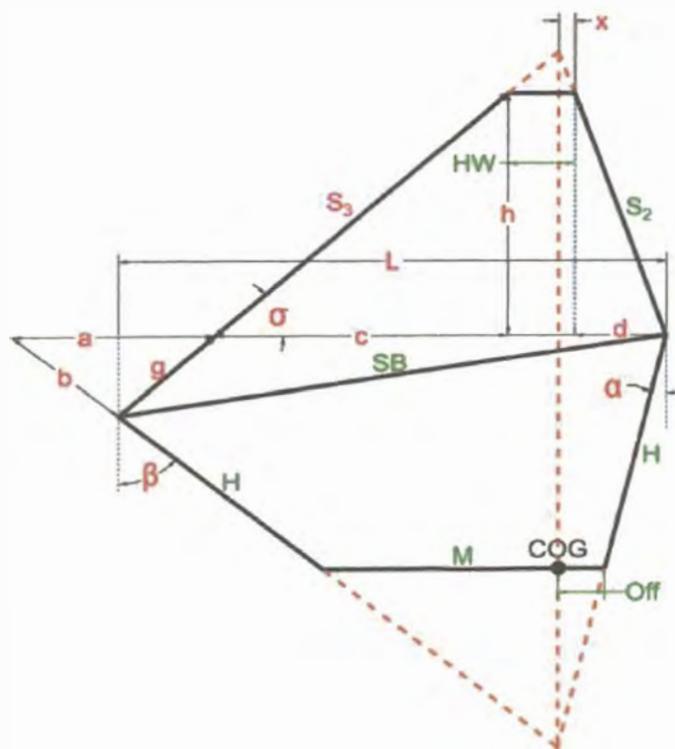


Figura 15: Diagrama de cuerpo libre del sistema de aparejos. [6]

Posteriormente, Minayhasehmi [9], expande el método de estimación de aparejos hasta 16 puntos de izaje, mediante la técnica de anidación de dos arreglos básicos de 2 y 4 puntos de sujeción (ver figura 5). En la figura 16, se muestra un ejemplo de módulo, un rack de tuberías, con 14 puntos de sujeción.



Figura 16: Montaje de módulo con 14 puntos de izaje. [9]

Adicionalmente, en la figura 17, se muestra la forma del sistema de aparejos obtenida mediante el método de Minayhasehmi [9]. En la figura se observa que los puntos de izaje del módulo se encuentran en la parte superior de este.

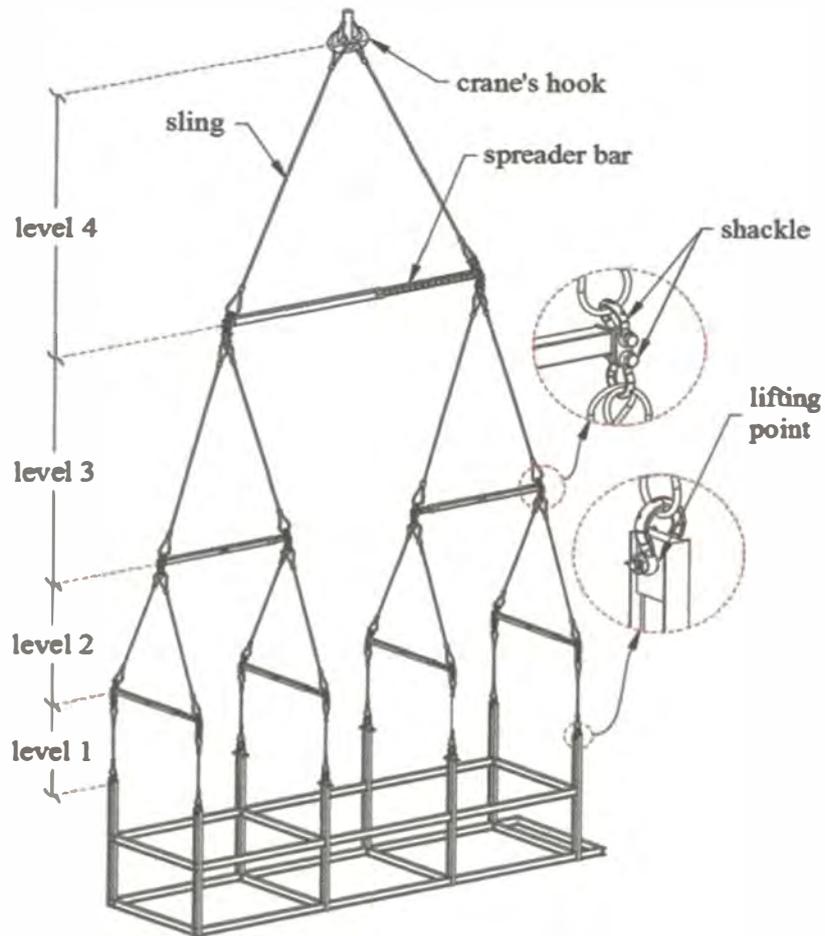


Figura 17: Selección de aparejos de izaje para módulo. [9]

Finalmente, el trabajo de Minayhasehmi [10], determina automáticamente los componentes del sistema de aparejos de un módulo, abarcando módulos que poseen desde 4 hasta 16 puntos de izaje. (Ver figura 18)

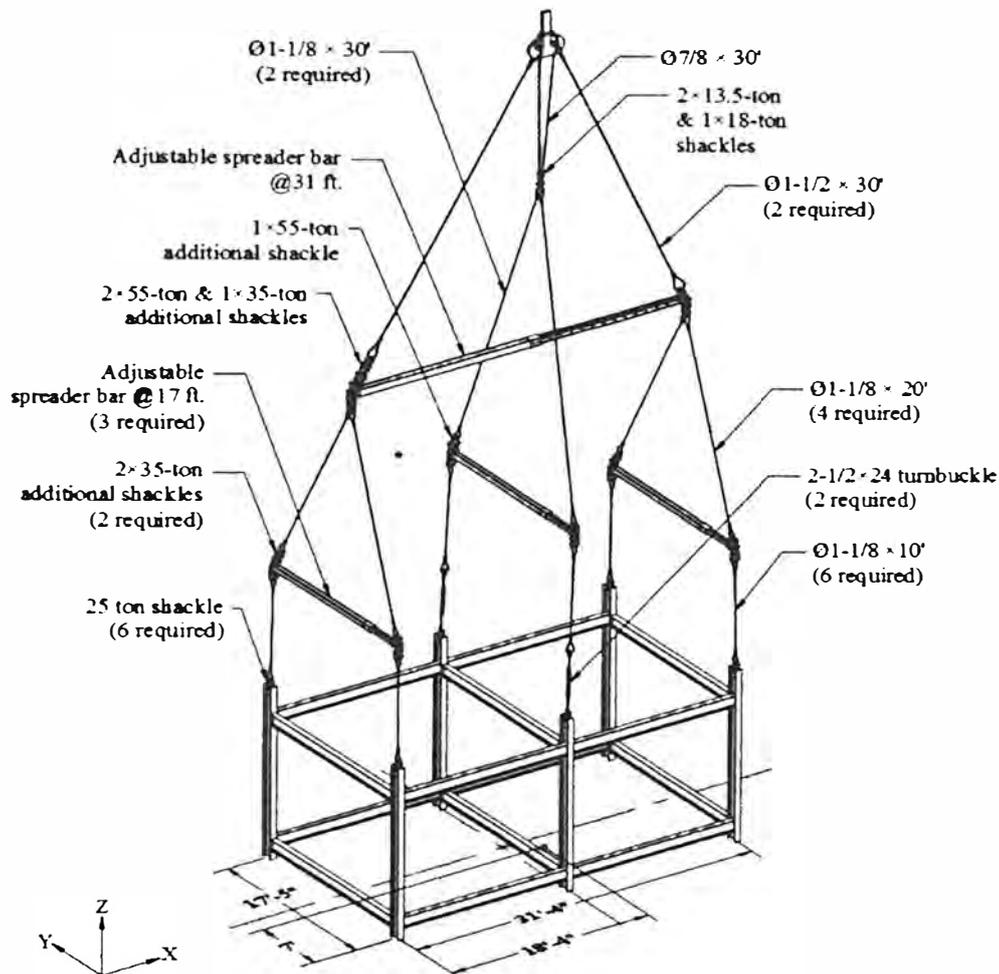


Figura 18: Selección de aparejos de izaje para módulo. [10]

2.1.6 Conceptos importantes relacionados a izajes

2.1.6.1 Centro de gravedad:

MacDonald et al. (2009) en su libro, *Handbook of Rigging, Lifting, Hoisting and Scaffolding for Construction and Industrial Operations* [7], definen al centro de gravedad como el punto donde se ubica teóricamente el peso total de un objeto. Por tal motivo, cuando el objeto esté suspendido libremente desde el gancho de un equipo de izaje, dicho punto siempre se ubicará verticalmente debajo del gancho. En consecuencia, si una carga es sujeta directamente por encima de su centro de gravedad, la carga estará en equilibrio y no se

inclinará respecto de la horizontal. Finalmente, el centro de gravedad de un objeto requiere de tres componentes cartesianos para estar completamente definido. (Ver figura 19)

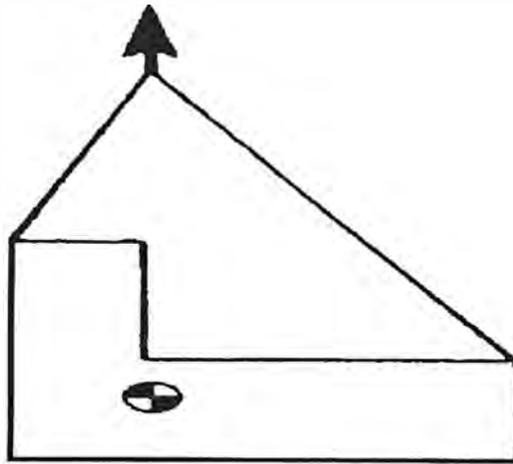


Figura 19: Elevación de una carga directamente sobre su centro de gravedad. [7]

2.1.6.2 Factor de carga asimétrica (Skew load factor):

Según Det Norske Veritas (2014), en su estándar DNV-OS-H205 "Lifting operations" [4], el factor de asimetría es responsable de la sobrecarga de los aparejos de izaje. El estándar indica que sus causas son diversas, siendo las más importantes:

- La imprecisión de la longitud de estrobos.
- Las deflexiones generadas en los objetos izados durante el proceso de izaje.
- Las tolerancias de fabricación en puntos de izaje.
- La geometría del gancho de la grúa.
- Diferencia en las deformaciones de los estrobos.

2.1.7 Eslingas (Slings):

Según la American Society of Mechanical Engineers, ASME (2018) en su estándar B30. 9 “Slings” [1], se denomina eslinga al ensamble de componentes empleado para manipular cargas; entendiéndose por manipular, a la acción de izar o jalar la carga desde una posición hacia otra; siendo las eslingas los elementos que conectan la carga con el equipo de izaje (grúas, derricks, etc.).

2.1.7.1 Nudo (Hitch):

Método mediante el cual se sujeta temporalmente una eslinga a una carga u objeto con el propósito de izarlo [1]. Existen los siguientes tipos de nudos:

- Vertical:

Consiste en conectar un extremo de una eslinga en la carga y el otro extremo conectarlo en el gancho, grillete u otro accesorio de izaje. (Ver figura 20)

- Ahorcado (Choker):

Consiste en abrazar la carga con un extremo de una eslinga para luego, hacer pasar por este extremo, el otro extremo y conectarlo al gancho, grillete u otro accesorio de izaje. (Ver figura 20)

- Canasta (Basket):

Consiste en abrazar la carga con una eslinga para luego conectar ambos extremos de esta al gancho, grillete u otro accesorio de izaje. (Ver figura 20)

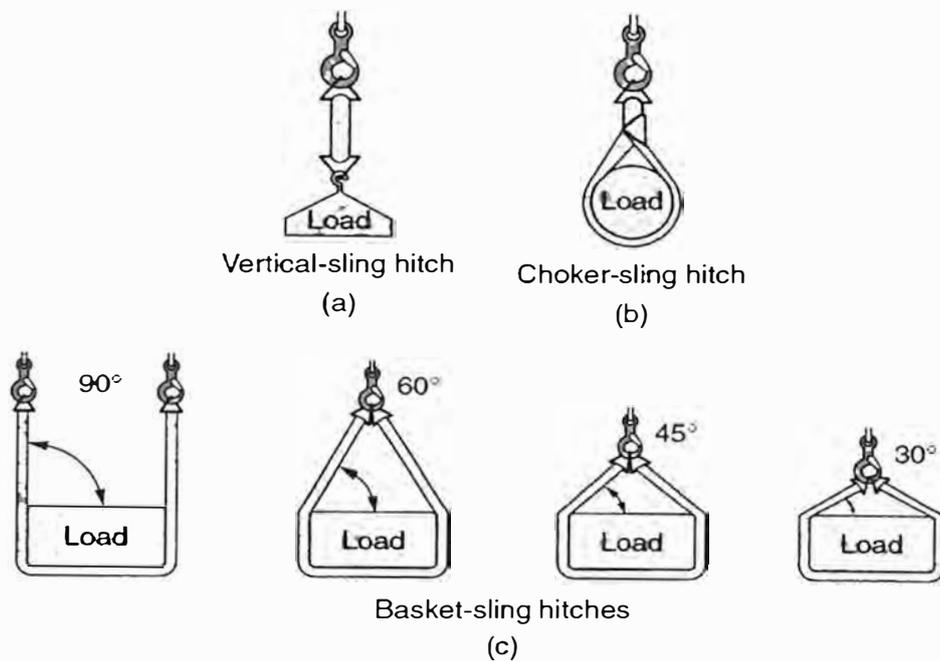


Figura 20: Tipos de nudo empleados en eslingas. [7]

2.1.7.2 Tipos de Eslinga:

Según la ASME [1], existen los siguientes tipos de eslinga:

- Eslinga de cadena de acero aleado
- Estrobo o eslinga de cable de acero
- Eslinga de malla metálica
- Eslinga de cuerda sintética
- Eslinga plana sintética
- Eslinga tubular de poliéster
- Eslinga tubular de alto rendimiento

A. Estrobo (Wire rope sling):

MacDonald et al. [7] lo definen como una máquina compleja compuesta por partes móviles que soportan la mayor parte de la carga además de tensiones adicionales cuando se eleva la carga.

Adicionalmente, los autores señalan que los estrobos, tipo cable, están compuestos por 3 elementos: alambre, hebras y un centro. El elemento básico es el alambre de acero. Luego, las hebras son formadas por un número específico de alambres que son enrollados helicoidalmente sobre un alambre central. Finalmente, un determinado número de hebras son dispuestas en hélice sobre un centro, que puede estar hecho de fibra o de otra hebra de acero. En la figura 21 se muestra los componentes del estrobo y su disposición entre ellos.

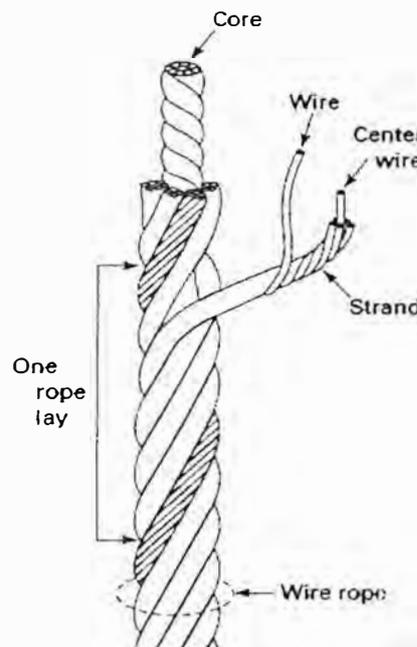


Figura 21: Estrobo tipo cable. [1]

Por otro lado, los estrobos pueden ser fabricados en 3 configuraciones diferentes [1] [7], pudiendo ser:

- Ojo - Ojo (Eye – Eye):

Presenta en sus dos extremos una abertura u ojo formado por la misma cuerda de alambre, estos ojos son empalmados mecánica o manualmente. (Ver figura 22)

- Sin fin (Endless):

Es una cuerda de acero formada por seis cuerdas enrolladas sobre una cuerda central con los extremos unidos manual o mecánicamente, tal que forme un cuerpo sin fin. (Ver figura 22)

- Múltiple (Endless):

Consiste en combinar dos, tres o cuatro estrobos simples, ojo-ojo, usados juntos para izar un objeto que tiene los accesorios de elevación necesarios. Este tipo de sujeción proporciona una buena estabilidad cuando la carga es distribuida equitativamente en sus líneas. (Ver figura 23)

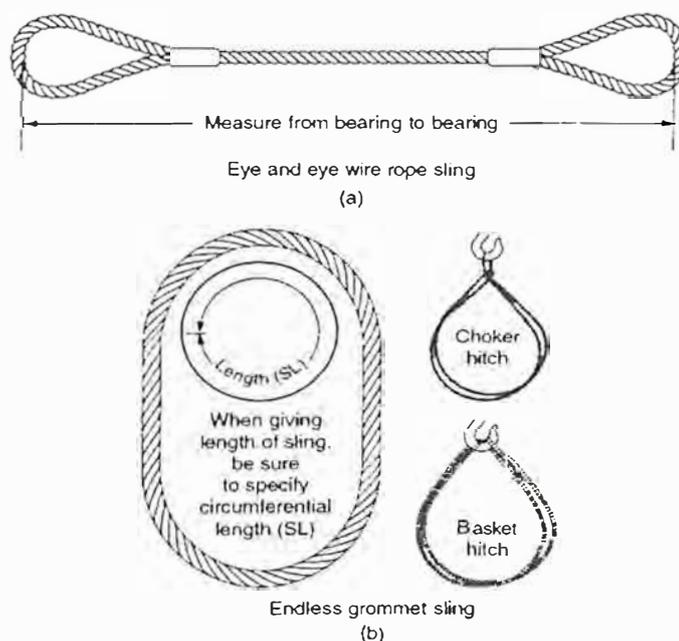


Figura 22: Configuraciones de estrobos: a) Ojo-Ojo y b) Sinfin. [7]

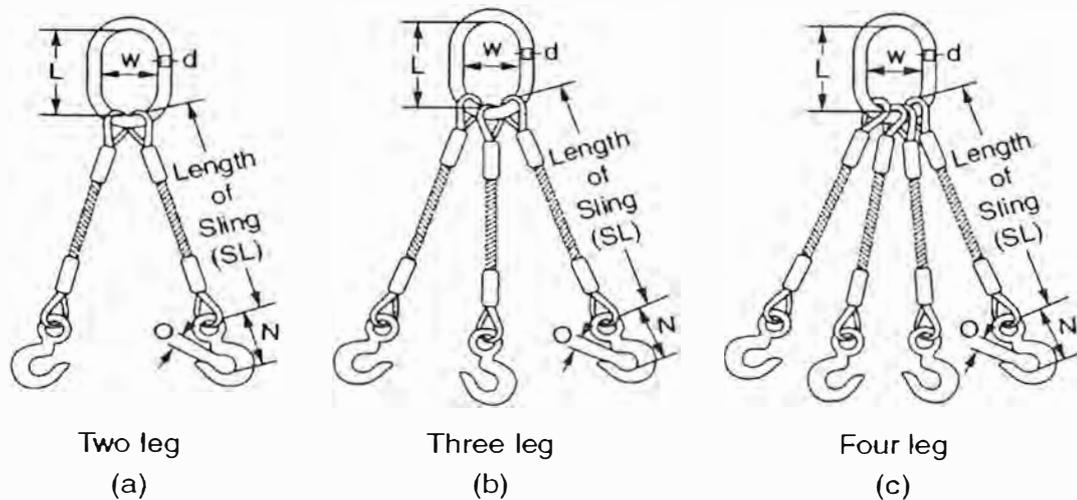


Figura 23: Configuración múltiple de estrobos. a) dos líneas, b) tres líneas y c) cuatro líneas. [7]

Adicionalmente, la ASME [1] proporciona pautas para selección de los estrobos, algunas de ellas son:

- Estrobos aparentemente dañados no deben ser utilizados, hasta no ser inspeccionados y aceptados para su empleo.
- La capacidad (rated load) del estrobo, establecida por el fabricante, no debe ser excedida, en el caso de usar estrobos múltiples, la tensión de ninguna línea debe exceder la capacidad del estrobo.
- Cuando se utilizan múltiples líneas de estrobos con carga no simétrica, una persona calificada debe realizar el análisis para evitar que una de las líneas esté sobrecargada.
- Cuando se emplea un estrobo en nudo canasta y la relación de diámetros D/d , que se ilustra en la figura 24, es menor a $25/1$, la capacidad de carga del estrobo deberá reducirse según las recomendaciones del fabricante o del personal calificado.

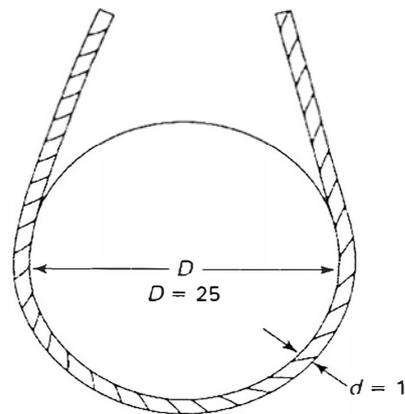


Figura 24: Relación D/d , en estrobos. [1]

2.1.8 Accesorios de izaje (Rigging Hardware):

La ASME (2015) en su estándar B30.26 “Rigging Hardware” [2], proporciona consideraciones referentes a la fabricación, inspección, operación y mantenimiento de los siguientes tipos de accesorios:

- Grilletes (Shackles)
- Accesorios ajustables: Tensores (turnbuckle), Cáncamos (eye bolt) y Ojillo roscado (eye nut), Cáncamos giratorios (Swivel ring)
- Accesorios de compresión: grapas (clip), terminal de cuña (wedge socket)
- Eslabones: ensamble de eslabones (master link assembly), argolla (round link) redonda, argolla tipo pera (pear shaped), destorcedor (swivel).
- Pastecas y poleas (rigging blocks).
- Dispositivos que detectan tensión: Dinamómetros, célula de carga grillete.

2.1.8.1 Grilletes:

Según la ASME [2], un grillete es un conector de carga con forma de “U” diseñado para ser usada junto con un pasador removible.

- Por forma cuerpo:

Pueden ser: tipo ancla, para cadena o tipo “D” y para eslinga sintética. (Ver figura 25)

- Por tipo de pasador:

Pueden ser: pin tipo tornillo o pin tipo perno. (Ver figura 25)

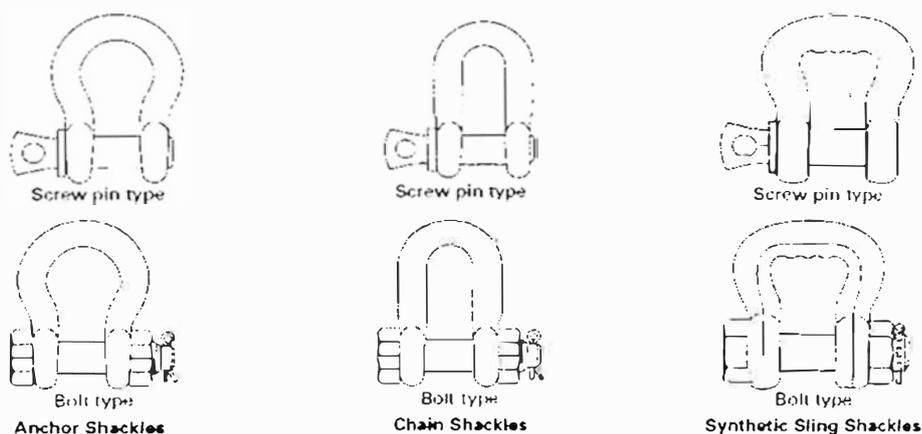


Figura 25: Tipos de grilletes. Izquierda: Grilletes tipo D. Centro: Grillete para cadena. Derecha: Grillete para eslinga sintética. [2]

Adicionalmente, la ASME [2] proporciona pautas para selección de grilletes, algunas de ellas son:

- Elegir un grillete que se ajuste a las características: del tipo de eslinga, del objeto, del ángulo de carga (ver figura 26); siguiendo las recomendaciones del fabricante.

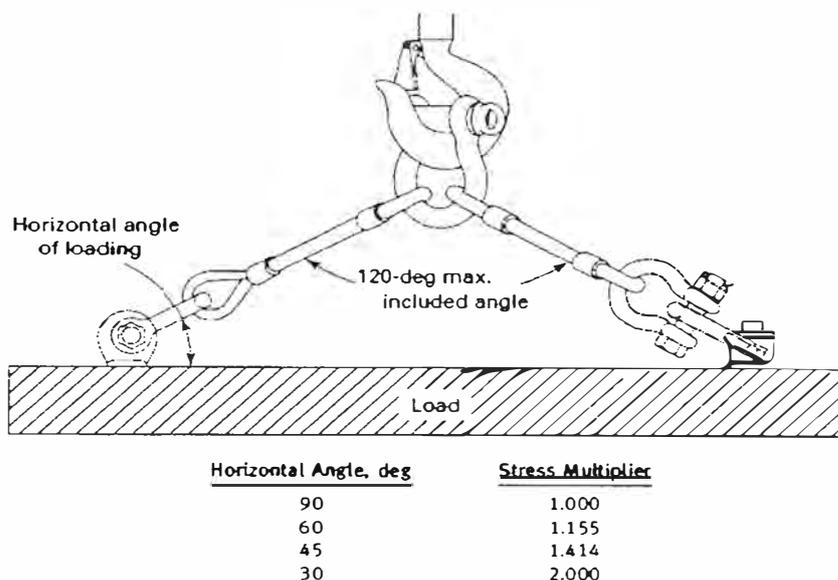


Figura 26: Ángulo de carga en grilletes. [2]

- La capacidad (rated load) del grillete, establecida por el fabricante, no debe ser excedida.
- Grilletes aparentemente dañados no deben ser utilizados, hasta no ser inspeccionados y aceptados para su empleo.

Finalmente, la ASME [2] presenta algunas buenas prácticas relacionadas a la utilización de grilletes:

- Los grilletes no deben estar expuestos a cargas súbitas.
- Estrobos, u otros tipos de eslingas, en configuración múltiple no deben ser aplicados sobre el pin del grillete. En la figura 27 se muestran las partes del grillete.
- Cuando un grillete es cargado lateralmente, su capacidad debe ser reducida siguiendo la información indicada en la figura 28, o las recomendaciones del fabricante del grillete.
- Cuando se utilizan estrobos en configuración múltiple sobre el cuerpo del grillete, el ángulo de carga en el grillete no debe exceder los 120°. (Ver figura 26)

- Cuando se utiliza un grillete en una eslinga con nudo ahorcado (choker), el pin del grillete debe estar conectado al ojo que ahorca.

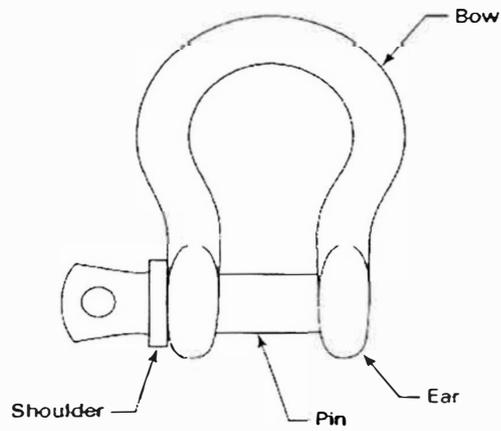


Figura 27: Partes de un grillete. [2]

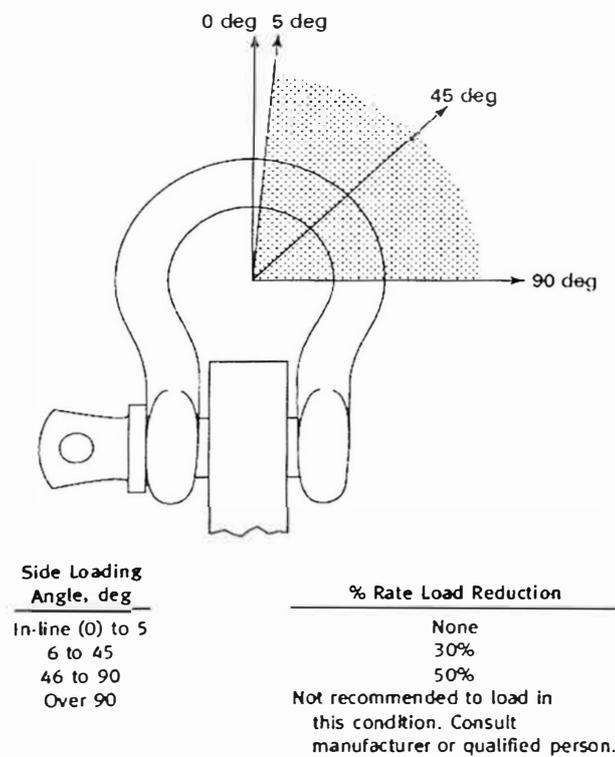


Figura 28: Tipos de grilletes. [2]

2.2. Marco conceptual

Algoritmo: Es la secuencia ordenada de instrucciones específicas que permiten desarrollar una tarea o actividad y producir un entregable.

Sistema: Conjunto de elementos dispuestos en forma ordenada.

Aparejo: Todo elemento' empleado en la sujeción de una carga para su manipulación o izaje. Dentro de estos elementos están: las eslingas (todos los tipos), grilletes, tensores, balancines, etc.

Izar: Levantar, trasladar y posicionar un objeto mediante el empleo de un equipo especialmente diseñado para elevar cargas.

Módulo: Ensamble compuesto por una estructura diseñada para albergar equipos de proceso e instrumentación, válvulas, tuberías y cables eléctricos; donde todos los elementos están conectados y, por lo general, se han realizado pruebas que garantizan la operación del conjunto.

CAPÍTULO III

HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.1 Hipótesis general

El desarrollo de un algoritmo de automatización basado en un modelo matemático existente mejorará el tiempo de diseño del sistema de aparejos empleados en el izaje de módulos con puntos de sujeción en su base.

3.2 Operacionalización de variables

Variable independiente: Algoritmo de automatización basado en un modelo matemático existente.

Variable dependiente: Tiempo de diseño del sistema de aparejos empleado en el izaje de módulos con puntos de sujeción en su base.

Tabla 1: Indicadores de la investigación.

Variables	Indicadores
Variable independiente: Algoritmo de automatización basado en un modelo matemático existente.	Tiempo de cálculo de algoritmo. Porcentaje de error en tensiones obtenidas por el algoritmo Porcentaje de error en dimensiones obtenidas por el algoritmo
Variable dependiente: Tiempo de diseño del sistema de aparejos empleado en el izaje de módulos.	Porcentaje de reducción de tiempo

(Fuente: Elaboración propia)

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Tipo y diseño de la investigación

La presente investigación es de tipo cuantitativa, porque desarrolla su hipótesis basándose en teorías previamente desarrolladas, como: modelos matemáticos basados en estática e investigaciones relacionadas a automatizar procesos del sector construcción mediante algoritmos; para luego comprobar dicha hipótesis mediante un razonamiento deductivo que inicia con la recolección de datos contrastables y repetibles, como, por ejemplo, la magnitud de las tensiones calculadas por el algoritmo o el tiempo requerido por el algoritmo para generar una alternativa de solución; continúa con el procesamiento de la data; y finaliza con el análisis de la información; por ejemplo, con la comparación de las tensiones calculadas por el algoritmo respecto de una solución numérica obtenida por elementos finitos. Adicionalmente, las conclusiones que se obtendrán en este trabajo podrán aplicarse a situaciones diferentes a los casos presentados.

Adicionalmente, el alcance de este trabajo es explicativo porque prueba la relación causa efecto entre el empleo del algoritmo y la reducción en el tiempo de diseño de sistemas de aparejos empleados en izajes de módulos.

Finalmente, la investigación tiene un diseño experimental, debido a que la información relacionada al desempeño del algoritmo se obtiene ensayando casos reales de estudios. Luego los resultados obtenidos por el algoritmo son comparados con resultados obtenidos por medios convencionales.

4.2 Unidad de análisis

En la presente investigación se emplea como unidad de análisis, 07 subestaciones eléctricas modulares que fueron instaladas en la construcción del proyecto Planta de Sulfuros - Mina Justa, perteneciente a Marcobre y ubicado en el distrito de Marcona, provincia de Nasca, perteneciente a la región Ica, Perú.

Las dimensiones de las 07 subestaciones están comprendidas entre 13 y 20 m de largo, de 4 a 5 m de ancho y de alto entre 4 y 4.1 m; y sus pesos que oscilan entre 29 y 47 toneladas. Además, los centros de gravedad de dichas subestaciones se encuentran desfasados de su centro geométrico en dos direcciones.

Adicionalmente, estas subestaciones han sido diseñadas para ser izadas desde su base por lo que poseen sus puntos de sujeción en el bastidor, como se exhibe en la figura 29.

La elección de módulos con puntos de sujeción en el bastidor como unidad de análisis, responde a la necesidad de estudiar estos objetos, pues están presente en situaciones reales (como proyectos de construcción) y que, a pesar de ello, no han sido considerados, hasta el momento, en las investigaciones existentes relacionadas a la selección automatizada de aparejos para izajes de módulos (como se manifiesta en la sección 1.4 de este

documento), las que se enfocan, únicamente, en módulos con puntos de sujeción ubicados en la parte superior.



Figura 29: Sala eléctrica modular con 8 puntos de izaje ubicados en su base.

(Fuente: elaboración propia)

4.3 Matriz de consistencia

Título: “Algoritmo de automatización basado en modelo matemático existente para reducir el tiempo de diseño del sistema de aparejos empleados en el izaje de módulos”.

Tabla 2: Matriz de consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables		Indicadores	Técnica de recolección de datos
¿Cómo afectan las limitaciones del sistema de aparejos tradicional a la selección de aparejos en el izaje de módulos sujetos desde su base?	Reducir el tiempo de diseño del sistema de aparejos empleado en el izaje de módulos sujetos desde su base.	El desarrollo de un algoritmo de automatización basado en un modelo matemático existente reducirá el tiempo de diseño del sistema de aparejos empleado en el izaje de módulos sujetos desde su base.	(VI) Algoritmo de automatización basado en un modelo matemático existente.	(VD) Tiempo de diseño del sistema de aparejos empleado en izaje de módulos sujetos desde su base	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de cálculo del algoritmo • Porcentaje de error en las tensiones • Porcentaje de reducción del tiempo 	<ul style="list-style-type: none"> • Reporte de los resultados del algoritmo. • Reporte de la geometría obtenida por el método convencional • Reporte de las tensiones obtenidas por el método convencional • Reporte de dimensiones de módulos • Reporte del tiempo de diseño por el método convencional

(Fuente: Elaboración propia)

CAPÍTULO V

DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

5.1 Diseño de sistema de aparejos para el izaje de módulos con puntos de sujeción en su base.

Para diseñar un sistema de aparejos para el izaje de un módulo se requiere determinar tres variables que definan completamente a dicho sistema. Estas variables son:

- La geometría del sistema de aparejos.
- Las tensiones que soportaran los aparejos de izaje del sistema.
- La lista de aparejos de izaje, considerando aparejos de una base de datos finita.

Es importante señalar la dependencia no lineal existente entre dichas variables. Por ejemplo, las tensiones en los aparejos, dependen de la geometría del sistema, en tanto que la geometría está relacionada a los elementos disponibles en la base de datos de los aparejos. Finalmente, la selección de aparejos depende de la geometría del sistema y de las tensiones en los aparejos.

Adicionalmente, la geometría del sistema de aparejos depende de las características del módulo evaluado, en este caso, un módulo con puntos de izaje en su base, por tal motivo, es relevante establecer como influyen dichas características en el diseño del sistema.

5.1.1 Características de la Unidad de análisis

La unidad de análisis elegida en la presente investigación está compuesta por 07 subestaciones modulares (ver figura 30) que comparten las siguientes características principales:

- Los puntos de izaje están instalados en el bastidor del módulo.
- Los puntos de izaje son orejas de izaje. (Ver figura 31)
- El módulo tiene 08 orejas de izaje.
- La orientación de las orejas de izaje es inclinada. (Ver figura 32)

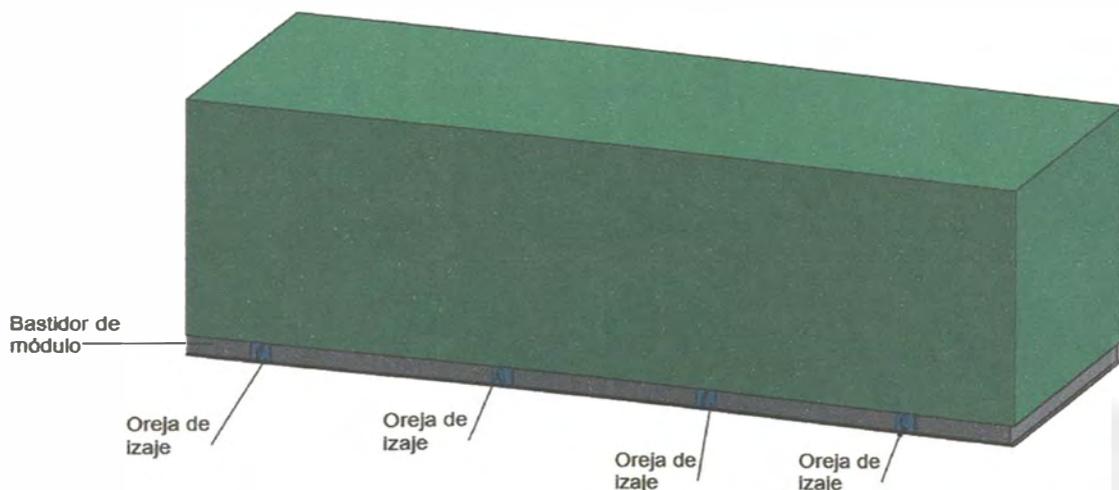


Figura 30: Subestación eléctrica modular con 8 puntos de izaje (4 por lado) ubicados en el bastidor.

(Fuente: elaboración propia)

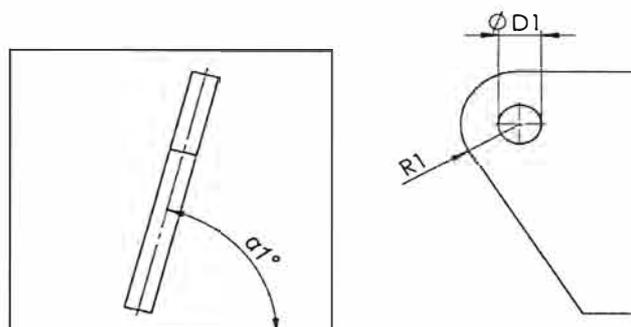


Figura 31: Orejas de izaje de subestaciones modulares.

(Fuente: elaboración propia)

Es importante señalar que las dimensiones y orientación de las orejas de izaje son relevantes para el diseño del sistema de aparejos. En el caso de las dimensiones de las orejas, estas limitan el tamaño de grilletes compatibles. Mientras que la orientación indica la línea de aplicación de las cargas.

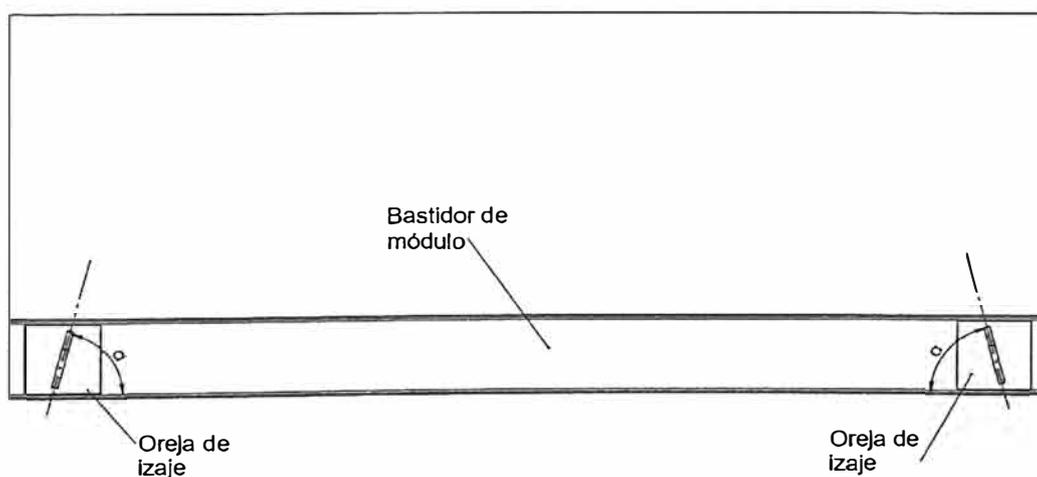


Figura 32: Orientación de orejas de izaje de subestaciones modulares.

(Fuente: elaboración propia)

En contraste, los módulos que componen la unidad de análisis también presentan diferencias, relacionadas principalmente a aspectos geométricos, tales como:

- Dimensiones del módulo (largo, alto, ancho).
- Ubicación del centro de gravedad.
- Distancia entre orejas de izaje.
- Dimensiones de las orejas de izaje. (Figura 31)

En la figura 33, se muestran las principales dimensiones de las subestaciones modulares estudiadas. Además, se presenta la localización del centro de gravedad del módulo y se exhiben las distancias entre los puntos de izaje ubicados en el bastidor de la subestación.

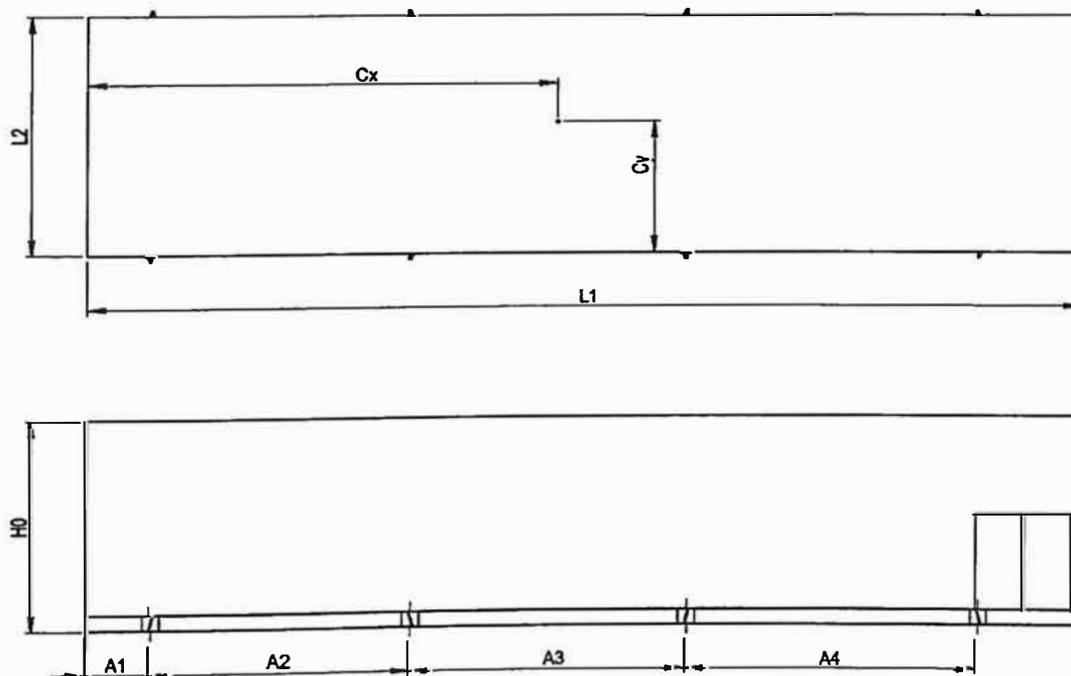


Figura 33: Posición de puntos de izaje en módulo.

(Fuente: elaboración propia)

En la tabla 3, se muestra el resumen de las características geométricas de los módulos estudiados, obtenidos de los planos de construcción del proyecto mediante los formatos empleados en la investigación (ver Anexo I).

Tabla 3: Información de dimensiones de las subestaciones modulares.

Item	Nombre de módulo	Posición de puntos de izaje				Dimensiones de módulo			Peso (Kg)	Centro de gravedad	
		A1 (mm)	A2 (mm)	A3 (mm)	A4 (mm)	Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)		Cx (mm)	Cy (mm)
1	2371-SS-201	1150	4620	4978	5368	18	5	4.042	45367	8403	2747
2	2372-SS-202_1	1949	3382	3732	3316	14.5	5	4.048	41400	6965	2848
3	2372-SS-202_2	1874	3845	3264	3562	15	5	4.048	40406	6954	2669
4	2373-SS-203_1	2651	4528	5322	4999	20	4	4.18	43742	9023	2620
5	2373-SS-203_2	2631	4785	5665	4806	20	4	4.18	40129	9980	1962
6	2374-SS-204	2125	4080	4632	4172	17	5	4.048	46829	8144	2507
7	4310-SS-407	1744	3179	3201	3732	13	4.5	4.048	28233	6451	2132

(Fuente: Elaboración propia)

Las características expuestas en esta sección se traducen en información relevante para el diseño del sistema de aparejos porque inciden en su geometría, y, por ello, forman parte de la data de entrada del algoritmo.

5.1.2 Sistema de aparejos propuesto para módulos con puntos de izaje en su base.

Identificadas las características que influyen en el sistema de aparejos de los módulos analizados en este documento, se propone un sistema genérico que se adapte a ellas, de tal manera, que se garantice el izaje equilibrado (sin inclinaciones respecto al plano horizontal) y seguro de la carga.

En la figura 34, se muestra el sistema de aparejos propuesto, el cual presenta diferencias con sistemas de aparejos propuestos en investigaciones anteriores (ver figura 17), a pesar de emplear el mismo método tradicional de sujeción.

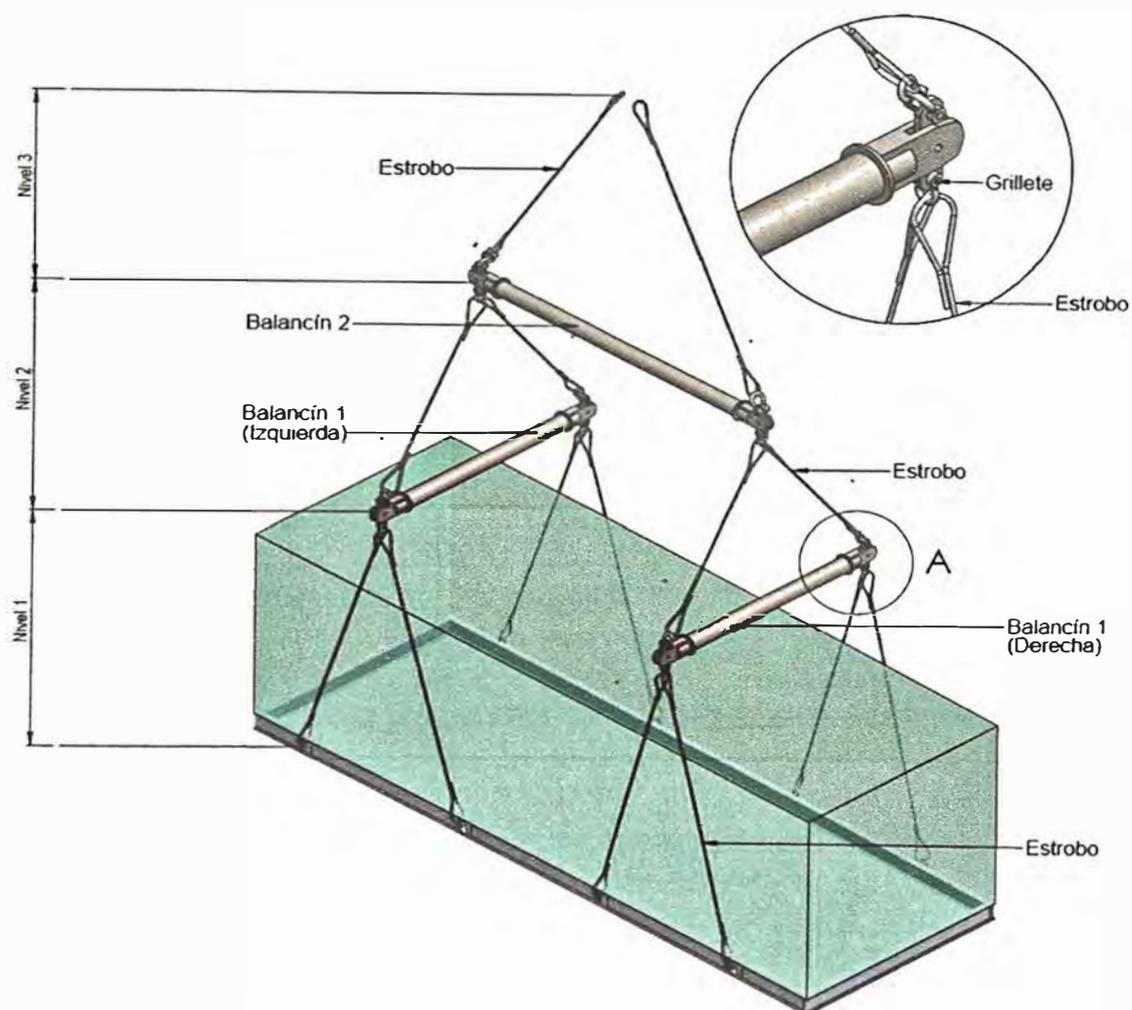


Figura 34: Sistema de aparejos propuesto para el izaje de módulo con puntos de sujeción en su bastidor.

(Fuente: elaboración propia)

Dicho método tradicional consiste en formar triángulos empleando grilletes, estrobos o eslingas y balancines, como la disposición mostrada en el nivel 2 de la figura 34.

La principal diferencia con los sistemas de trabajos precedentes es la orientación inclinada de los estrobos del nivel 1, que se unen en el punto inferior del balancín 1 (figura 34). Además, para emplear este sistema de

aparejos es necesario que el bastidor esté diseñado para soportar las cargas no verticales que generan los estrobos de nivel 1 durante el izaje. En particular, en el proyecto Planta de Sulfuros – Mina Justa, el proveedor de los módulos contempló emplear este sistema de aparejos.

Por otro lado, este tipo de sujeción es particularmente útil para los módulos cuyo centro geométrico y su centro de gravedad difieren, porque permite, mediante el ajuste de las longitudes de sus estrobos (tanto en el nivel 2 como en el nivel 3), alinear el gancho del equipo de izaje con el centro de gravedad (condición indispensable para un izaje seguro).

Sin embargo, una desventaja del método tradicional es que requiere gran cantidad de aparejos de izaje. Además, genera un sistema de aparejos alto, debido a los 3 niveles que emplea.

En ese sentido, considerando que la investigación se desarrolla en el contexto de la ejecución de un proyecto de construcción minera, las características como cantidad, capacidad, tipo, etc.; de los recursos necesarios para los izajes (grúas, aparejos, etc.) están definidas y son finitas. Además, dichas características son consideradas por el algoritmo, por ser una restricción en la selección de los elementos de izaje.

Los aparejos considerados en este trabajo son:

- Estrobos
- Grilletes
- Balancines
- Tecles (conceptualmente, no es aparejo, sin embargo, se utiliza como tal en este trabajo, aunque de forma limitada)

5.1.3 Lineamientos para el diseño del sistema de aparejos propuesto

Resultado de identificar las características de los módulos estudiados y su interacción con el sistema de aparejos propuesto para su manipulación, se postulan los siguientes lineamientos (geométricos):

- Los estrobos (eslingas) del nivel 1 tienen la misma longitud. (Figura 34)
- La longitud del balancín 1 (izquierda y derecha) es mayor que el ancho del módulo. Además, ambos balancines 1 son iguales. (Figura 34)
- Los estrobos de menor longitud del nivel 2 deben ser simétricos.

Adicionalmente, la investigación recoge las buenas prácticas, algunas de ellas presentes en normas, relacionadas al uso de aparejos que se traducen en los siguientes lineamientos:

- El ángulo formado por estrobos (figura 26) debe ser agudo. Se emplean ángulos menores a 75° .
- El ángulo formado por la proyección del estrobo de nivel 1 sobre el plano YZ y la vertical (α o β de la figura 36) debe ser menor de 3° .
- En el caso de los módulos desfasados, la compensación por serie de grilletes debe emplear un máximo de 3 de estos elementos. Considerando el que se conecta con el balancín.
- En el caso de los módulos desfasados, se establece en 20 mm el error máximo admitido para la diferencia entre la longitud conseguida empleando una cadena de grilletes y la longitud teórica calculada.
- Se propone emplear un factor de utilización para cada aparejo, similar al factor de asimetría de la sección 2.1.6, y se establece su valor 0.85.

En este capítulo, se denomina módulo desfasado aquel cuyo centro de gravedad y geométrico difieren. Como se demuestra en la siguiente sección, el desfase origina que las longitudes de los estrobos de un mismo nivel

(niveles 2 y 3) sean diferentes. Esa diferencia se compensa convencionalmente, empleando un arreglo de grilletes colocados en serie. Sin embargo, cuando no es posible encontrar una solución se emplean tecles o tensores (turnbuckles).

5.2 Modelo matemático para el dimensionamiento de la geometría del sistema de aparejos

El modelo presentado en esta sección tiene por finalidad facilitar la estimación de todas las longitudes y ángulos que definen la geometría del sistema de aparejos propuesto. En ese sentido, el modelo simplifica el sistema de aparejos real mediante líneas, que representan la geometría de dicho sistema. (Ver figura 35)

Como punto de partida, este nuevo modelo mantiene el concepto propuesto por Hashemi et al. [6], de hacer coincidir los puntos de intersección de las eslingas (o estrobos) con la recta vertical que pasa por el centro de gravedad del módulo (revisar sección 2.1.6).

Para comprender el funcionamiento del nuevo modelo es necesario recurrir a la figura 35. En ella se muestran tres conjuntos de líneas (verde, azul y rojo) y una línea vertical (magenta). Los conjuntos de líneas azul y verde, representa un mismo modelo (modelo para niveles los 1-2) empleado dos veces. Mientras que el conjunto de líneas rojas, grafica el modelo para los niveles 2-3. Finalmente, la línea vertical magenta representa la proyección del centro de gravedad alineado con el gancho del equipo de izaje.

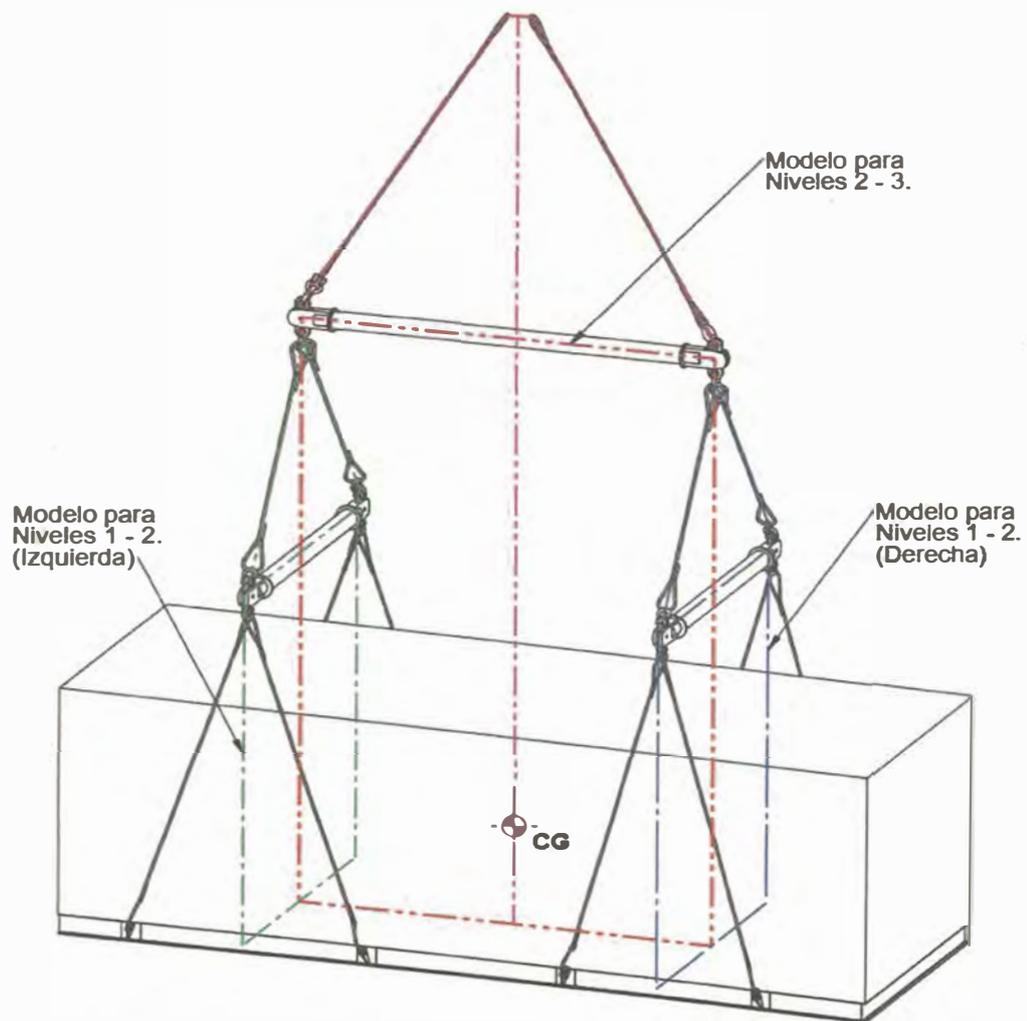


Figura 35: Modelo matemático aplicado a módulo con 8 puntos de sujeción ubicados en su base.

(Fuente: elaboración propia)

Se generan dos modelos para adaptarse a la geometría del módulo, como se expone líneas abajo en esta sección, sin embargo, ambos modelos siguen el mismo concepto.

5.2.1 Modelo matemático para los niveles 1-2:

Este modelo representa el primer y segundo nivel del sistema de aparejos (líneas verdes o azules de la figura 35), es decir, comienza en los puntos de izaje (base del módulo), luego se conecta a un balancín 1 (ver figura 35) y termina, conectándose con la parte inferior del balancín 2 (ver figura 35)

En la figura 36 se presenta un diagrama de cuerpo libre del modelo para niveles 1-2, y las dimensiones que lo definen completamente. Algunas de estas dimensiones son datos (inputs), en contraste, otras son incógnitas (outputs) que deben ser obtenidas en función de las primeras.

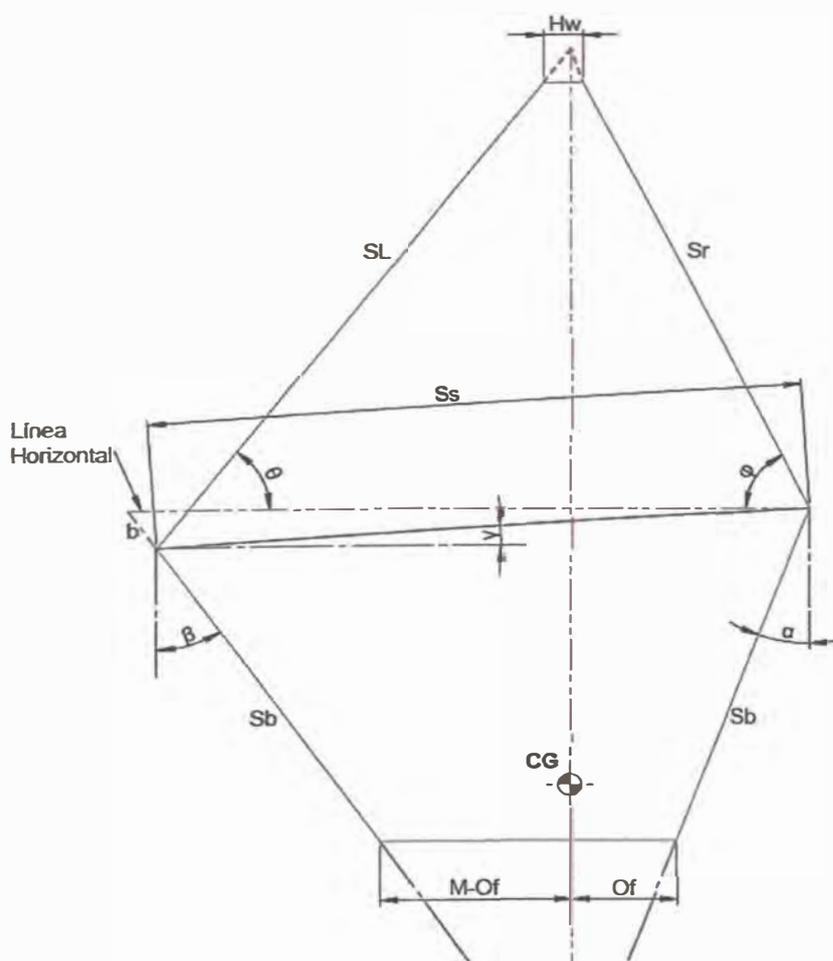


Figura 36: Diagrama de cuerpo libre del modelo para los niveles 1-2.

(Fuente: elaboración propia)

Adicionalmente, este modelo solo considera el caso donde la longitud del balancín es mayor que el ancho del módulo. Esta restricción geométrica evita que la interacción entre la parte superior del módulo y los estrobos.

A continuación, se presentan los valores conocidos (inputs):

- M: Ancho del módulo. Nota: En el modelo para niveles los 2-3, M representa la distancia entre balancines del primer nivel.
- Of: Distancia entre el centro de gravedad y el punto de izaje más próximo.
- Sr: Longitud total resultado de sumar la longitud del estrobo y grilletes de la línea del nivel 2.
- Sb: Longitud total resultado de sumar la longitud del estrobo y grilletes de la línea del nivel 1.
- Ss: Longitud del balancín (spreader beam).
- Hw: Ancho de la parte superior. En este caso, Hw es igual a 0. Nota: En el modelo, para niveles los 2-3, Hw representa el ancho de gancho de grúa.

Por otro lado, las incógnitas del modelo para los niveles 1-2, son:

- SL: Longitud total, resultado de sumar la longitud del estrobo y los grilletes de la línea del nivel 3.
- α : Ángulo entre el estrobo del nivel 1 y la vertical.
- β : Ángulo entre el estrobo del nivel 1 y la vertical.
- Θ : Ángulo entre el estrobo del nivel 2 y la horizontal.
- φ : Ángulo entre el estrobo del nivel 2 y la horizontal.

Para facilitar el desarrollo de las ecuaciones del modelo, este se divide en dos: parte inferior y parte superior.

Luego, se inicia el cálculo en la parte inferior del modelo para niveles 1-2, aplicando geometría analítica y definiendo el origen en el punto O. (ver figura 37)

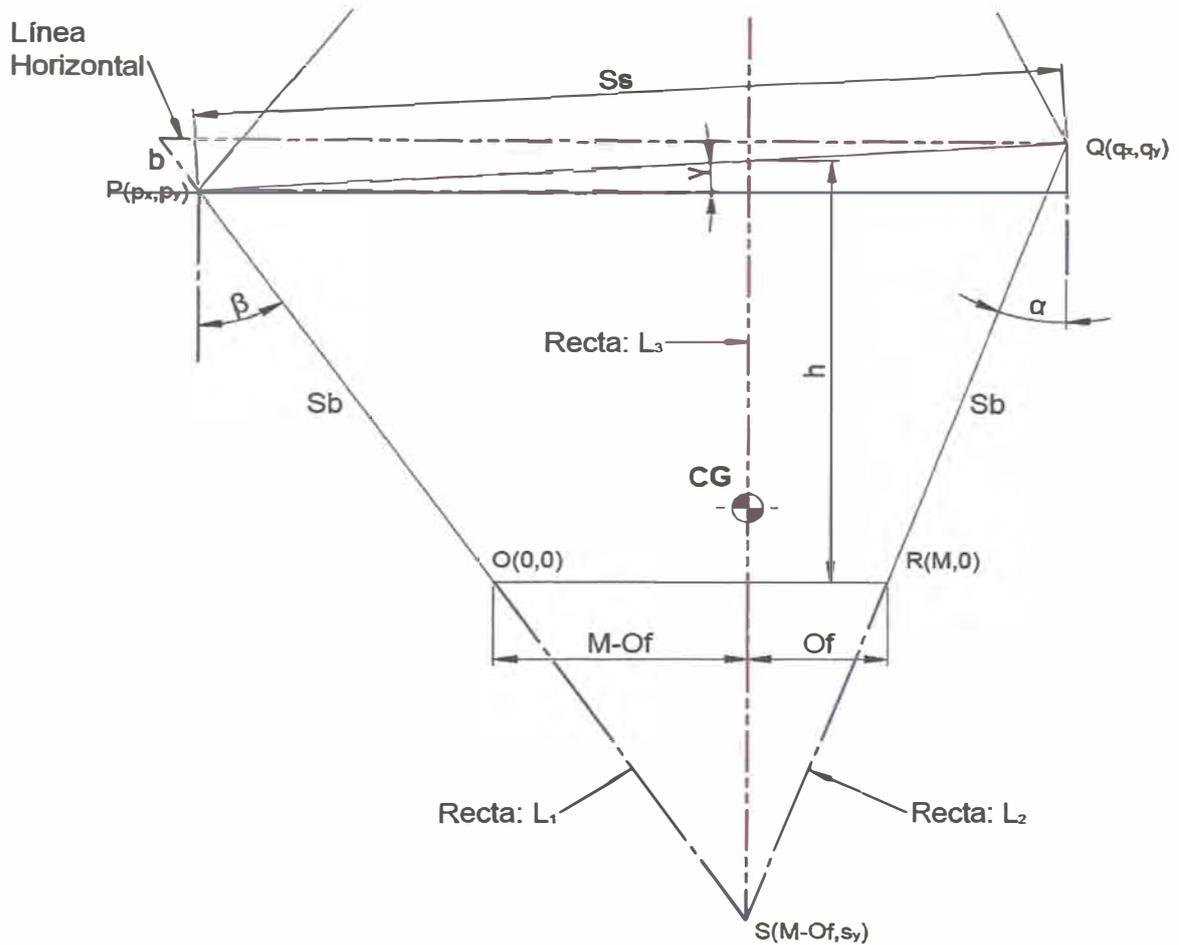


Figura 37: Esquema de parte inferior del modelo para los niveles 1-2, con origen de coordenadas en el punto O.

(Fuente: elaboración propia)

Además, se definen las siguientes rectas:

$$L_1: y = k_1 x \quad (1)$$

$$L_2: y = k_2 x - k_2 M \quad (2)$$

$$L_3: x = M - of \quad (3)$$

Debido a que la distancia del segmento \overline{OP} es igual a S_b , se expresar S_b de la siguiente manera:

$$S_b^2 = p_x^2 + (p_x k_1)^2$$

$$S_b = -p_x \sqrt{1 + k_1^2} \quad (4)$$

Considerando que S pertenece a L_1 , entonces:

$$S_y = -k_1(M - of) \quad (5)$$

Adicionalmente, S pertenece a L_2 , entonces:

$$S_y = -k_2 of \quad (6)$$

Igualando (5) y (6), se obtiene:

$$k_1 = k_2 \frac{of}{(M - of)} \quad (7)$$

Luego, se define "e" como sigue:

$$e = \frac{of}{(M - of)} \quad (8)$$

Además, se observa que el segmento \overline{RQ} es igual a S_b , entonces S_b es:

$$S_b^2 = (q_x - M)(k_2^2 + 1) \quad (9)$$

Por otro lado, se observa que el segmento \overline{PQ} es igual a S_{sb} , entonces S_{sb} es igual a:

$$S_b^2 = (q_x - p_x)^2 + (q_y - p_y)^2 \quad (10)$$

Finalmente, reemplazando en (10) las variables q_x , p_x , q_y , p_y , k_1 , se obtiene:

$$0 = \left(M + \frac{Sb}{\sqrt{1+(k_2e)^2}} + \frac{Sb}{\sqrt{1+(k_2)^2}} \right)^2 + \left(\frac{Sb(k_2e)}{\sqrt{1+(k_2e)^2}} + \frac{Sb(k_2)}{\sqrt{1+(k_2)^2}} \right)^2 - S_S^2 \quad (11)$$

Para resolver (11), se requiere aplicar métodos numéricos. En este trabajo, se empleó el método de Newton-Raphson.

Con el valor de k_2 , se resuelven las siguientes variables:

$$\alpha = \tan^{-1}(1/k_2) \quad (12)$$

$$\beta = \tan^{-1}(1/(k_2e)) \quad (13)$$

Adicionalmente,

$$b = Sb \times \frac{1}{e} \times \frac{\sin \alpha}{(\sin \beta - 1)} \quad (14)$$

$$Ss_x = Sb \times (\sin \alpha + \sin \beta) + M \quad (15)$$

$$b_y = b \times \cos \beta \quad (16)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{b_y}{Ss_x} \right) \quad (17)$$

$$h_1 = Sb \times \cos \beta + (Sb \times \sin \beta + M - of) \times \tan \gamma \quad (18)$$

Posteriormente, habiendo determinado las incógnitas relacionadas a la parte inferior modelo para niveles 1-2, se procede a calcular las incógnitas restantes (correspondientes a la parte superior), para ello se emplea, nuevamente, la geometría analítica. Adicionalmente, se establece que P sea el nuevo punto de origen (ver figura 38).

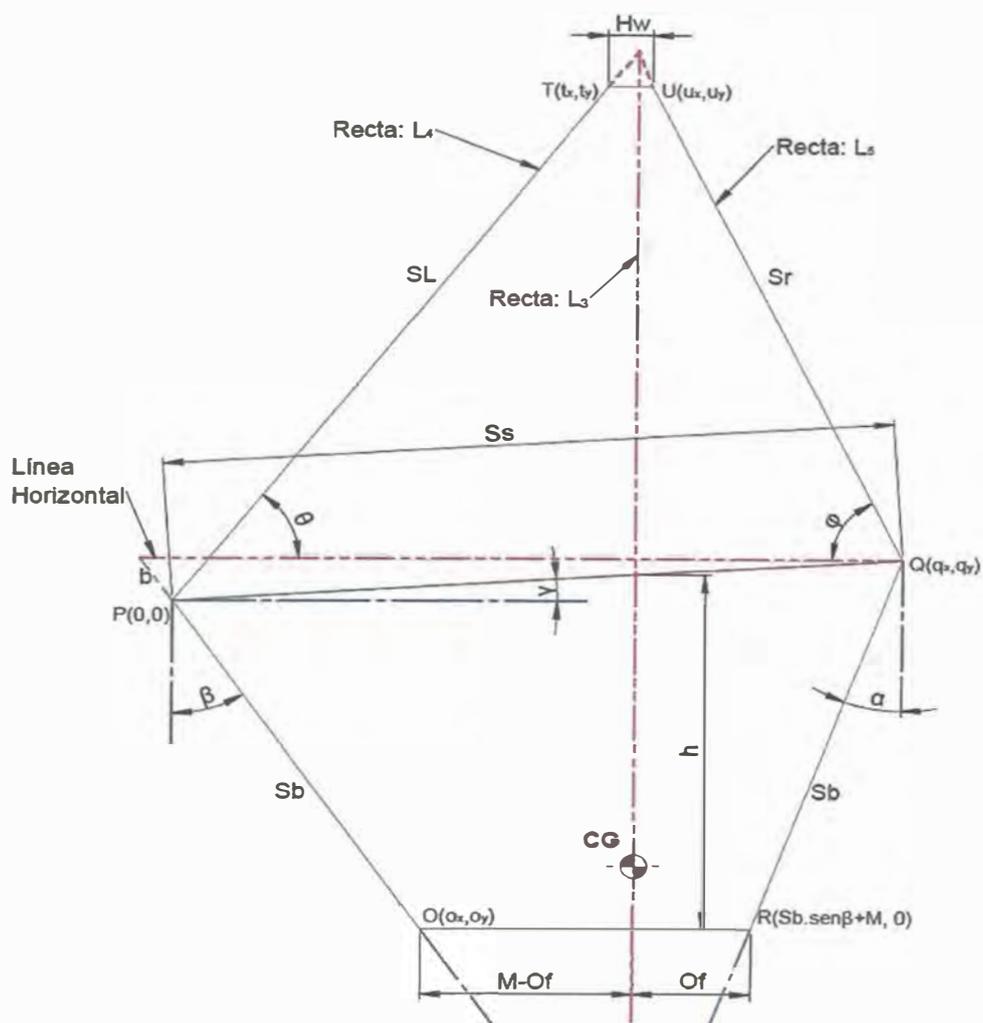


Figura 38: Esquema de parte superior del modelo para los niveles 1-2, con el origen de coordenadas en el punto P.

(Fuente: elaboración propia)

Luego, se definen las siguientes rectas:

$$L_4: y = k_4 x \quad (18)$$

$$L_5: y = k_5 x - a_5 \quad (19)$$

$$L_3: x = Sb \times \sin \beta + M - of \quad (20)$$

Entonces se define la variable:

$$f = Sb \times \sin \beta + M - of \quad (21)$$

Además, nuevo punto Q se define como:

$$q_x = Ss_x \quad (22)$$

$$q_y = b_y \quad (23)$$

De la figura 38, se deduce:

$$t_x = u_x - Hw \quad (22)$$

$$t_y = u_y \quad (23)$$

Por otro lado, la pendiente k_5 , evaluada entre los puntos Q y U, es igual a:

$$k_5 = \frac{(u_y - q_y)}{(t_x + Hw - q_x)} \quad (24)$$

Debido a que la distancia del segmento \overline{QU} es igual a Sr , se expresa Sb de la siguiente manera:

$$Sr^2 = (u_y - q_y)^2 + (u_x - q_x)^2$$

$$Sr = (q_x - t_x - Hw) \sqrt{k_5^2 + 1} \quad (25)$$

Posteriormente, en la intersección de las líneas L_4 y L_5 , se observa:

$$k_4e = k_5e + a_5 \quad (26)$$

Y, en el punto Q:

$$q_y = (q_x - e)k_5 + k_4e - k_5e \quad (27)$$

Entonces:

$$k_5 = \frac{(q_y - ek_4)}{(q_x - e)} \quad (28)$$

Finalmente, reemplazando en (25) y despejando en función de k_5 , se obtiene:

$$0 = \left(q_x - Hw - e \times \left[1 - \frac{(Hwk_5)}{(q_x k_5 - q_y)} \right] \right) \sqrt{k_5^2 + 1} - Sr \quad (29)$$

Para resolver (29), se requiere aplicar métodos numéricos. En este trabajo, se empleó el método de Newton-Raphson.

Finalmente, se pueden calcular las demás incógnitas:

$$k_4 = (q_y - (q_x - e)k_5) / (e) \quad (30)$$

$$\theta = \tan^{-1}(k_4) \quad (31)$$

$$\varphi = \tan^{-1}(|k_5|) \quad (32)$$

$$t_x = q_x - Hw - \frac{Sr}{\sqrt{k_5^2 + 1}} \quad (33)$$

$$SL = t_x \sqrt{k_4^2 + 1} \quad (34)$$

5.2.2 Modelo matemático para los niveles 2- 3:

Para que el modelo desarrollado sea aplicable a todas las situaciones que existen, se considera el caso donde las distancias entre las orejas de izaje (A_2 y A_4 de la figura 33) son diferentes, lo que genera una diferencia de alturas entre el primer nivel de la derecha y el primer nivel de la izquierda (ver figura 35).

Además, este modelo debe resolver los casos donde, la longitud del balancín 2 (ver figura 34) es mayor a la distancia entre los balancines 1 (figura 34); y el caso contrario, donde la longitud del balancín 2 es menor a la distancia entre los balancines 1.

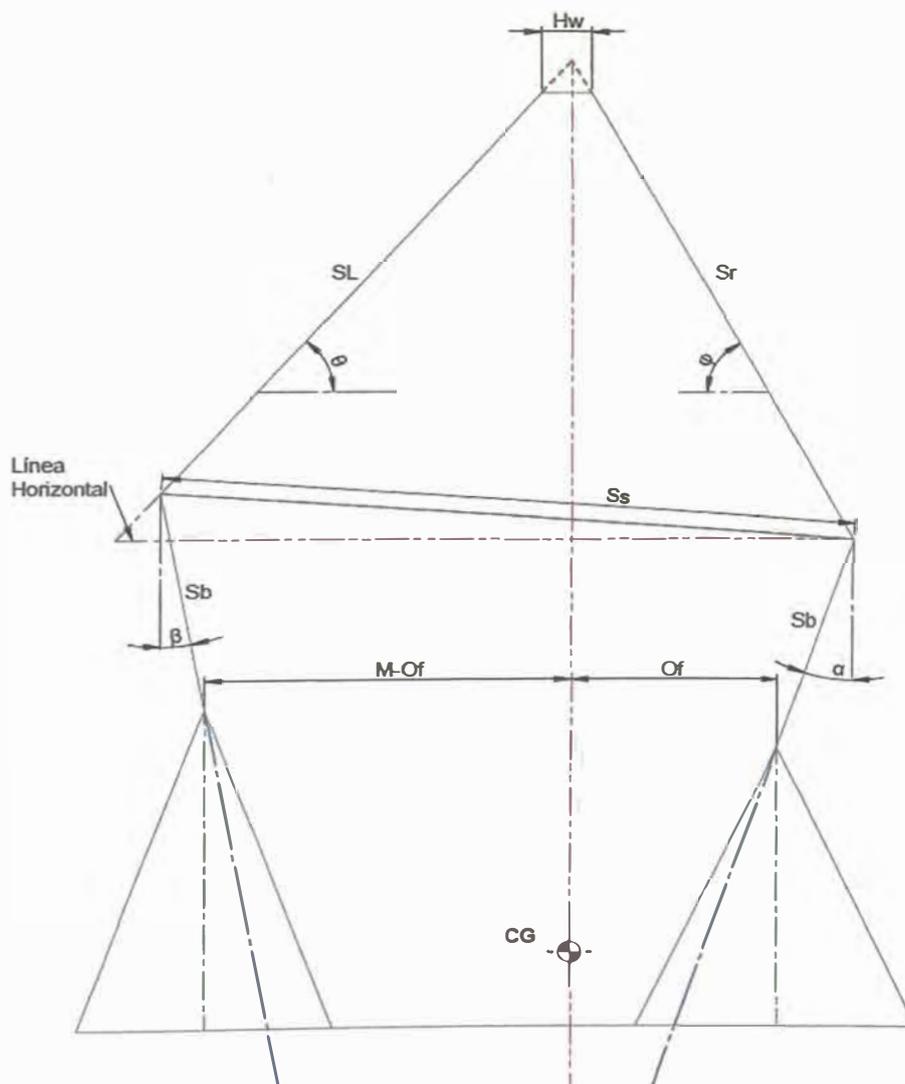


Figura 39: Diagrama de cuerpo libre del modelo para los niveles 2-3.

(Fuente: elaboración propia)

La figura 39 exhibe el diagrama de cuerpo libre del modelo para los niveles 2-3. Como se observa, tanto la proyección de los estrobos del segundo nivel

como los del tercer nivel se interceptan con la recta vertical que pasa por el centro de gravedad de la carga. Adicionalmente, el esquema muestra el caso donde el balancín del segundo nivel es mayor que la distancia entre balancines del primer nivel.

Luego, es necesario simplificar el modelo presentado en la figura anterior. Por ello, la figura 40 presenta un esquema en el que solo se contemplan el segundo y tercer nivel, e introduce como nueva variable a la diferencia de alturas entre balancines del primer nivel.

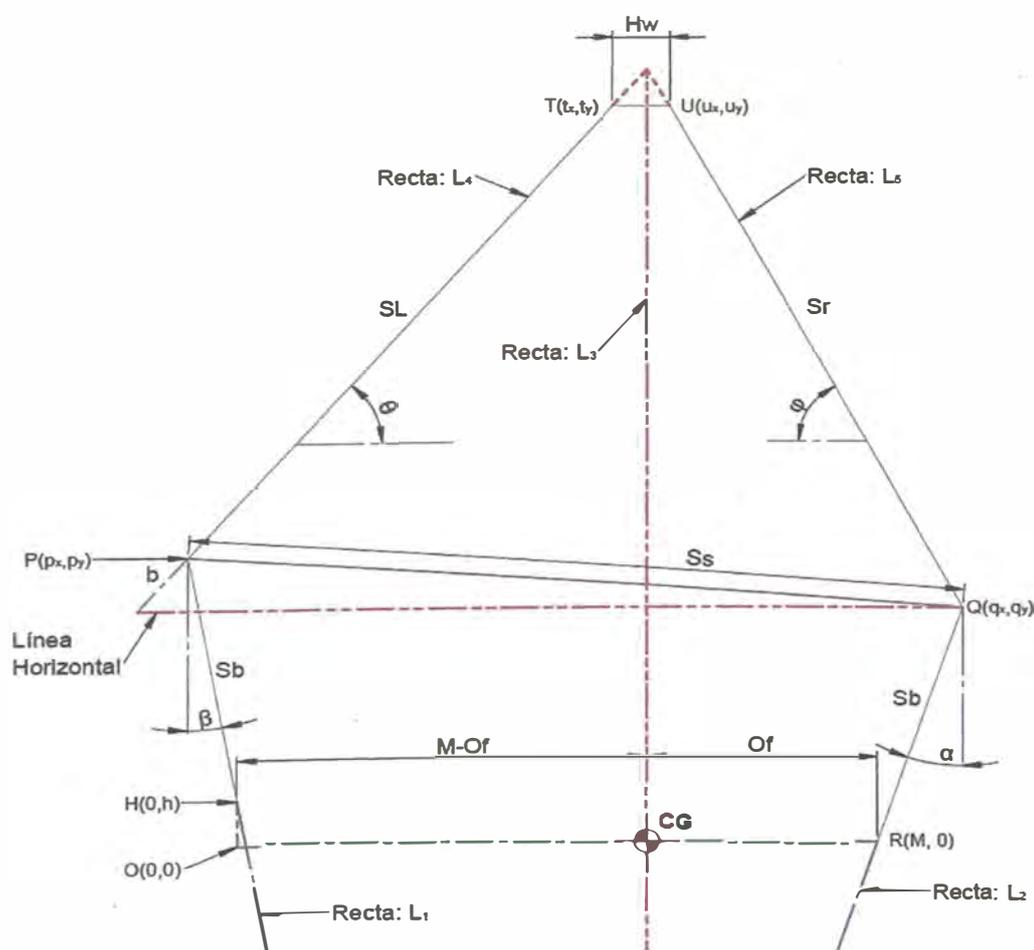


Figura 40: Esquema simplificado del modelo para los niveles 2-3, considerando el punto O como origen.

(Fuente: elaboración propia)

Como en el caso del modelo para los niveles 1-2, el problema se divide en dos partes: inferior y superior. No obstante, la diferencia entre los modelos radica únicamente en la parte inferior, por ende, las ecuaciones, correspondientes a la parte superior, desarrolladas en la sección anterior, se aplican sin modificación en este modelo.

Luego, aplicando la misma metodología de cálculo del modelo para los niveles 1-2 (explicada en detalle en la sección anterior), se obtiene la siguiente ecuación, equivalente a la ecuación (11):

$$0 = \left(M + \frac{Sb}{\sqrt{1+(k_2e)^2}} + \frac{Sb}{\sqrt{1+(k_2)^2}} \right)^2 + \left(\frac{Sb(k_2e)}{\sqrt{1+(k_2e)^2}} + \frac{Sb(k_2)}{\sqrt{1+(k_2)^2}} + \Delta h \right)^2 - S_S^2 \quad (35)$$

Donde:

Δh : Diferencia de alturas entre los balancines del nivel 1.

Esta ecuación se cumple independientemente del balancín (izquierdo o derecho) que esté más alto.

Además, para el caso donde el balancín del segundo nivel es menor que la distancia entre balancines del primer nivel, la ecuación (35) se convierte en:

$$0 = \left(M - \frac{Sb}{\sqrt{1+(k_2e)^2}} - \frac{Sb}{\sqrt{1+(k_2)^2}} \right)^2 + \left(-\frac{Sb(k_2e)}{\sqrt{1+(k_2e)^2}} - \frac{Sb(k_2)}{\sqrt{1+(k_2)^2}} - \Delta h \right)^2 - S_S^2 \quad (36)$$

Finalmente, habiendo determinado la variable k_2 , se procede a calcular las incógnitas restantes del nivel inferior utilizando las ecuaciones desde la ecuación (12) hasta la ecuación (18).

5.3 Modelo matemático para el cálculo de tensiones en el sistema de aparejos

En la figura 41, se presenta el sistema de aparejos dotado de un punto de origen y ejes coordenados. En función de este sistema de coordenadas, se

enumeran las líneas que siguen los estrobos del sistema. Esta codificación permite asociar a cada aparejo del sistema una tensión específica y una ubicación relativa al origen.

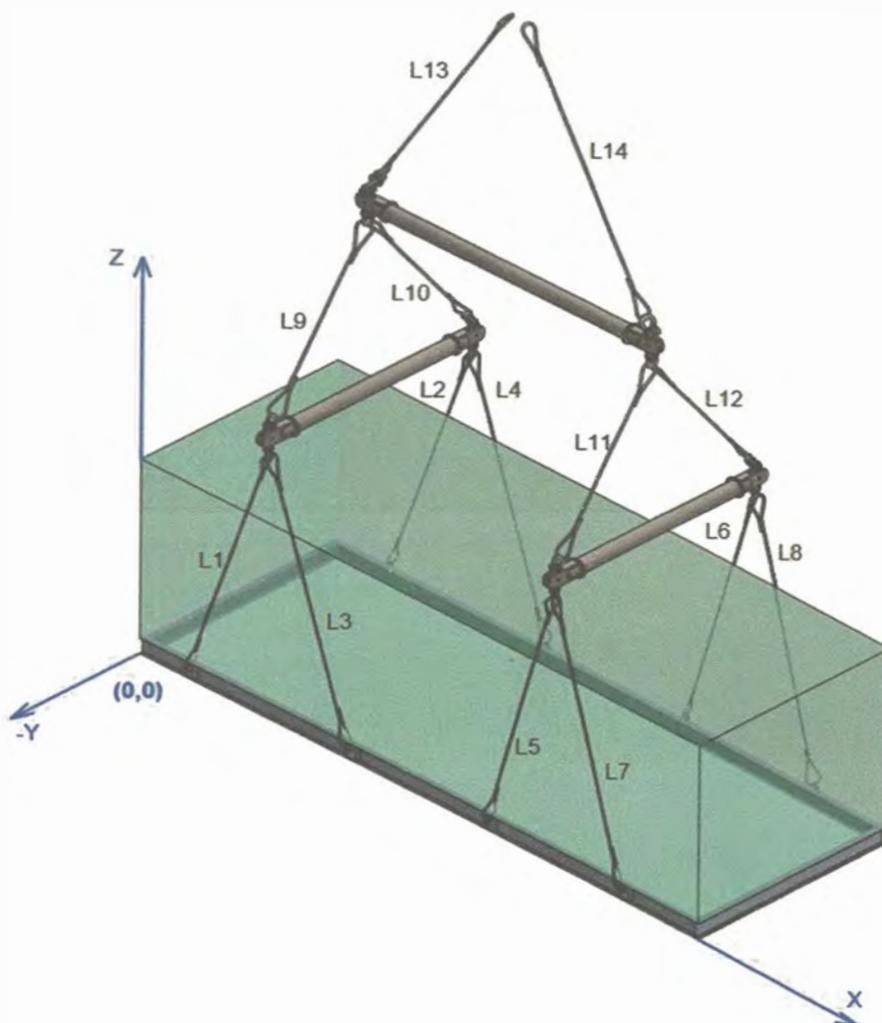


Figura 41: Codificación de líneas del sistema de aparejos.

(Fuente: elaboración propia)

Por otro lado, considerando el punto medio del módulo P_m ($L_1/2 ; L_2/2$), como punto divisor del área del módulo en el plano XY, se forman 4 sectores

sobre los que puede estar ubicado el centro de gravedad CG (C_x , C_y) dependiendo de cada módulo. (Ver figura 42)

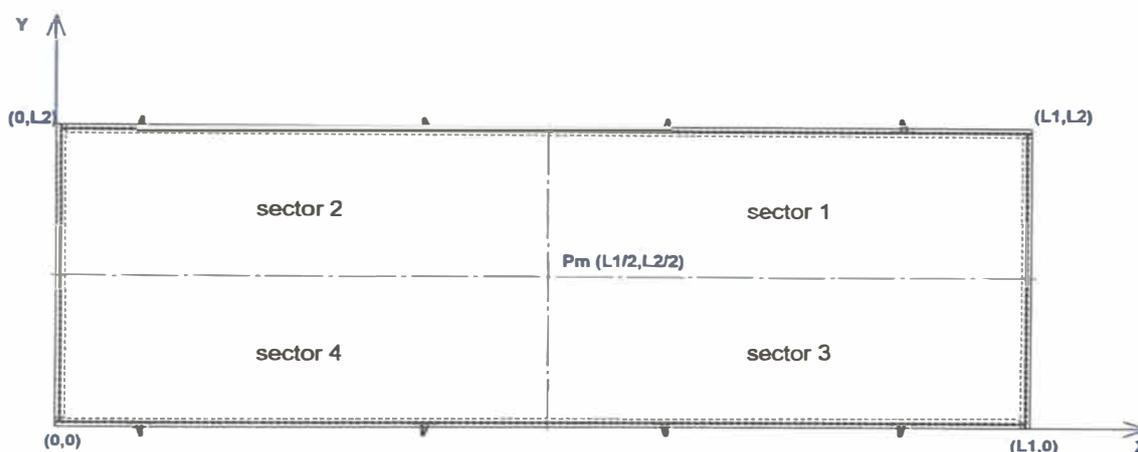


Figura 42: División del módulo en función de la ubicación del centro de gravedad.

(Fuente: elaboración propia)

De la aplicación de los modelos matemáticos y el sistema de referencia definido para el módulo, se infiere que, cuando el centro de gravedad del módulo está en el sector 1, se cumple lo siguiente:

- $L13 > L14$
- $L9 > L10$ y $L11 > L12$, además, $L10 = L12$

En cambio, cuando el centro de gravedad del módulo está en el sector 4, se cumple lo siguiente:

- $L13 < L14$
- $L9 < L10$ y $L11 < L12$, además, $L9 = L11$

Para simplificar el desarrollo de las ecuaciones de las tensiones del sistema de aparejos, se considera un módulo particular que, además de las

características principales de la unidad de análisis, tiene el centro de gravedad en el sector 1. En la figura 43, se muestra la codificación de los ángulos del sistema de aparejos.

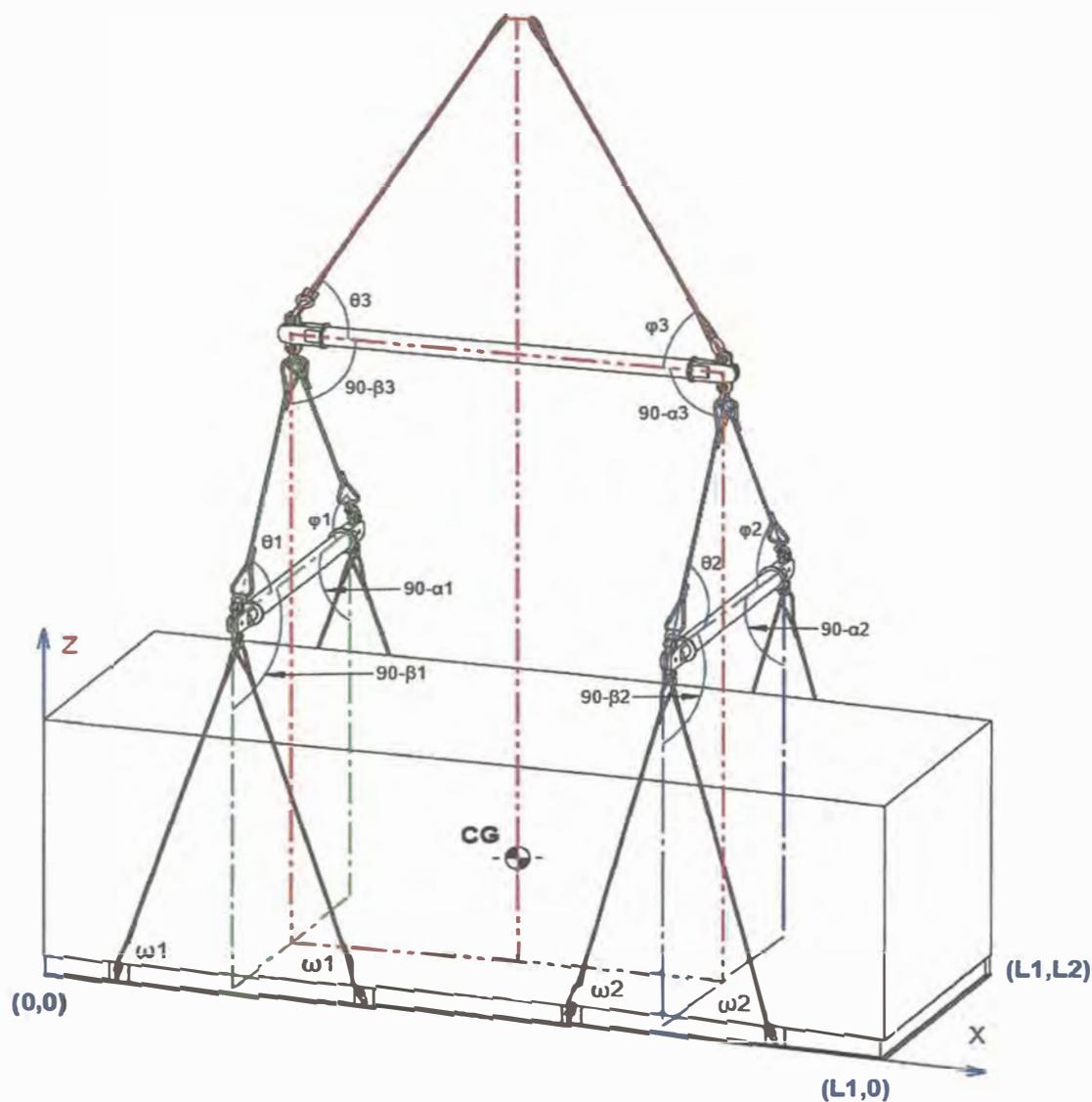


Figura 43: Codificación de ángulos principales del sistema de aparejos.

(Fuente: elaboración propia)

En resumen, las variables que definen completamente un sistema de aparejos son:

- Longitudes: L1, L9, L10, L11, L13 y L14. (Figura 41)
- Ángulos. (Figura 43)

Adicionalmente, en la figura 44, se muestran las tensiones del sistema de aparejos siguiendo la codificación establecida.

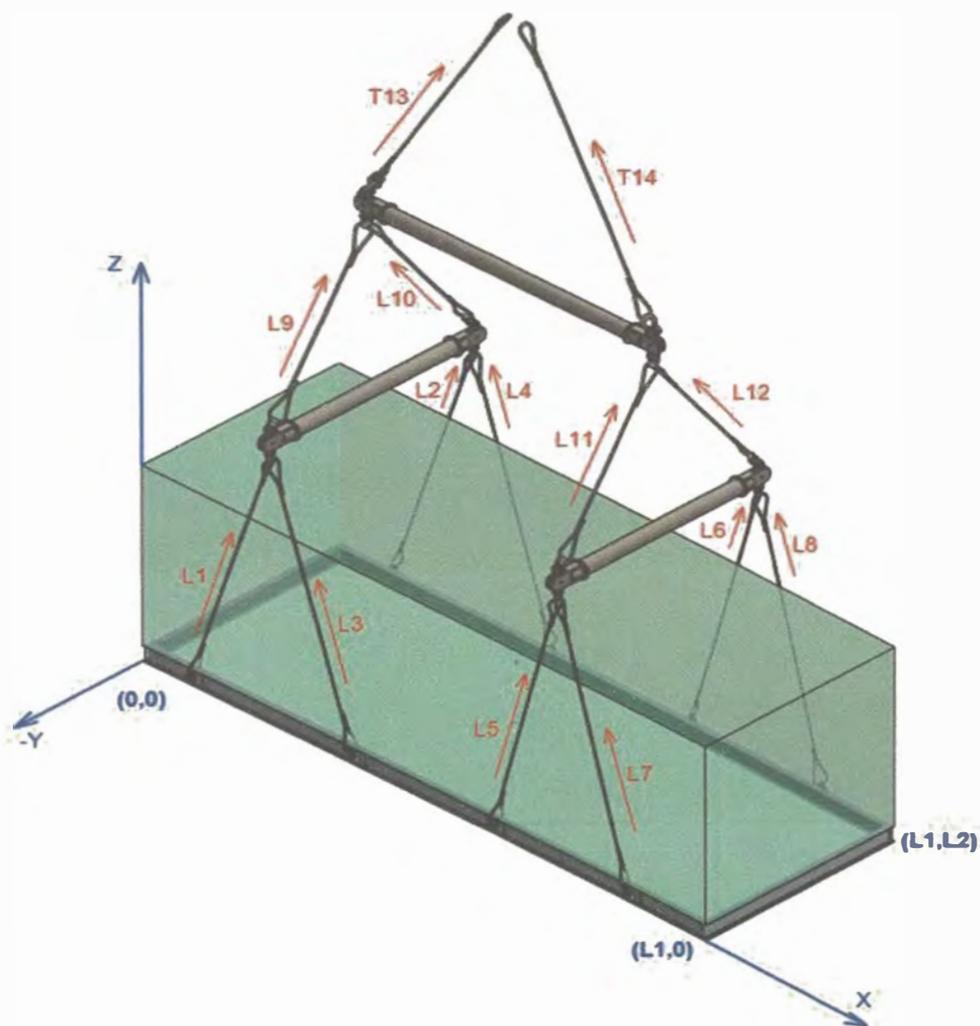


Figura 44: Tensiones generadas en el sistema de aparejos.

(Fuente: elaboración propia)

Entonces, en términos de los ángulos descritos se tienen las siguientes ecuaciones para las tensiones en el nivel 3:

$$T_{14} = W / (\sin(\theta_3) + \cos(\theta_3) * \tan(\varphi_3)) \quad (37)$$

$$T_{13} = W / (\sin(\varphi_3) + \cos(\varphi_3) * \tan(\theta_3)) \quad (38)$$

Además, se definen las tensiones en los nodos:

$$T_{n1} = W / (\cos(\beta_3) + \sin(\beta_3) * \tan(\alpha_3)) \quad (39)$$

$$T_{n2} = W / (\cos(\alpha_3) + \sin(\alpha_3) * \tan(\beta_3)) \quad (40)$$

Luego, las siguientes ecuaciones para las tensiones en el nivel 2:

$$T_9 = T_{n1} / (\sin(\theta_1) + \cos(\theta_1) * \tan(\varphi_1)) \quad (41)$$

$$T_{10} = T_{n1} / (\sin(\varphi_1) + \cos(\varphi_1) * \tan(\theta_1)) \quad (42)$$

$$T_{11} = T_{n2} / (\sin(\theta_2) + \cos(\theta_2) * \tan(\varphi_2)) \quad (43)$$

$$T_{12} = T_{n2} / (\sin(\varphi_2) + \cos(\varphi_2) * \tan(\theta_2)) \quad (44)$$

Además, se definen las tensiones en los nodos:

$$T_{n3} = T_9 * \sin(\theta_1) / \cos(\beta_1) \quad (45)$$

$$T_{n4} = T_{10} * \sin(\varphi_1) / \cos(\alpha_1) \quad (46)$$

$$T_{n5} = T_{11} * \sin(\theta_2) / \cos(\beta_2) \quad (47)$$

$$T_{n6} = T_{12} * \sin(\varphi_2) / \cos(\alpha_2) \quad (48)$$

Finalmente,

$$T_1 = T_{n3} \left(\frac{\cos(\beta_3)}{\cos(\omega_1)} + \frac{\sin(\beta_3)}{\sin(\omega_1)} \right) / 2 \quad (49)$$

$$T_2 = T_{n4} \left(\frac{\cos(\beta_3)}{\cos(\omega_1)} + \frac{\sin(\beta_3)}{\sin(\omega_1)} \right) / 2 \quad (50)$$

$$T_3 = T_{n3} \left(\frac{\cos(\beta_3)}{\cos(\omega_1)} - \frac{\sin(\beta_3)}{\sin(\omega_1)} \right) / 2 \quad (51)$$

$$T_4 = T_{n4} \left(\frac{\cos(\beta_3)}{\cos(\omega_1)} - \frac{\sin(\beta_3)}{\sin(\omega_1)} \right) / 2 \quad (52)$$

$$T_5 = T_{n5} \left(\frac{\cos(\alpha_3)}{\cos(\omega_2)} + \frac{\sin(\alpha_3)}{\sin(\omega_2)} \right) / 2 \quad (53)$$

$$T_6 = T_{n6} \left(\frac{\cos(\alpha_3)}{\cos(\omega_2)} + \frac{\sin(\alpha_3)}{\sin(\omega_2)} \right) / 2 \quad (54)$$

$$T_7 = T_{n5} \left(\frac{\cos(\alpha_3)}{\cos(\omega_2)} - \frac{\sin(\alpha_3)}{\sin(\omega_2)} \right) / 2 \quad (55)$$

$$T_8 = T_{n6} \left(\frac{\cos(\alpha_3)}{\cos(\omega_2)} - \frac{\sin(\alpha_3)}{\sin(\omega_2)} \right) / 2 \quad (56)$$

Las tensiones calculadas por las ecuaciones 37-56 permiten la selección de aparejos por medio del algoritmo.

5.4 Estimación convencional de la geometría y las tensiones del sistema de aparejos para módulos con puntos de sujeción en su base.

En esta sección, se presentan las metodologías usadas en la ejecución del proyecto minero Planta de Sulfuros – Mina Justa para el diseño del sistema de aparejos de módulos izados desde su base.

Adicionalmente, a diferencia de otras investigaciones que registran resultados de casos estudiados por autores precedentes, la actual investigación plantea casos (unidad de análisis) novedosos para este campo, por lo que es necesario definir un método de validación de los resultados obtenidos con el algoritmo propuesto respecto de resultados obtenidos por medios convencionales.

5.4.1 Método de estimación convencional de la geometría del sistema de aparejos

Para la estimación de la geometría del sistema de aparejos se utiliza un software de diseño asistido por computadora (CAD) convencional, siendo el

programa Solidworks (especializado en diseño 3D mecánico) el escogido para este propósito.

El programa elegido tiene la capacidad de estimar longitudes automáticamente, para completar un modelo alámbrico 3D. Para ello, se soporta en su herramienta de relaciones geométricas, que permite establecer relaciones entre las líneas del modelo, como: perpendicularidad, paralelismo, etc. El procedimiento es, dibujar el modelo alámbrico 3D y acotar las dimensiones asumidas inicialmente, y luego, mediante relaciones geométricas, completar el modelo hasta encontrar una solución única. Adicionalmente, el programa indica cuándo el modelo alámbrico 3D está “completamente definido”.

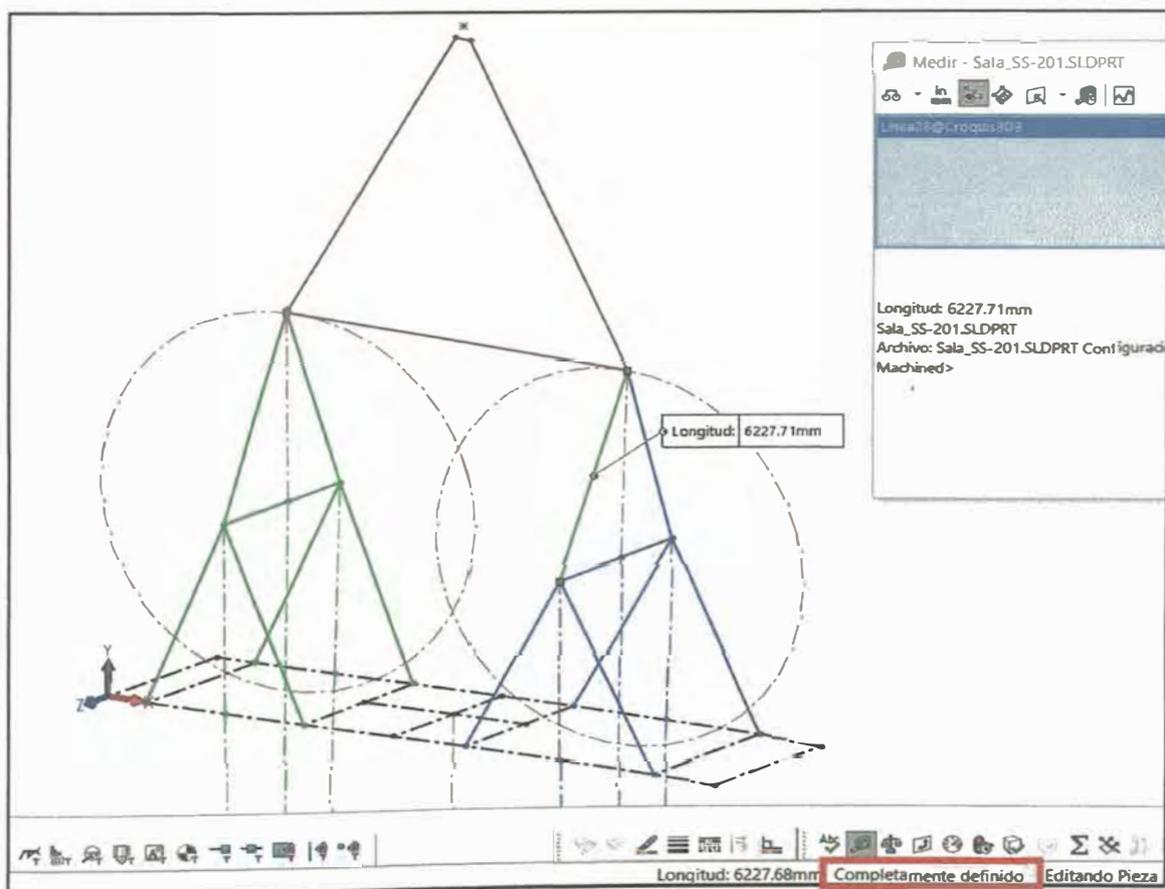


Figura 45: Modelo geométrico alámbrico en 3D del módulo.

(Fuente: elaboración propia)

De las secciones 5.2 y 5.3, se conoce que algunas dimensiones preliminares son, las longitudes de los estrobos del lado corto y de los balancines.

Además, las relaciones geométricas se derivan de los modelos matemáticos propuestos en la sección 5.2.

En la figura 45, se muestra la esquematización mediante líneas del sistema de aparejos para izaje de un módulo. Como se observa en la figura, todas las dimensiones están completamente definidas (zona resaltada en la figura 45) y, en consecuencia, solo existe una única solución para la geometría del sistema de aparejos.

Finalmente, la utilización de este método convencional para la estimación de la geometría de los sistemas de aparejos de la unidad de análisis genera información relevante para la evaluación de la precisión del algoritmo propuesto.

5.4.2 Método de estimación de las tensiones del sistema de aparejos mediante el método de elementos finitos.

Para calcular las tensiones del sistema de aparejos se propone desarrollar un análisis estático por elementos finitos, aprovechando el modelo alámbrico 3D empleado para la estimación de la geometría (sección anterior). Este análisis estático se enfoca en calcular las tensiones axiales en cada línea del modelo 3D alámbrico.

Nuevamente, se utiliza el programa Solidworks para la realización del análisis estático. Además, se deben considerar las siguientes consideraciones:

- El análisis utiliza elementos tipo barra (1D) para representar a estrobos y balancines del sistema de aparejos. Este supuesto es válido cuando el estrobo soporta únicamente cargas axiales (trabaja a tracción).
- Se restringe la rotación del módulo. Esto se consigue limitando el desplazamiento en X e Y, de uno de los nodos del módulo (uno de los 4 vértices del bastidor).

- Se restringe la rotación de los balancines. Esto se consigue limitando el desplazamiento en X e Y, de uno de los nodos extremos de cada balancín.
- Se restringe el desplazamiento de los estrobos del tercer nivel (que conectan al gancho del equipo de izaje) en todas las direcciones.
- La única carga considerada es una fuerza puntual aplicada en el centro de gravedad del módulo en el bastidor, y tiene por magnitud el peso del módulo.
- Finalmente, los estrobos, por ser elementos que solo soportan tracción, son modelados como elementos tipo barra que no soportan momentos flectores y sus condiciones de borde le permiten girar libremente.

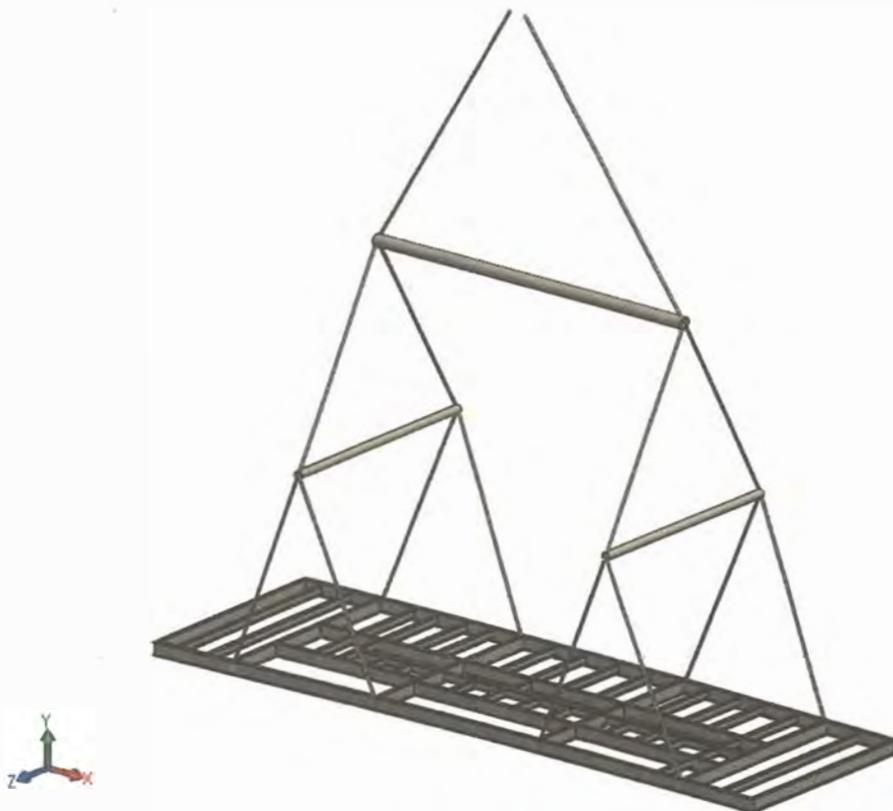


Figura 46: Modelo alámbrico 3D del módulo, utilizado en el FEA.

(Fuente: elaboración propia)

Es preciso señalar que el modelo propuesto en esta investigación, basado en el modelo matemático de Hashemi et al. [6], se fundamenta en el equilibrio estático del sistema formado por los aparejos y la carga durante la operación de izaje.

En la figura 46, se muestra la representación alámbrica de un módulo. Este modelo emplea los perfiles estructurales de acero reales del bastidor, obtenidos de los planos (del proyecto) estructurales del módulo.

Por otro lado, en la figura 47, se presentan las condiciones de contorno descritas líneas arriba.

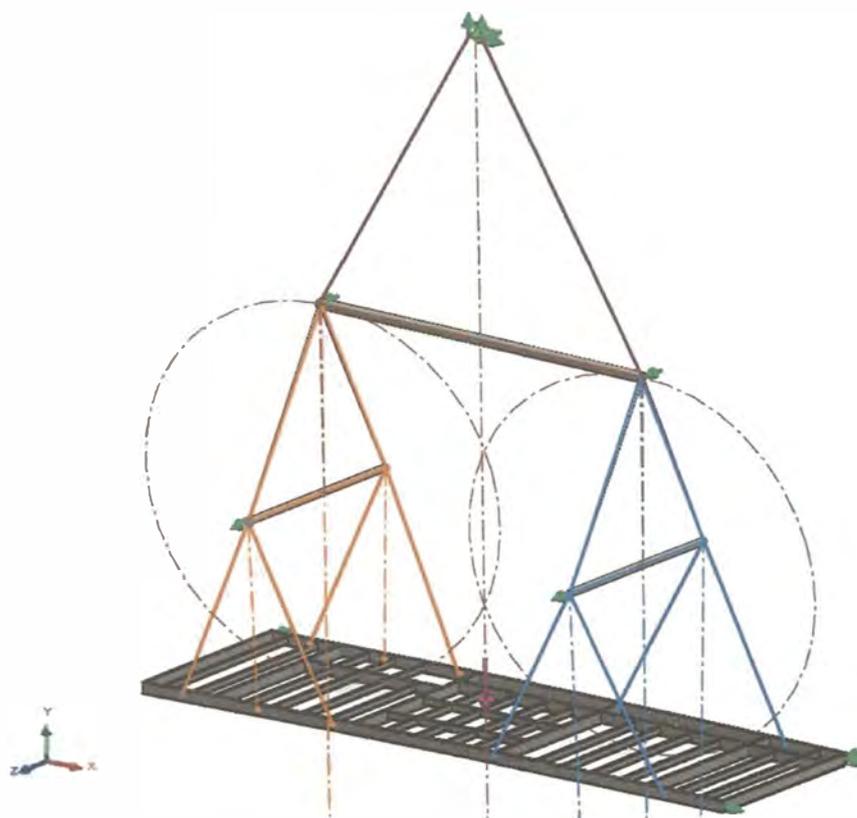


Figura 47: Aplicación de carga y condiciones de contorno en el FEA.

(Fuente: elaboración propia)

Finalmente, la figura 48 muestra las tensiones axiales estimadas mediante el análisis estático por elementos finitos.

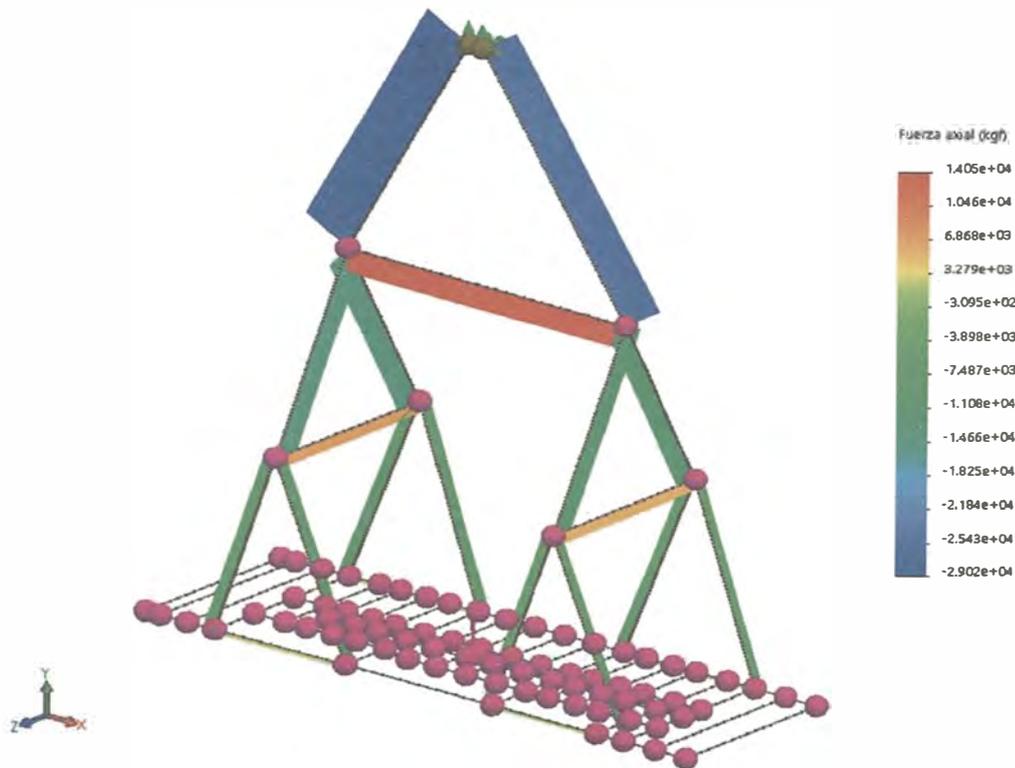


Figura 48: Tensiones axiales en aparejos obtenidas mediante el FEA.

(Fuente: elaboración propia)

La información generada por el análisis estático se emplea para validar los resultados obtenidos por el algoritmo propuesto, por tal motivo, estos resultados son recogidos en los formatos de la investigación.

5.5 Desarrollo del algoritmo de selección de aparejos

El algoritmo propuesto en esta investigación tiene, también, la función de determinar todos los aparejos necesarios para sujetar y manipular, en forma segura, módulos con las características principales de la unidad de análisis; empleando aparejos elegidos desde una base de datos finita, utilizada en un proyecto real.

La figura 49 presenta el diagrama de flujo que esquematiza la lógica de trabajo del algoritmo.

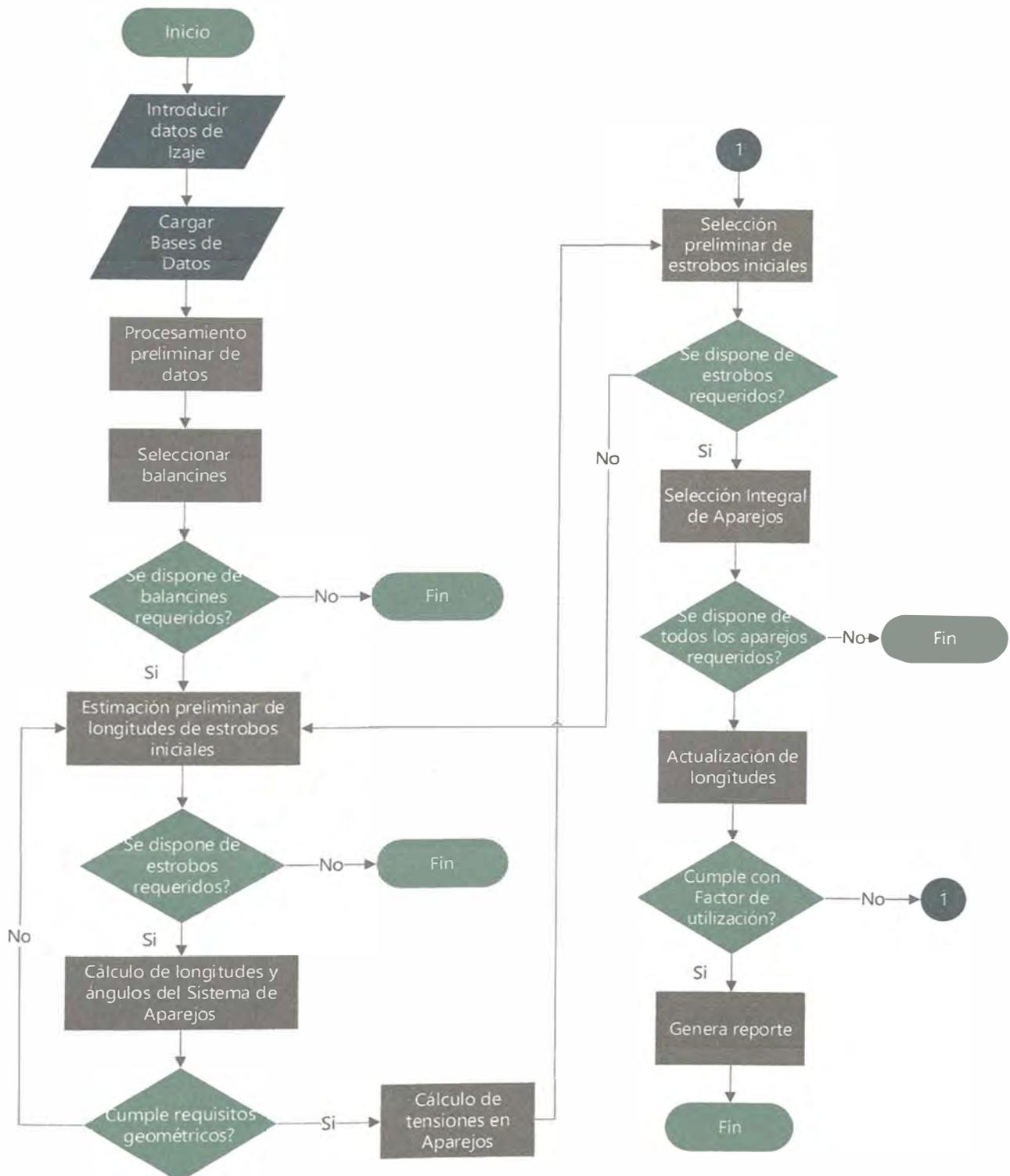


Figura 49: Diagrama de flujo del algoritmo de selección de aparejos.

(Fuente: elaboración propia)

Las dos etapas iniciales del algoritmo se encargan de ingresar la información esencial, tanto de los módulos, como de aparejos (base de datos).

La etapa de “procesamiento de datos” se encarga de transformar los datos de entrada en los datos (inputs) requeridos por el modelo matemático propuesto, por ejemplo, estima los valores de M y of.

El proceso de selección de aparejos se basa en seleccionar preliminarmente los balancines desde la base de datos, considerando los criterios de:

- Longitud: mayor o igual en el nivel 1; y el más próximo al valor requerido en el segundo nivel.
- Cantidad: 02 balancines en el nivel 1 y 01 balancín en el nivel 2.
- Capacidad.

Luego, se hace la primera evaluación, si el programa no puede seleccionar balancines, no hay solución posible y el programa termina. En caso contrario continúa con el segundo proceso.

El segundo proceso, “Estimación preliminar de longitudes de estrobos”, tiene por objeto determinar las longitudes iniciales para los estrobos en función a la geometría de los módulos, con el propósito de alcanzar ángulos entre estrobos en el rango de 50° a 75° .

Posteriormente, el algoritmo evalúa si la estimación preliminar de estrobos encuentra existencias en la base de datos, desde la perspectiva de la longitud únicamente. En caso de no encontrar estrobos el programa finaliza.

El tercer proceso, “Cálculo de longitudes y ángulos del sistema de aparejos”, es un proceso indispensable porque es la materialización del modelo matemático propuesto. En la figura 50, se presenta el código de la función geometría que estima las incógnitas del modelo matemático. Sus entregables (outputs) son, un vector geometría con todas las distancias del modelo y un vector ángulo que contiene los ángulos del modelo.

```

1  function [G ,g, Ang, Ss] = Geom(A,M,of,D,d,Hw)
2
3  %A=Ubi. orejas, M=paramet_1, of=paramet_2, D=Lineas cte, d=L. Spreader,
4  %Hw=ancho gancho grúa
5
6  s=size(A);
7
8      Sb_A=round((D(1)^2-A(2)^2/4)^0.5,10);
9      Sb_B=round((D(1)^2-A(4)^2/4)^0.5,10);
10
11     [b(:,1), ang(:,1)] = Solver_1(M(2),of(2),Sb_A,d(1),D(2),0);
12     [b(:,2), ang(:,2)] = Solver_1(M(2),of(2),Sb_B,d(1),D(2),0);
13     hh=b(2,1)-b(2,2);
14     [b(:,3), ang(:,3)] = Solver_2(M(1),of(1),b(3,1),b(3,2),d(2),D(3),Hw,hh);
15
16     G=[ones(1,8)*D(1) b(1,1) D(2) b(1,2) D(2) b(1,3) D(3)];
17
18     Ang=[ang(:,1); ang(:,2); ang(:,3)];
19     Ss=[A(2)/2/D(1) Sb_A/D(1) A(4)/2/D(1) Sb_B/D(1)];
20
21     g=[G(1) G(11:14)];

```

Figura 50: Código de estimación de geometría.

(Fuente: elaboración propia)

Adicionalmente, la figura 51 expone la función solver que, mediante el método de Newton-Raphson resuelve la ecuación 11 del modelo matemático.

Luego, se aplica un criterio geométrico que corresponde a la diferencia entre la longitud del balancín y el ancho del módulo. La regla que debe cumplirse es que las eslingas que se conectan al balancín no deben exceder un determinado ángulo, dicho ángulo, para este análisis, es de 3° . Dicho en otros términos, los ángulos " α " y " β " del modelo no deben ser mayores de 3° . En caso de que fueran mayores, el código regresa para elegir una mayor longitud de estrobo y disminuir el ángulo.

El cuarto proceso, "Cálculo de tensiones en aparejos", es importante y determina todas las cargas axiales en estrobos grilletes y balancines. Sus salidas (outputs) permiten la selección de los aparejos.

```

1 function [A, B] = Solver_1(M,of,Sb,Ssb,Sr,Hw)
2 - syms x;
3 - %Precision
4 - n1=6;
5 - %Valor inicial
6 - x1=1;
7 - %Cosntante
8 - if Ssb>M
9 -     del=1;
10 - else
11 -     del=-1;
12 - end
13 - e=of/(of-M);
14 - %Funcion
15 - f=(M+del*Sb/(1+x^2)^.5+del*Sb/(1+(e*x)^2)^.5)^2+(Sb*x/(1+x^2)^.5+Sb*e*x/(1+(e*x)^2)^.5)^2-Ssb^2;
16 - k=Newton_Raphson(f,n1,x1);
17
18 %Salida
19 - beta=atan(abs(1/k/e));
20 - alfa=atan(abs(1/k));
21 - b=Sb*((M-of)/of*sin(alfa)/sin(beta)-1);
22 - bx=Sb*(sin(alfa)+sin(beta))+M;
23 - by=b*cos(beta);
24 - gam=atan(by/bx);
25 - h1=Sb*cos(beta)+(Sb*sin(beta)+M-of)*tan(gam);

```

Figura 51: Solución numérica de la ecuación (11) del modelo matemático.

(Fuente: elaboración propia)

El quinto proceso, “selección de aparejos preliminar”, se enfoca principalmente en reducir el universo de aparejos elegible para cada posición del sistema global de aparejos, y lo hace en función a 3 criterios:

- Geométrico: en el caso de estobos por su longitud, en el de grilletes por su compatibilidad con los balancines, con otros grilletes y con las orejas de izaje.
- Capacidad: en función a la carga que resiste cada aparejo.
- Cantidad: en función a la disponibilidad en la base de datos.

En caso de que alguno de los criterios no se satisfaga, el algoritmo regresa al tercer proceso, con el propósito de reevaluar la geometría y obtener nuevos aparejos que cumplan los criterios.

El sexto proceso, “Selección integral de aparejos”, es crítico y es tan importante como los dos anteriores. Este proceso resuelve el problema de

balancear la carga, mediante la determinación de una solución que satisfaga las longitudes calculadas (tercer proceso), permitiéndose un error de 20 mm por línea.

Es preciso recordar que debido a que el centro de gravedad está desfasado generalmente, una de las longitudes del sistema de aparejos no es estándar, es decir, mide una longitud que no puede ser cubierta por un estrobo normal, sino que requiere de elementos adicionales, como una cadena de grilletes (Figura 52), o el empleo de aparejos ajustables como tensores (turnbuckles) o tecles.



Figura 52: Cadena de grilletes para compensar dimensión del sistema de aparejos.

(Fuente: elaboración propia)

Entonces, este proceso del algoritmo, decide, en cada nivel donde exista diferencia entre longitudes de estrobos, entre dos opciones: emplear una cadena de grilletes o emplear un teclé; considerando a su vez, los criterios de:

- Geometría: Compatibilidad entre aparejos
- Capacidad: Que los aparejos soporten la carga calculada
- Cantidad: Disponibilidad en base de datos. En el caso de emplear la cadena de grilletes, la cantidad máxima de grilletes que componen esta cadena debe ser 3 unidades.

El siguiente proceso, actualiza la geometría obtenida al integrar todos los aparejos y recalcula las tensiones.

Si las tensiones no cumplen con el factor de utilización elegido para el sistema de aparejos, el proceso regresa al quinto proceso.

Finalmente, si se cumplen los supuestos el algoritmo genera un reporte y termina.

5.6 Alcance del algoritmo

En la actualidad, existe una cantidad indeterminada de módulos utilizados en el sector industrial. Esto se debe, principalmente, a que cada proyecto de construcción establece una estrategia particular de modularización en función de sus necesidades; generando, entre otras cosas, que los módulos tengan diferentes dimensiones, pesos, características estructurales; o que pertenezcan a diferentes disciplinas, tales como: estructural, tubería, eléctrica, de control, etc.

En este contexto, la unidad de análisis de esta investigación recoge información real de la ejecución de un proyecto de construcción de una planta concentradora minera real. En consecuencia, existe un conjunto no vacío ni unitario de elementos que comparten ciertas características principales (mencionadas en la sección 5.1.1) que son:

- Los puntos de izaje están instalados en el bastidor del módulo.
- Los puntos de izaje son orejas de izaje.
- El módulo tiene 08 orejas de izaje.
- La orientación de las orejas de izaje es inclinada permitiendo la colocación de eslingas no verticales en el primer nivel. (Ver figura 34)

Adicionalmente, el módulo debe estar diseñado para soportar las cargas que originan las eslingas verticales en el primer nivel y se debe evaluar la estabilidad del izaje desde la base.

5.7 Validación de resultados

El algoritmo propuesto diseña un sistema de aparejos para el izaje de módulos sujetos desde su bastidor. Sin embargo, los resultados obtenidos por dicho programa deben ser contrastados con los resultados de los métodos convencionales.

Por tal motivo, en esta sección se propone una ecuación para la determinación del error porcentual:

$$error = \left(1 - \frac{D_a}{D_t}\right) \times 100 (\%) \quad (57)$$

Donde:

D: Dimensión, longitud o ángulo.

a: subíndice relativo al algoritmo.

t: subíndice relativo al método convencional.

En el siguiente capítulo se muestran las gráficas comparativas de los errores para cada magnitud evaluada.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos con el algoritmo y el método convencional, para el diseño de aparejos para el izaje módulos con puntos de sujeción en su base (bastidor).

El análisis se divide en:

- Análisis de resultados geométricos estimados.
- Análisis de resultados de tensiones estimadas
- Análisis de tiempo de ejecución de metodologías
- Análisis de aparejos seleccionados

6.1 Análisis de resultados geométricos:

Como se menciona en el capítulo anterior, la geometría del sistema de aparejos queda completamente definida por un conjunto de longitudes y ángulos. En esta sección, se presentan los resultados obtenidos para dichas magnitudes empleando ambas metodologías.

Primero, en la Tabla 4 se muestran las longitudes que definen el sistema de aparejos de cada módulo que compone la unidad de análisis de este

documento. Estas longitudes son obtenidas mediante el método convencional descrito en la sección 5.4.1.

Tabla 4: Longitudes estimadas por método convencional.

Longitudes (mm) - Método Convencional							
Ítem	2371-SS-201	2372-SS-202_1	2372-SS-202_2	2373-SS-203_1	2373-SS-203_2	2374-SS-204	4310-SS-407
Le1	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000
Le2	6000	6000	6000	6000	6000	6000	4000
Le3	10000	6000	6000	10000	10000	8000	6000
Le4	6236.71	6330.88	6162.9	6484.88	6030.83	6006.83	4142.43
Le5	6236.73	6330.88	6162.9	6484.81	6030.83	6006.84	4142.43
Le6	10192.34	6185.72	6255.94	10919.65	10246.37	8404.39	6180.74
Sb1	5400	5400	5400	4400	4400	5400	4700
Sb2	10100	6650	6650	10100	10100	8800	6650

(Fuente: elaboración propia)

En contraste, la tabla 5 presenta las longitudes principales, análogas a las mostradas en la tabla 4, obtenidas por el algoritmo propuesto.

Tabla 5: Longitudes estimadas por algoritmo.

Longitudes (m) - Algoritmo							
Ítem	2371-SS-201	2372-SS-202_1	2372-SS-202_2	2373-SS-203_1	2373-SS-203_2	2374-SS-204	4310-SS-407
Le1	6	6	6	6	6	6	6
Le2	6	6	6	6	6	6	4
Le3	10	6	6	10	10	8	6
Le4	6.23673	6.33088	6.16290	6.48488	6.03083	6.00683	4.14243
Le5	6.23669	6.33088	6.16290	6.48481	6.03083	6.00683	4.14242
Le6	10.19229	6.18572	6.25594	10.91955	10.24635	8.40482	6.18072
Sb1	5.4	5.4	5.4	4.4	4.4	5.4	5
Sb2	10.1	6.65	6.65	10.1	10.1	8.8	6.65

(Fuente: elaboración propia)

Para evaluar los resultados se emplea la figura 53, en la que se comparan las longitudes obtenidas por ambos métodos para la subestación modular 2371-SS-201.

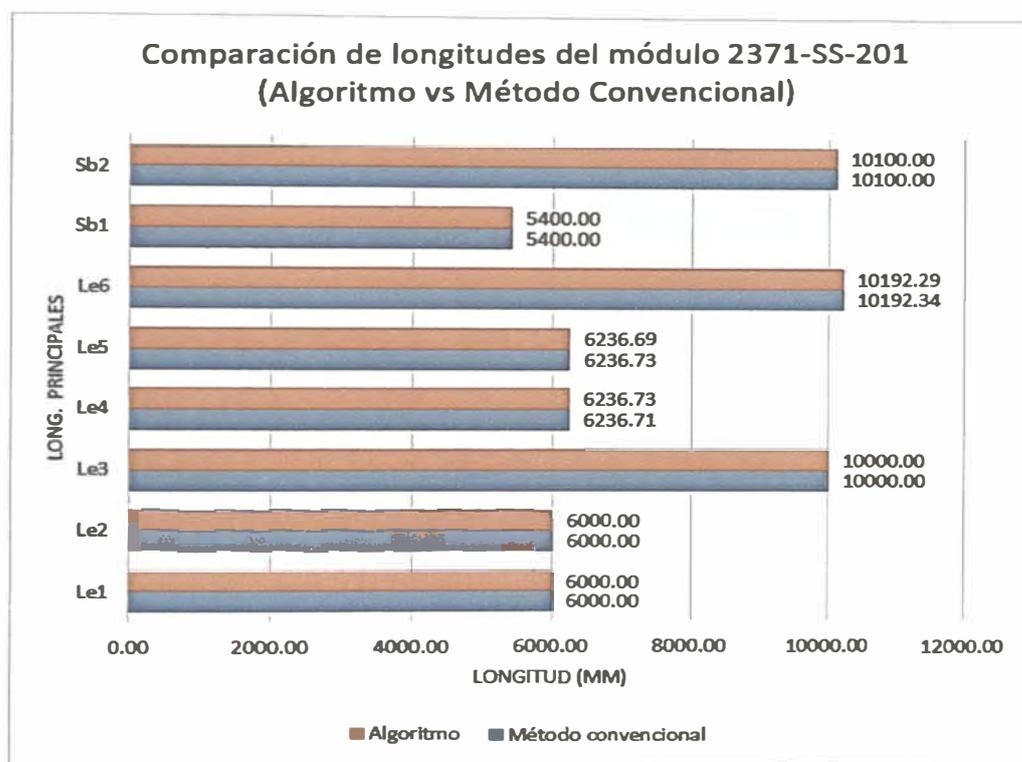


Figura 53: Comparación de resultados de longitudes del módulo 2371-SS-201.

(Fuente: elaboración propia)

Del gráfico, se observa que, donde existen diferencias entre longitudes, estas son del orden de las centésimas de milímetro.

Como resultado de expandir el análisis a todos los módulos, se obtiene la tabla 6, que expone el error en porcentaje de cada longitud, obtenido como resultado de la comparación de las longitudes calculadas por ambos métodos.

Tabla 6: Error (%) entre longitudes estimadas por método convencional y algoritmo.

Error (%) – Método Convencional VS Algoritmo							
Ítem	2371-SS-201	2372-SS-202_1	2372-SS-202_2	2373-SS-203_1	2373-SS-203_2	2374-SS-204	4310-SS-407
Le1	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Le2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Le3	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Le4	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Le5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Le6	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%
Sb1	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Sb2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

(Fuente: elaboración propia)

Finalmente, los resultados de la tabla 6 muestran que no se presentan errores significativos en las longitudes estimadas por ambos métodos.

La segunda parte del análisis geométrico se enfoca en analizar los resultados obtenidos para los ángulos de los sistemas de aparejos, que, junto con las longitudes, definen completamente su geometría.

En ese sentido, la tabla 7 resume todos los ángulos necesarios para el diseño de los sistemas de aparejos de las subestaciones evaluadas. Esta información es obtenida mediante el método convencional.

De forma similar, la tabla 8 expone los mismos ángulos de los sistemas de aparejos de cada módulo, obtenidos con el algoritmo.

Tabla 7: Ángulos estimados por método convencional.

Ángulos (°) - Método Convencional							
Ítem	2371-SS-201	2372-SS-202_1	2372-SS-202_2	2373-SS-203_1	2373-SS-203_2	2374-SS-204	4310-SS-407
ω_1	67.3563	73.6303	71.3119	67.8314	66.4999	70.1231	71.8805
ω_2	63.4273	73.9585	72.7325	65.38093	66.3906	69.6553	74.638
α_1	1.8655	1.714	1.8804	1.42388	2.1226	2.0256	1.0575
β_1	2.2742	2.2679	2.1528	2.70186	2.0435	2.037	0.9521
θ_1	61.5957	60.8635	62.0759	63.61429	68.8491	63.2077	56.1728
φ_1	66.0748	67.1182	65.1485	75.34418	68.1116	63.3364	53.3409
α_2	1.9251	1.7112	1.8653	1.45051	2.1244	2.0317	1.0423
β_2	2.3468	2.2641	2.1355	2.75234	2.0452	2.0431	0.9384
θ_2	61.5959	60.8445	62.0587	63.61464	68.833	63.2074	56.1728
φ_2	66.0747	67.0931	65.1288	75.34416	68.0961	63.3361	53.3409
α_3	0.6744	2.3683	1.8277	0.08486	1.9415	0.24	0.0545
β_3	0.6626	2.0965	1.5143	0.05822	1.7485	0.2088	0.0576
θ_3	61.3714	60.8689	61.9706	66.81098	62.7299	61.6169	58.6355
φ_3	61.4019	57.7681	57.0757	58.33466	60.226	57.0835	59.9664

(Fuente: elaboración propia)

Tabla 8: Ángulos estimados por algoritmo.

Ángulos (°) - Algoritmo							
Ítem	2371-SS-201	2372-SS-202_1	2372-SS-202_2	2373-SS-203_1	2373-SS-203_2	2374-SS-204	4310-SS-407
ω_1	67.3563	73.6303	71.3119	67.8314	66.4999	70.1231	71.8805
ω_2	63.4273	73.9585	72.7325	65.3809	66.3906	69.6553	74.638
α_1	1.8655	1.714	1.8804	1.4239	2.1226	2.0256	1.0575
β_1	2.2742	2.2679	2.1528	2.7019	2.0435	2.037	0.9521
θ_1	61.5957	60.9324	62.1137	63.6143	68.9182	63.2084	56.1728
φ_1	66.0748	67.2093	65.1917	75.3442	68.1781	63.3371	53.341
α_2	1.9251	1.7112	1.8653	1.4505	2.1244	2.0317	1.0423
β_2	2.3468	2.2641	2.1355	2.7523	2.0452	2.0431	0.9384
θ_2	61.5959	60.9324	62.1137	63.6146	68.9182	63.2084	56.1728
φ_2	66.0747	67.2093	65.1917	75.3442	68.1781	63.3371	53.341
α_3	0.6665	2.3683	1.8277	0.0818	1.9415	0.2448	0.0585
β_3	0.6554	2.0966	1.5143	0.0562	1.7485	0.2038	0.0626
θ_3	61.3759	60.8689	61.9706	66.8122	62.7298	61.6205	58.6384
φ_3	61.4066	57.7681	57.0757	58.3363	60.226	57.0819	59.9691

(Fuente: elaboración propia)

En la figura 54, se muestra la comparación de las magnitudes de los ángulos estimados por cada método para la subestación modular 2371-SS-201. Como se observa en el gráfico, las diferencias se encuentran en los ángulos de menor magnitud.

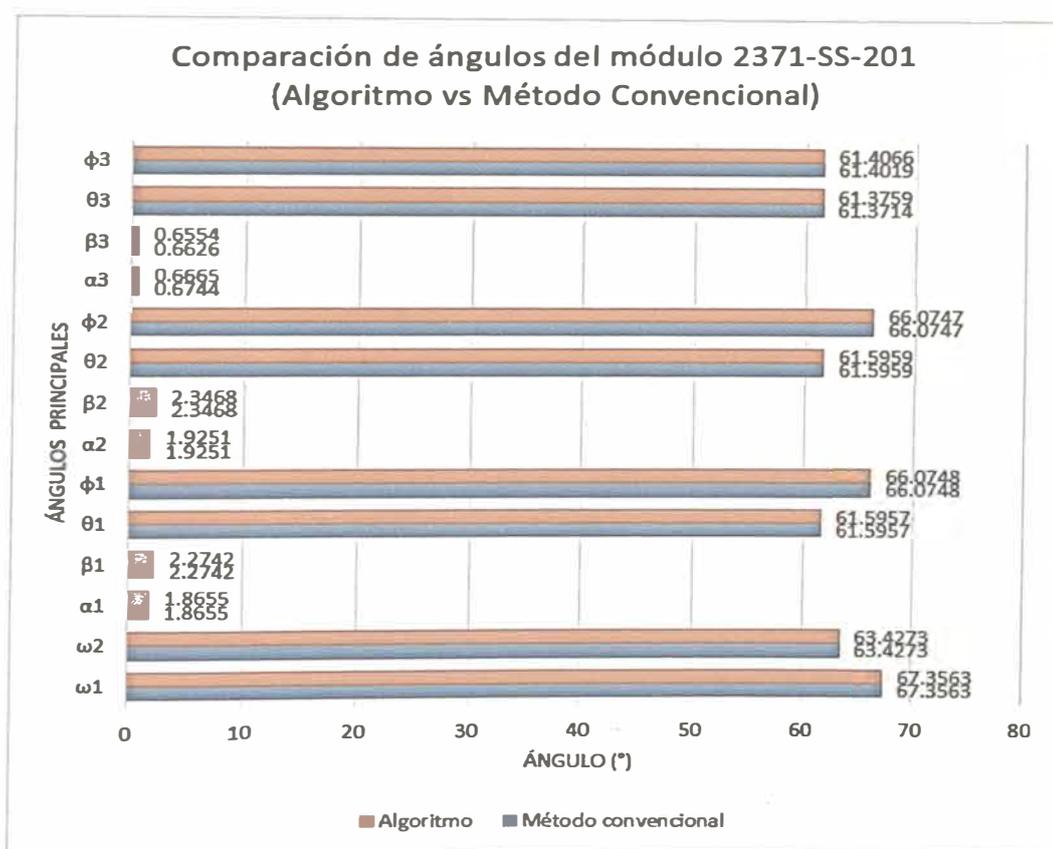


Figura 54: Comparación de resultados de ángulos del módulo 2371-SS-201.

(Fuente: elaboración propia)

En la Tabla 9, se extiende la comparación de los ángulos estimados a todos los módulos. En ella, se muestra el error porcentual obtenido de la comparación de métodos. Adicionalmente, en la tabla 9 se resaltan aquellos ángulos cuyo error supera el 1%, siendo el error máximo igual a 8.68%.

Tabla 9: Error (%) entre ángulos estimados por ambos métodos.

Error (%)– Método Convencional VS Algoritmo							
Ítem	2371-SS-201	2372-SS-202_1	2372-SS-202_2	2373-SS-203_1	2373-SS-203_2	2374-SS-204	4310-SS-407
ω_1	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
ω_2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
α_1	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
β_1	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
θ_1	0.00%	0.11%	0.06%	0.00%	0.10%	0.00%	0.00%
φ_1	0.00%	0.14%	0.07%	0.00%	0.10%	0.00%	0.00%
α_2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
β_2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
θ_2	0.00%	0.14%	0.09%	0.00%	0.12%	0.00%	0.00%
φ_2	0.00%	0.17%	0.10%	0.00%	0.12%	0.00%	0.00%
α_3	1.17%	0.00%	0.00%	3.61%	0.00%	2.00%	7.34%
β_3	1.09%	0.00%	0.00%	3.47%	0.00%	2.39%	8.68%
θ_3	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%
φ_3	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

(Fuente: elaboración propia)

Tabla 10: Diferencia entre ángulos estimados por ambos métodos.

Diferencia (°)– Método Convencional VS Algoritmo							
Ítem	2371-SS-201	2372-SS-202_1	2372-SS-202_2	2373-SS-203_1	2373-SS-203_2	2374-SS-204	4310-SS-407
ω_1	0	0	0	0	0	0	0
ω_2	0	0	0	3E-05	0	0	0
α_1	0	0	0	2E-05	0	0	0
β_1	0	0	0	4E-05	0	0	0
θ_1	0	0.0689	0.0378	1E-05	0.0691	0.0007	0
φ_1	0	0.0911	0.0432	2E-05	0.0665	0.0007	0.0001
α_2	0	0	0	1E-05	0	0	0
β_2	0	0	0	4E-05	0	0	0
θ_2	0	0.0879	0.055	4E-05	0.0852	0.001	0
φ_2	0	0.1162	0.0629	4E-05	0.082	0.001	0.0001
α_3	0.0079	0	0	0.00306	0	0.0048	0.004
β_3	0.0072	0.0001	0	0.00202	0	0.005	0.005
θ_3	0.0045	0	0	0.00122	0.0001	0.0036	0.0029
φ_3	0.0047	0	0	0.00164	0	0.0016	0.0027

(Fuente: elaboración propia)

Para complementar el análisis, se presenta la tabla 10, que exhibe la diferencia entre ángulos obtenidos por ambos métodos.

Adicionalmente, la tabla 10 muestra que la diferencia máxima entre ángulos es de 0.1162° , siendo el único ángulo obtenido por el algoritmo cuya diferencia respecto del método convencional, supera el valor de 0.1° .

Finalmente, observando en la tabla 10 la diferencia de los ángulos α_3 y β_3 de la subestación 4310-SS-407, se distingue que dicha diferencia está en el orden de las milésimas de un grado sexagesimal. Por tanto, el error porcentual mostrado para estas magnitudes es consecuencia del reducido valor de dichos ángulos.

6.2 Análisis de resultados de tensiones:

En esta sección, se analizan los resultados de las tensiones estimadas, tanto por el método convencional como por el algoritmo propuesto.

En primer lugar, la tabla 11 presenta el resumen de las tensiones estimadas por el método convencional, manteniendo la codificación presentada en la figura 44. (Sección 5.3)

Luego, en la tabla 12, se muestran las tensiones estimadas por el algoritmo, para cada módulo de la unidad de análisis. Esta tabla también usa la codificación presentada en la figura 44, permitiendo la comparación directa entre métodos.

Tabla 11: Tensiones estimadas por método convencional.

Tensiones FEM (kg-f) - Método Convencional							
Ítem	2371-SS-201	2372-SS-202_1	2372-SS-202_2	2373-SS-203_1	2373-SS-203_2	2374-SS-204	4310-SS-407
T1	5445.9	5551	5869.6	4817	6307	6694	3815
T2	6633.1	7343	6731.2	9077	6005	6724	3461
T3	5720	4322	5012.1	4851	5439	6810	3731
T4	6994.8	5716	5700.6	9268	5278	6936	3384
T5	5808.2	3724	4011.7	3393	4885	5767	3961
T6	7071.7	4927	4604.9	6505	4716	5768	3557
T7	5540	4975	4928.9	3380	5714	5600	4015
T8	6749.1	6584	5657.8	6328	5455	5583	3611
T9	11702	10840	11675	9989	11530	14210	8626
T10	13769	13590	12969	17550	11170	14390	8053
T11	11534	9568	9658.5	6867	10400	11940	9249
T12	13512	12000	10795	12050	10050	11900	8612
T13	25865	25190	25099	28090	23750	29010	16090
T14	25813	22930	21743	21060	21920	25380	16740

(Fuente: elaboración propia)

Tabla 12: Tensiones estimadas por algoritmo.

Tensiones (ton-f) - Algoritmo							
Ítem	2371-SS-201	2372-SS-202_1	2372-SS-202_2	2373-SS-203_1	2373-SS-203_2	2374-SS-204	4310-SS-407
T1	5.4361	5.5451	5.8677	4.8254	6.281	6.7111	3.7887
T2	6.6245	7.3333	6.7161	9.1462	6.0474	6.7487	3.4114
T3	5.7426	4.3161	5.017	4.8487	5.4569	6.8445	3.7635
T4	6.998	5.708	5.7424	9.1904	5.2539	6.8828	3.3887
T5	5.8036	3.7304	4.0132	3.3971	4.8795	5.7254	3.9679
T6	7.0722	4.9333	4.5936	6.4387	4.698	5.7575	3.5728
T7	5.5398	4.9838	4.9315	3.376	5.6999	5.595	3.9975
T8	6.7507	6.591	5.6446	6.3987	5.488	5.6263	3.5994
T9	11.7206	10.8237	11.6612	9.9897	11.5345	14.2722	8.6391
T10	13.7478	13.5752	12.999	17.5468	11.1615	14.336	8.0551
T11	11.5248	9.5824	9.662	6.8656	10.3886	11.8833	9.2447
T12	13.5181	12.0184	10.7704	12.0591	10.0526	11.9364	8.6197
T13	25.8254	25.1581	25.1215	28.082	23.7487	29.0119	16.0945
T14	25.8507	22.9629	21.7195	21.064	21.9125	25.3747	16.7367

(Fuente: elaboración propia)

Tabla 13: Error (%) entre tensiones estimadas por ambos métodos.

Error (%)– Método Convencional VS Algoritmo							
Item	2371-SS-201	2372-SS-202_1	2372-SS-202_2	2373-SS-203_1	2373-SS-203_2	2374-SS-204	4310-SS-407
T1	0.18%	0.11%	0.03%	0.17%	0.41%	0.26%	0.69%
T2	0.13%	0.13%	0.22%	0.76%	0.71%	0.37%	1.43%
T3	0.40%	0.14%	0.10%	0.05%	0.33%	0.51%	0.87%
T4	0.05%	0.14%	0.73%	0.84%	0.46%	0.77%	0.14%
T5	0.08%	0.17%	0.04%	0.12%	0.11%	0.72%	0.17%
T6	0.01%	0.13%	0.25%	1.02%	0.38%	0.18%	0.44%
T7	0.00%	0.18%	0.05%	0.12%	0.25%	0.09%	0.44%
T8	0.02%	0.11%	0.23%	1.12%	0.60%	0.78%	0.32%
T9	0.16%	0.15%	0.12%	0.01%	0.04%	0.44%	0.15%
T10	0.15%	0.11%	0.23%	0.02%	0.08%	0.38%	0.03%
T11	0.08%	0.15%	0.04%	0.02%	0.11%	0.47%	0.05%
T12	0.05%	0.15%	0.23%	0.08%	0.03%	0.31%	0.09%
T13	0.15%	0.13%	0.09%	0.03%	0.01%	0.01%	0.03%
T14	0.15%	0.14%	0.11%	0.02%	0.03%	0.02%	0.02%

(Fuente: elaboración propia)

Adicionalmente, se elabora la tabla 13 que exhibe los errores en porcentaje obtenidos de la comparación de resultados obtenidos por ambos métodos. En dicha tabla se resaltan las tensiones que superan el 1% de error.

Por otro lado, la figura 55, compara las tensiones obtenidas, por ambos métodos, para la subestación modular 2371-SS-201, y se observan diferencias entre magnitudes del orden de las decenas de kg-f.

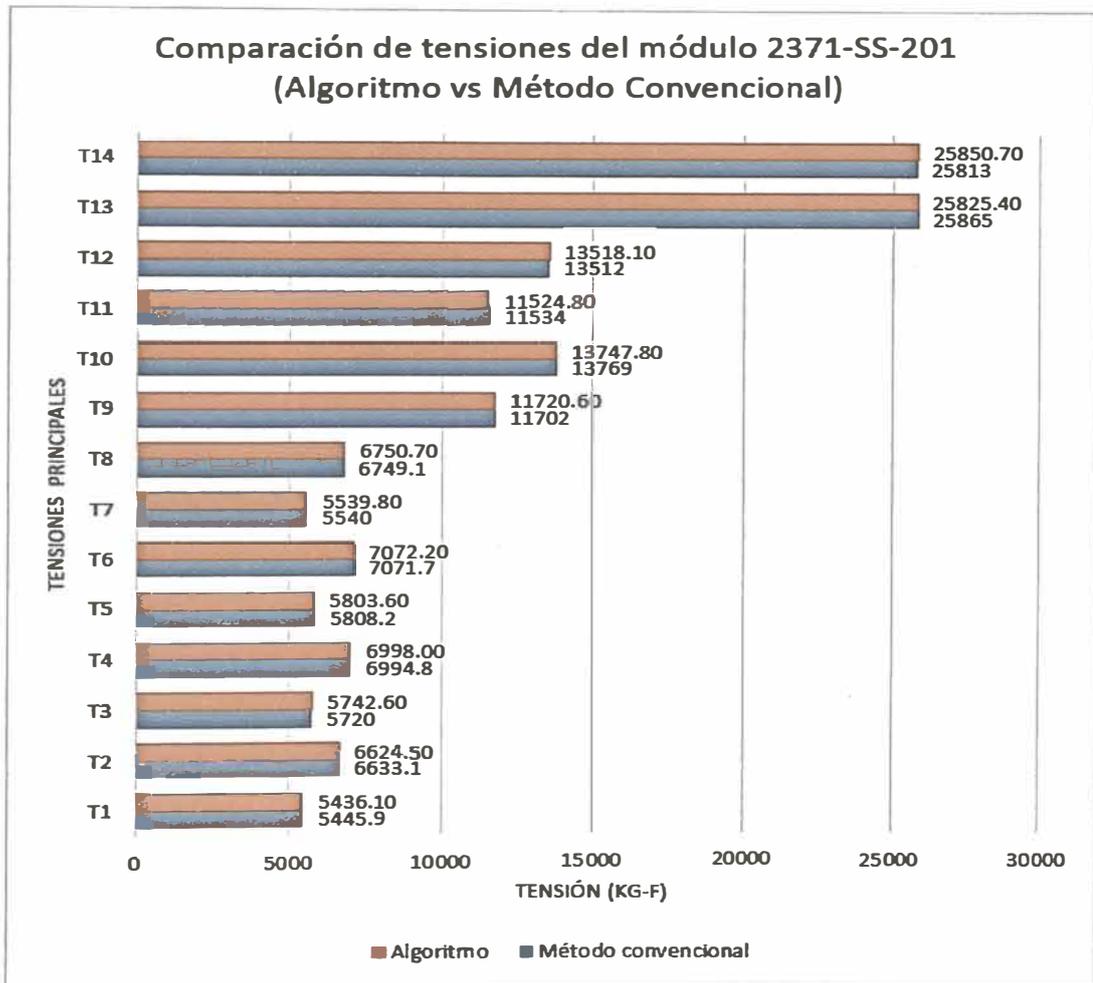


Figura 55: Comparación de resultados de tensiones del módulo 2371-SS-201.

(Fuente: elaboración propia)

La tabla 14, profundiza en las diferencias mostradas en la figura 55 y expande el análisis a todos los módulos evaluados. En esta tabla se resaltan aquellas tensiones cuyo valor supera los 50 kg-f, y se observa que la máxima diferencia de tensiones alcanza el valor 77.6 kg-f.

Tabla 14: Diferencia entre tensiones estimadas por ambos métodos.

Diferencia (kg-f) – Método Convencional VS Algoritmo							
Ítem	2371-SS-201	2372-SS-202_1	2372-SS-202_2	2373-SS-203_1	2373-SS-203_2	2374-SS-204	4310-SS-407
T1	9.8	5.9	1.9	8.4	26.0	17.1	26.3
T2	8.6	9.7	15.1	69.2	42.4	24.7	49.6
T3	22.6	5.9	4.9	2.3	17.9	34.5	32.5
T4	3.2	8.0	41.8	77.6	24.1	53.2	4.7
T5	4.6	6.4	1.5	4.1	5.5	41.6	6.9
T6	0.5	6.3	11.3	66.3	18.0	10.5	15.8
T7	0.2	8.8	2.6	4.0	14.1	5.0	17.5
T8	1.6	7.0	13.2	70.7	33.0	43.3	11.6
T9	18.6	16.3	13.8	0.7	4.5	62.2	13.1
T10	21.2	14.8	30.0	3.2	8.5	54.0	2.1
T11	9.2	14.4	3.5	1.4	11.4	56.7	4.3
T12	6.1	18.4	24.6	9.1	2.6	36.4	7.7
T13	39.6	31.9	22.5	8.0	1.3	1.9	4.5
T14	37.7	32.9	23.5	4.0	7.5	5.3	3.3

(Fuente: elaboración propia)

6.3 Análisis del tiempo de diseño de sistema de aparejos

Para comparar la performance en tiempo del algoritmo frente al método convencional presentado es necesario asociar a cada proceso del diseño de sistemas de aparejos un lapso. En consecuencia, los tiempos comparados se definen de la siguiente manera:

- t_1 : Tiempo de estimación de geometría del sistema de aparejos. (Definición de longitudes y ángulos principales)
- t_2 : Tiempo de estimación de tensiones en sistema de aparejos.
- t_3 : Tiempo de selección de aparejos del sistema.
- t_4 : Tiempo total de diseño.

Los tiempos empleados por el método convencional para el diseño del sistema de aparejos, son presentados en la tabla 15. En esta tabla se identifica que el menor tiempo de diseño es 92.9 minutos para los módulos analizados.

Tabla 15: Tiempo de diseño de sistema de aparejos por método convencional.

Tiempos de diseño (min) - Método Convencional							
Ítem	2371-SS-201	2372-SS-202_1	2372-SS-202_2	2373-SS-203_1	2373-SS-203_2	2374-SS-204	4310-SS-407
t1	12.2	12.4	12.1	14	12.8	13	12.5
t2	22.5	20.7	21.8	21.5	26.1	20	20.7
t3	61.8	66.8	58.8	70.2	61.5	60.6	59.7
t4	96.5	99.9	92.7	105.7	100.4	93.6	92.9

(Fuente: elaboración propia)

Por otro lado, en la tabla 16 se presentan los tiempos empleados por el algoritmo propuesto, análogos a los mostrados en la tabla anterior, sin embargo, estos tiempos están presentados en segundos.

Tabla 16: Tiempo de diseño de sistema de aparejos por algoritmo.

Tiempo (s) - Algoritmo							
Ítem	2371-SS-201	2372-SS-202_1	2372-SS-202_2	2373-SS-203_1	2373-SS-203_2	2374-SS-204	4310-SS-407
t1	3.134	2.015	2.028	2.098	2.388	2.426	2.025
t2	0.012	0.006	0.009	0.007	0.006	0.008	0.007
t3	0.458	0.311	0.266	0.685	0.253	0.305	0.252
t4	3.604	2.332	2.303	2.79	2.647	2.739	2.284

(Fuente: elaboración propia)

Como se observa en la tabla 16, el máximo tiempo de diseño requerido por el algoritmo es 3.604 segundos, para los casos estudiados.

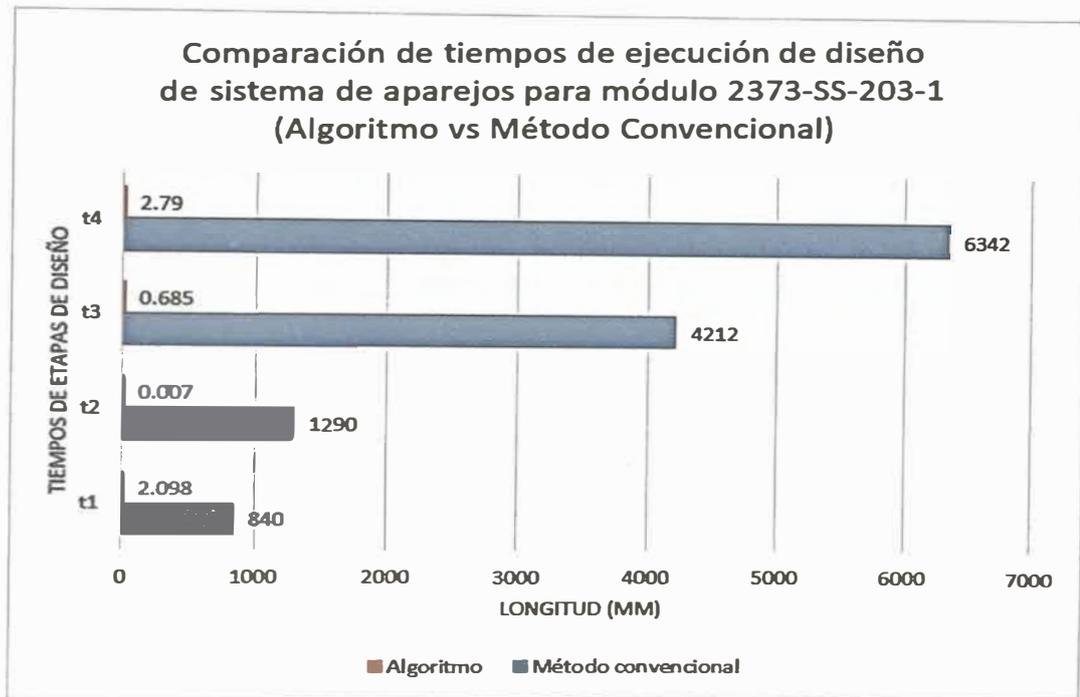


Figura 56: Comparación de tiempos de diseño del módulo 2373-SS-203-1.

(Fuente: elaboración propia)

En la figura 56, se comparan los tiempos en segundos obtenidos por ambos métodos para el módulo 2373-SS-203-1. La figura 56 evidencia una drástica reducción del tiempo en todas las etapas de diseño, siendo la selección de aparejos del sistema la etapa más beneficiada.

Adicionalmente, se expande el análisis a los demás módulos y se presentan las reducciones de tiempo, en segundos, generadas por el algoritmo respecto del método convencional, en la tabla 17. Siendo la menor reducción de tiempo total conseguida igual a 5559.697 segundos.

Tabla 17: Reducción de tiempo (s) de algoritmo vs método convencional.

Reducción de tiempo							
Ítem	2371-SS-201	2372-SS-202_1	2372-SS-202_2	2373-SS-203_1	2373-SS-203_2	2374-SS-204	4310-SS-407
t1	728.866	741.985	723.972	837.902	765.612	777.574	747.975
t2	1349.988	1241.994	1307.991	1289.993	1565.994	1199.992	1241.993
t3	3707.542	4007.689	3527.734	4211.315	3689.747	3635.695	3581.748
t4	5786.396	5991.668	5559.697	6339.210	6021.353	5613.261	5571.716

(Fuente: elaboración propia)

Finalmente, en la tabla 18 se muestra el porcentaje de reducción de tiempo que logra el algoritmo respecto del método convencional presentado, para cada módulo que compone la unidad de análisis. Dicha tabla muestra que el menor porcentaje de reducción total es 99.9378%.

Tabla 18: Reducción de tiempo (%) de algoritmo.

Reducción (%)							
Ítem	2371-SS-201	2372-SS-202_1	2372-SS-202_2	2373-SS-203_1	2373-SS-203_2	2374-SS-204	4310-SS-407
t1	99.5719%	99.7292%	99.7207%	99.7502%	99.6891%	99.6890%	99.7300%
t2	99.9991%	99.9995%	99.9993%	99.9995%	99.9996%	99.9993%	99.9994%
t3	99.9876%	99.9922%	99.9925%	99.9837%	99.9931%	99.9916%	99.9930%
t4	99.9378%	99.9611%	99.9586%	99.9560%	99.9561%	99.9512%	99.9590%

(Fuente: elaboración propia)

6.4 Análisis de aparejos seleccionados

Existe convergencia entre los resultados (listados definitivos de aparejos) obtenidos por ambos métodos, convencional y algoritmo; siendo la principal diferencia, el tiempo de obtención de estos resultados (analizado en la sección anterior).

En la tabla 19 se muestran los estrobos elegidos por el algoritmo para los 7 módulos que componen el caso de estudio, siendo necesario para definir cada estrobo su diámetro nominal y su longitud. Además, la tabla muestra el requerimiento de cantidad de cada tipo de estrobo elegido, por su ubicación en el sistema de aparejos.

Tabla 19: Estrobos seleccionados por algoritmo para módulos.

Estrobos seleccionados - Algoritmo										
Nombre de módulo	Nivel 1		Nivel 2 Simple		Nivel 2 Compuesto		Nivel 3 Simple		Nivel 3 Compuesto	
	Cant. = 8u		Cant. = 2u		Cant. = 2u		Cant. = 1u		Cant. = 1u	
	Diam. (pulg)	Long. (m)	Diam. (pulg)	Long. (m)	Diam. (pulg)	Long. (m)	Diam. (pulg)	Long. (m)	Diam. (pulg)	Long. (m)
2371-SS-201	1.25	6	1.5	6	1.5	6	2.5	10	2.5	10
2372-SS-202_1	1.25	6	1.5	6	1.5	6	2	6	2	6
2372-SS-202_2	1.25	6	1.5	6	1.5	6	2	6	2	6
2373-SS-203_1	1.25	6	1.5	6	1.5	6	2.5	10	2.5	10
2373-SS-203_2	1.25	6	1.5	6	1.5	6	2.5	10	2.5	10
2374-SS-204	1.25	6	1.5	6	1.5	6	2.5	8	2.5	8
4310-SS-407	1.25	6	1.5	4	1.5	4	1.5	6	1.5	6

(Fuente: elaboración propia)

Como se menciona en el capítulo anterior, la selección de aparejos, en este caso, estrobos, depende de la geometría del sistema (asociada a la longitud del estrobo), las tensiones calculadas (asociadas a los diámetros de los estrobos), las características del módulo (indirectamente asociadas al peso y geometría del módulo) y la cantidad disponible de estrobos en la base de datos de aparejos real del proyecto.

Para entender la capacidad del algoritmo para elegir los elementos que mejor se ajusten a los requerimientos de carga que deben soportar, se observan los diámetros de estrobos seleccionados (Tabla 19) en el nivel 3 simple, de los módulos: “2372-SS-202_2”, “2374-SS-204” y “4310-SS-407”.

Empleando la información brindada en la base de datos de aparejos del proyecto presentada en el anexo 6, se tiene que para el módulo “2372-SS-202_2”, el estrobo elegido (diámetro 2”) puede soportar una tensión axial de 37 t, y está sometido a una carga 25.12 t.

Por otro lado, para el módulo “4310-SS-407”, el estrobo elegido, de diámetro igual a 1 ½”, soporta una tensión axial máxima de 21 t, estando sometido a una carga de 16.1 t. Mientras, que para el módulo “2374-SS-204”, el estrobo elegido (diámetro 2 ½”) soporta una tensión axial máxima de 54 t, siendo la carga que recibe igual a 29t.

De lo expuesto, se observa que en los módulos “2372-SS-202_2” y “4310-SS-407”, el estrobo de la posición mencionada utiliza el 68% y 77%, aproximadamente, de su capacidad admisible. En contraste, en el módulo restante, “2374-SS-204”, dicho estrobo solamente utiliza el 54% de su capacidad admisible.

Para entender este fenómeno se requiere recurrir a los otros factores que definen la selección del estrobo, o sea, la longitud requerida del estrobo y la cantidad disponible de estos elementos en el inventario del proyecto. Por ello, observando la Tabla 19, el estrobo de nivel 3 simple del módulo “2374-SS-204”, debe tener una longitud de 10 m y debe haber, por lo menos, un elemento de este tipo en el proyecto. Recurriendo a la base de datos de aparejos (Anexo 6), sólo existe una opción capaz de satisfacer los requerimientos en simultáneo, y fue la elegida por el algoritmo.

Finalmente, el algoritmo procede de manera análoga para los demás aparejos (grilletes, balancines, etc.).

6.5 Contrastación de la hipótesis.

Ho: El desarrollo de un algoritmo de automatización basado en un modelo matemático existente no mejora el tiempo de diseño del sistema de aparejos empleados en izaje de módulos con puntos de sujeción en su base.

H₁: El desarrollo de un algoritmo de automatización basado en un modelo matemático existente mejora el tiempo de diseño del sistema de aparejos empleados en izaje de módulos con puntos de sujeción en su base.

Decisión:

Los resultados expuestos demuestran que el tiempo promedio que requiere el algoritmo para diseñar un sistema de aparejos para el izaje de módulos con puntos de sujeción en su base, es de 2.659 segundos; reduciendo el tiempo de diseño, respecto de la metodología convencional presentada, en 99%.

Adicionalmente, el incremento en la eficiencia, conseguido por empleo el algoritmo, no perjudica la precisión de los resultados, obteniendo un error máximo de 1.43% en las tensiones estimadas por el algoritmo, comparadas con los resultados obtenidos en un análisis estático por elementos finitos.

En consecuencia, se rechaza la hipótesis nula H₀ y se acepta la hipótesis alternativa H₁.

CONCLUSIONES

Los resultados presentados en la investigación permiten concluir lo siguiente:

- El algoritmo reduce el tiempo de diseño de un sistema de aparejos para el izaje de módulos con puntos de sujeción en su base en un 99% respecto de métodos convencionales, realizando el diseño en tiempo promedio de 2.671 segundos por módulo.
- Las tensiones calculadas por el algoritmo presentan un error promedio de 0.25% al compararlas con los resultados obtenidos mediante análisis estáticos por elementos finitos.
- Las longitudes estimadas por el algoritmo presentan un error promedio de 0% respecto de las calculadas en programas de diseño asistido por computadora (CAD).
- La etapa de selección de aparejos presenta la mayor reducción de tiempo, equivalente a 60 min, cuando se realiza con el algoritmo.
- El algoritmo es capaz de diseñar el sistema de aparejos para todo módulo que cumpla las siguientes características:
 - Tenga los puntos de sujeción en su base.
 - Los puntos de sujeción son orejas de izaje.
 - Tenga 08 orejas de izaje.
 - Las orejas de izaje tengan una orientación que permita la colocación de eslingas no verticales en el primer nivel.

RECOMENDACIONES

A continuación, se presentan las recomendaciones prácticas:

- Durante el diseño del sistema de aparejos de un módulo empleando el algoritmo presentado, se recomienda evaluar previamente la estabilidad del módulo cuando es sujetado desde su base.
- Respecto al izaje de módulos, se recomienda seguir las indicaciones del fabricante del módulo respecto a su manipulación; almacenamiento y las cargas estructurales que puede soportar.
- Respecto de los aparejos de izaje, se recomienda hacer inspecciones periódicas, por un personal capacitado, según los estándares nacionales e internacionales.
- Respecto de la base de datos de los aparejos de izaje requerida por el algoritmo, se recomienda su revisión y actualización periódica.

Desde el punto de vista académico se recomienda:

- Analizar sistemas de aparejos que permitan reducir la cantidad de elementos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] American Society of Mechanical Engineers. (2018). B 30.09. Slings.
- [2] American Society of Mechanical Engineers. (2018). B 30.26. Rigging Hardware.
- [3] American Society of Mechanical Engineers. (2018). P 30.1. Planning for Load Handling Activities.
- [4] Det Norske Veritas. (2014). DNV-OS-H205. Lifting Operations, 2-5.
- [5] Generalova, E., Generalov, V., Kuznetsova, A. (2016). Modular buildings in modern construction. *Procedia Engineering*, 153, 167-172.
- [6] Hashemi S., Han S., Olearczyk J., Bouferguene A., Al-Hussein M., Kosa J. (2019). Automated Mathematical-Based Design Framework for The Selection of Rigging Configuration. *Proceedings of the 36th ISARC*, 172-178.
- [7] MacDonald, J., Rossnagel, W., Higgins L. (2009). *Handbook of Rigging, Lifting, Hoisting and Scaffolding for Construction and Industrial Operations (Fifth edition ed.)*. McGraw Hill.
- [8] Maronati, G., Petrovic, B., Van Wyk, J., Kelley, M., White, C. (2017). EVAL: a methodological approach to identify NPP Total Capital Investment Cost drivers and sensitivities. *Progress in Nuclear Energy*, 104, 190-202.
- [9] Minayhashemi, S. (2019). *Automated Mathematical-Based Rigging Design System for Heavy Industrial Modules*. Tesis de Maestría, Concordia University, Building, Civil, and Environmental Engineering, Montreal.
- [10] Minayhashemi, S. Han S., Olearczyk J., Bouferguene A., Al-Hussein M., Kosa J. (2020). Automated rigging design for heavy industrial lifts. *Automation in Construction*, 112, 103083.

- [11] Olearczyk, J., Lei, Z., Ofrim, B., Han, S., Al-Hussein, M. (2015) Intelligent Crane Management Algorithm for Construction Operation (iCrane). Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction, vol. 32, p. 1.
- [12] Quintanilla, K. (2021). Diseño del sistema de izaje de las planchas de un clarificador mediante electroimanes de alta potencia para reducir los costos de montaje en una minería de alta producción. [Informe de Suficiencia, Universidad Nacional de Ingeniería].
- [13] Sam, M. (2009). Offshore Heavy Lift Rigging Analysis Using Spreadsheet. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 14(2), 63-69.
- [14] Smith, C., Hammeran, J., Lockwood, C. (2012) Module Fabrication Strategy for Today's Nuclear Industry. Proceedings of the 2012 20th International Conference on Nuclear Engineering and the ASME 2012 Power Conference. Volume 2: Plant Systems, Structures, and Components; Safety and Security; Next Generation Systems; Heat Exchangers and Cooling Systems. pp. 125-137. ASME.
- [15] Subramanya, K., Kermanshachi S., Rouhanizadeh B. (2020). Modular Construction vs. Traditional Construction: Advantages and Limitations: A Comparative Study. Proceedings of the Creative Construction e-Conference 2020, 11 - 19. DOI: 10.3311/CCC2020-012.
- [16] Tomakov, V., Tomakov, M., Pahomova, E., Semicheva, N., Bredihina, N. (2018). A study on the causes and consequences of accidents with cranes for lifting and moving loads in industrial plants and construction sites of the Russian Federation. Journal of Applied Engineering Science, 16(1), 95-98.
- [17] U.S. Bureau of Labor Statistics. (2019). Fatal Occupational Injuries Involving Cranes. Recuperado el 10 de setiembre de 2021, de <https://www.bls.gov/iif/oshwc/foi/cranes-2017.htm>

- [18] Varghese, K., Dharwadkar, P., Wolfhope, J., O'Connor, T. (1997) A Heavy Lift Planning System for Crane Lifts. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 12, 31-42. DOI: 10.1111/0885-9507.00044.
- [19] Wei, Y., Wang, D., Liu, J., Yu, C., Cheng, T., Zhang, D. (2014) Modularization Technology Development Prospects. *Applied Mechanics and Materials*, 509, 92-95.
- [20] Westover, L. Olearczyk J., Hermann U., Adeeb S., Mohamed Y. (2014). Analysis of rigging assembly for lifting heavy industrial modules. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(6), 512–522.
- [21] Wrigley, P., Wood, P., Stewart, P., Hall, R., Robertson, D. (2018). Design for plant modularisation: nuclear and SMR, ASME. International Conference on Nuclear Engineering, Volume 9: Student Paper Competition. ISBN 9780791851531
- [22] Zhang, Z., Pan, W. (2020). Lift planning and optimization in construction: A thirty-year review. *Automation in Construction*, 118, 103271.

ANEXOS

ANEXO I	Reportes de dimensiones de los módulos	1
ANEXO II	Reportes de la geometría del sistema de aparejos por método convencional.....	9
ANEXO III	Reportes de tensiones del sistema de aparejos por método convencional.....	17
ANEXO IV	Reportes del tiempo de diseño por método convencional	25
ANEXO V	Reportes de los resultados del algoritmo.....	33
ANEXO VI	Reporte de la base de datos de aparejos de izaje del proyecto de construcción.....	70

ANEXO I

Reportes de dimensiones de los módulos

FORMATO 1: DIMENSIONES DE MÓDULOS

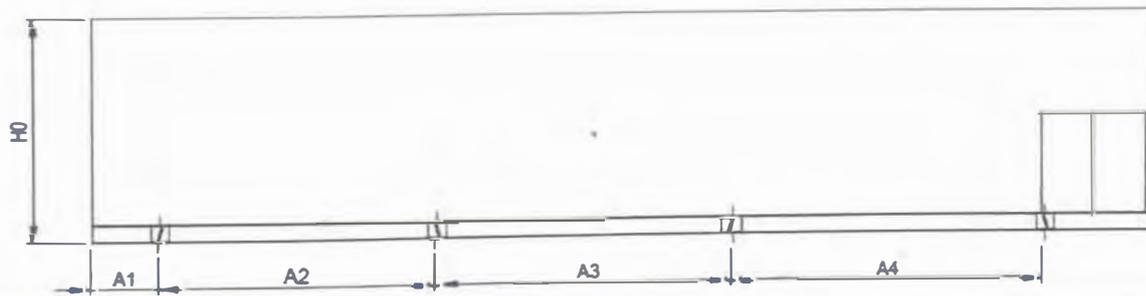
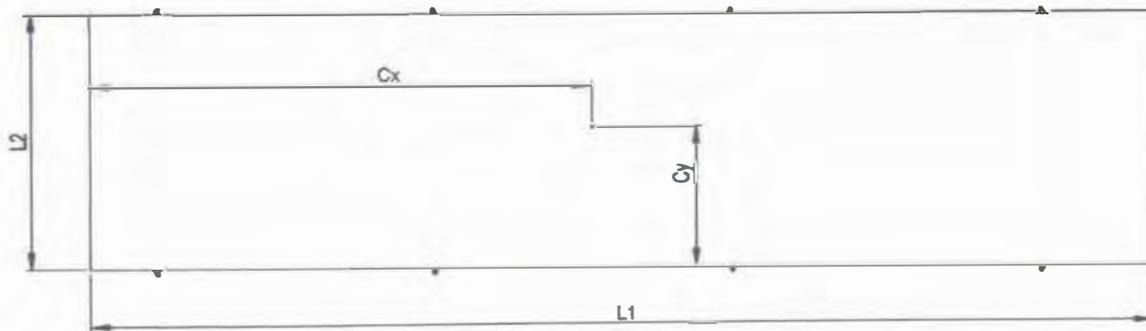
Nombre de Proyecto | Mina Justa - Sulfide Plant

Datos generales

Nombre de módulo | Sala electrica 2371-SS-201

Longitud (L1)	18.000	m	Peso (W)	45367	kg
Ancho (L2)	5.000	m	Centro gravedad x (Cx)	8.403	m
Altura (H0)	4.042	m	Centro gravedad y (Cy)	2.747	m

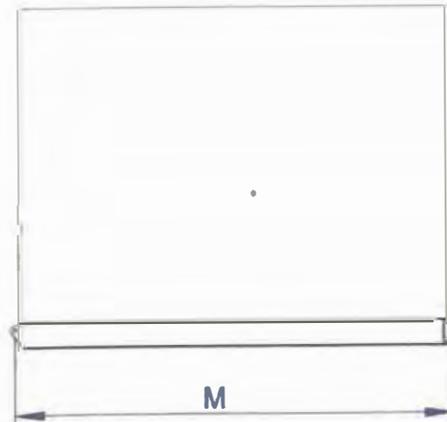
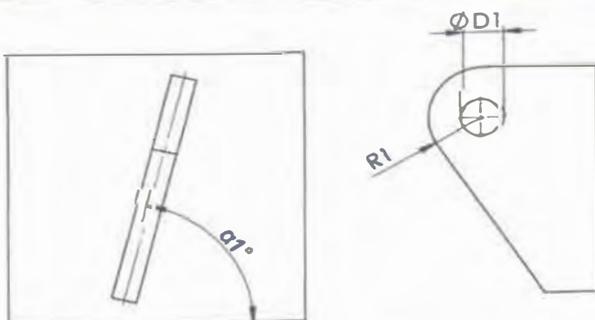
N° Plano referencial | JU-001-06-0201A-2371-04-DG-0011



Puntos de izaje

A1	1.150	m	A4	5.368	m
A2	4.620	m	M	5.147	m
A3	4.978	m	M: Distancia entre centro de orejas de izaje		

Orejas de izaje



D1	40	mm
R1	55	mm
$\alpha1$	76	°

FORMATO 1: DIMENSIONES DE MÓDULOS

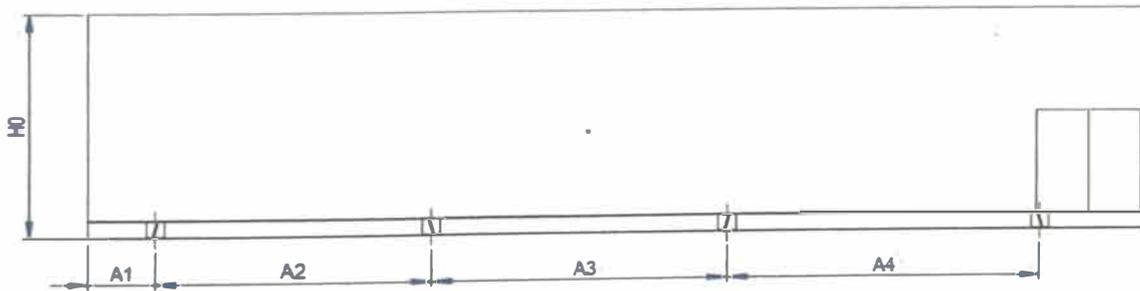
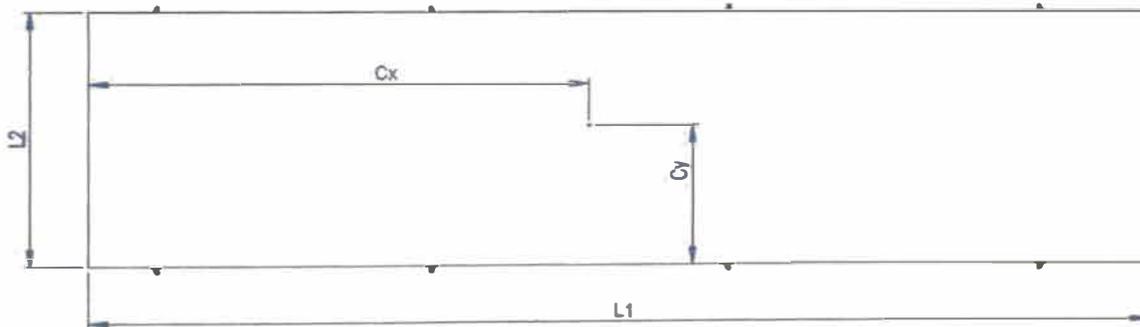
Nombre de Proyecto **Mina Justa - Sulfide Plant**

Datos generales

Nombre de módulo **Sala electrica 2372-SS-202-1**

Longitud (L1)	14.500	m	Peso (W)	41400	kg
Ancho (L2)	5.000	m	Centro gravedad x (Cx)	6.965	m
Altura (H0)	4.048	m	Centro gravedad y (Cy)	2.848	m

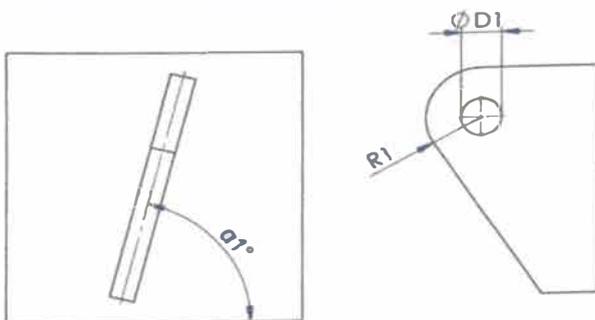
N° Plano referencial **JU-001-06-0201A-2372-04-DG-0011**



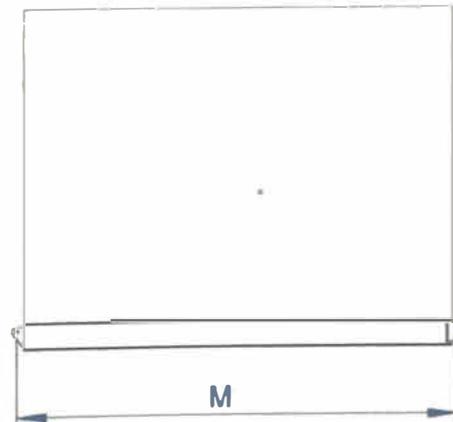
Puntos de izaje

A1	1.949	m	A4	3.316	m
A2	3.382	m	M	5.147	m
A3	3.732	m	M: Distancia entre centro de orejas de izaje		

Orejas de izaje



D1	40	mm
R1	55	mm
α_1	76	°



FORMATO 1: DIMENSIONES DE MÓDULOS

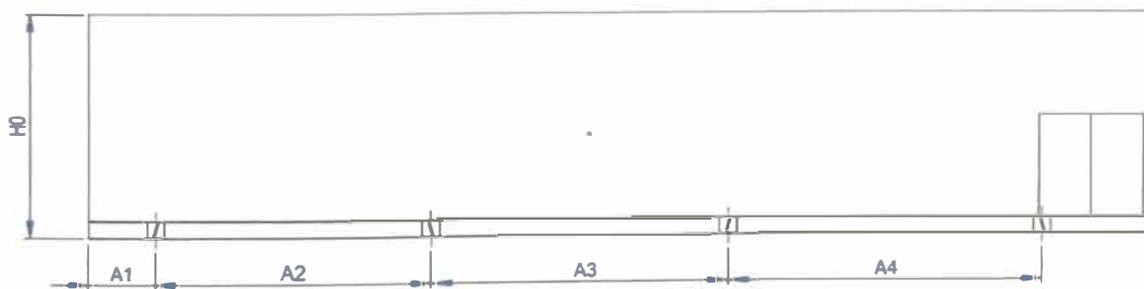
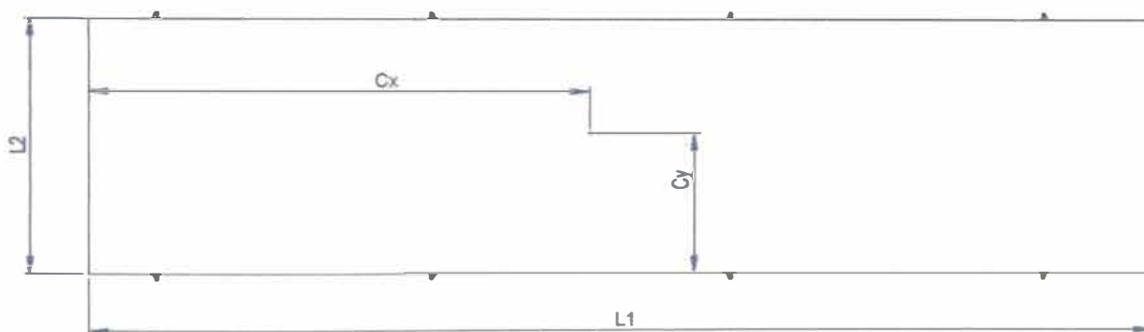
Nombre de Proyecto **Mina Justa - Sulfide Plant**

Datos generales

Nombre de módulo **Sala electrica 2372-SS-202-2**

Longitud (L1)	15.000	m	Peso (W)	40406	kg
Ancho (L2)	5.000	m	Centro gravedad x (Cx)	6.954	m
Altura (H0)	4.048	m	Centro gravedad y (Cy)	2.669	m

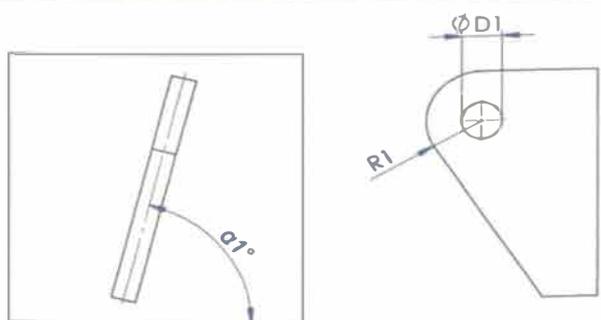
N° Plano referencial **JU-001-06-0201A-2372-04-DG-0011**



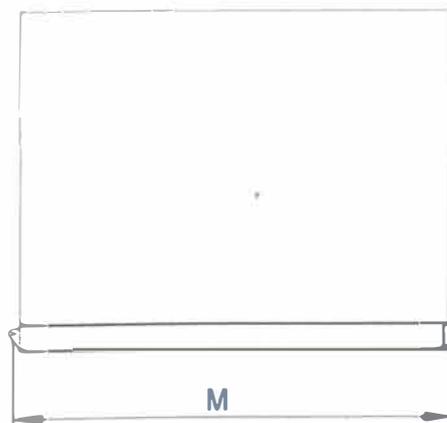
Puntos de izaje

A1	1.874	m	A4	3.562	m
A2	3.845	m	M	5.147	m
A3	3.264	m	M: Distancia entre centro de orejas de izaje		

Orejas de izaje



D1	40	mm
R1	55	mm
α_1	76	°



FORMATO 1: DIMENSIONES DE MÓDULOS

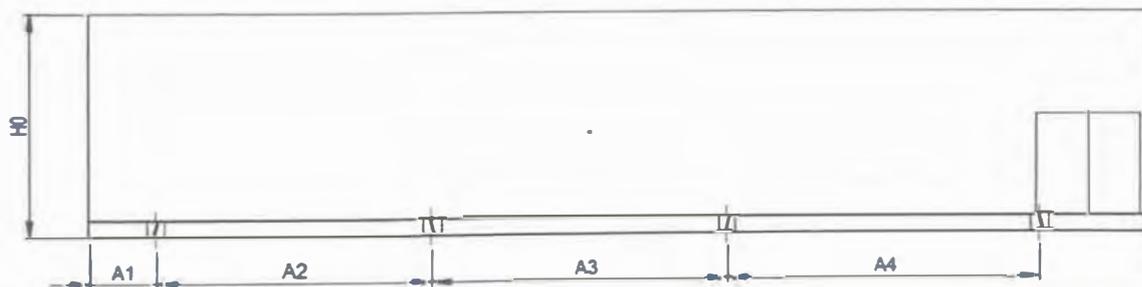
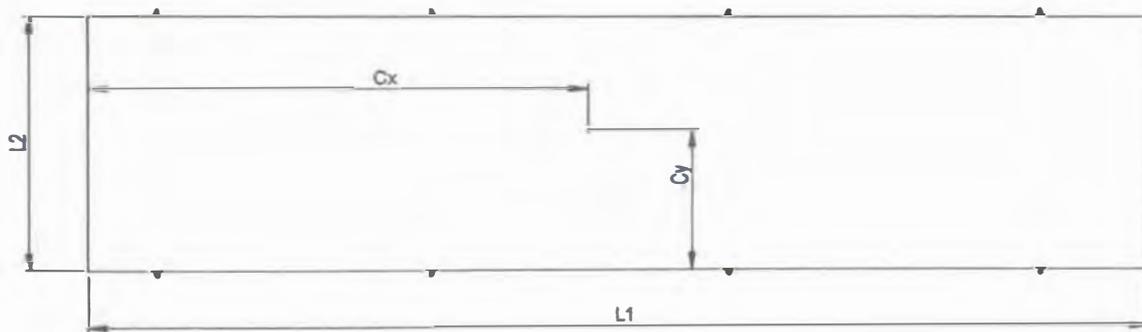
Nombre de Proyecto | Mina Justa - Sulfide Plant

Datos generales

Nombre de módulo | Sala electrica 2373-SS-203-1

Longitud (L1)	20.000	m	Peso (W)	43742	kg
Ancho (L2)	4.000	m	Centro gravedad x (Cx)	9.023	m
Altura (H0)	4.180	m	Centro gravedad y (Cy)	2.620	m

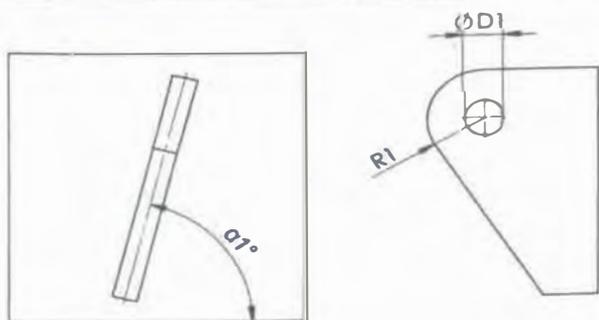
N° Plano referencial | JU-001-06-0201A-2373-04-DG-0011



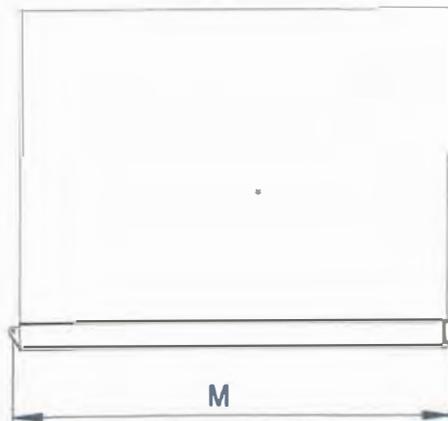
Puntos de izaje

A1	2.651	m	A4	4.999	m
A2	4.528	m	M	4.147	m
A3	5.322	m	M: Distancia entre centro de orejas de izaje		

Orejas de izaje



D1	40	mm
R1	55	mm
α1	76	°



FORMATO 1: DIMENSIONES DE MÓDULOS

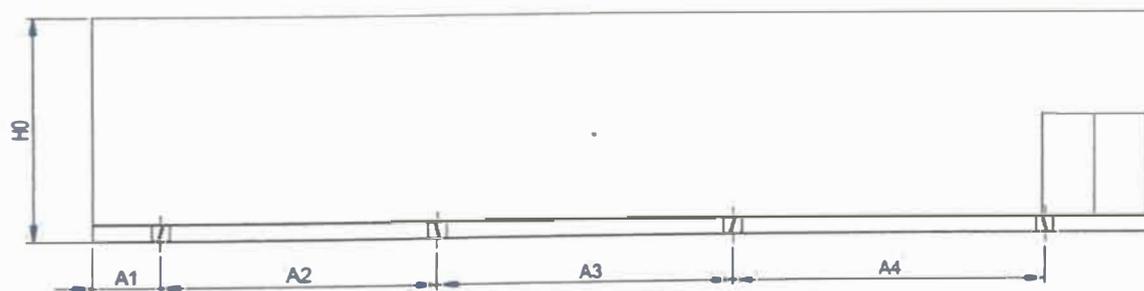
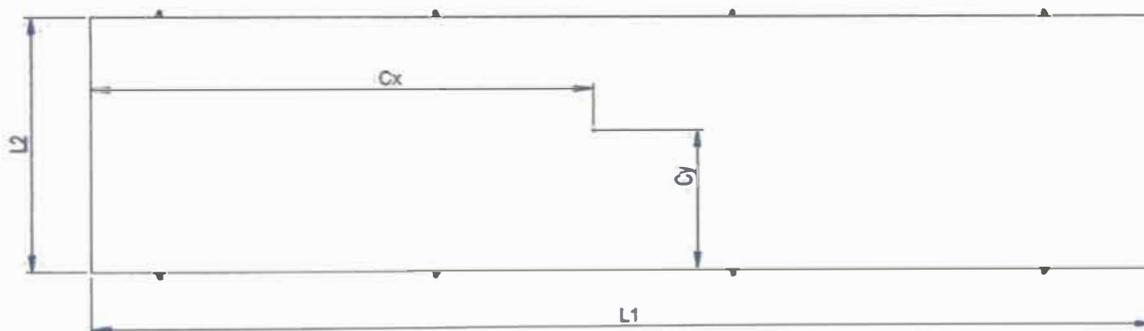
Nombre de Proyecto | Mina Justa - Sulfide Plant

Datos generales

Nombre de módulo | Sala electrica 2373-SS-203-2

Longitud (L1)	20.000	m	Peso (W)	40129	kg
Ancho (L2)	4.000	m	Centro gravedad x (Cx)	9.980	m
Altura (H0)	4.180	m	Centro gravedad y (Cy)	1.962	m

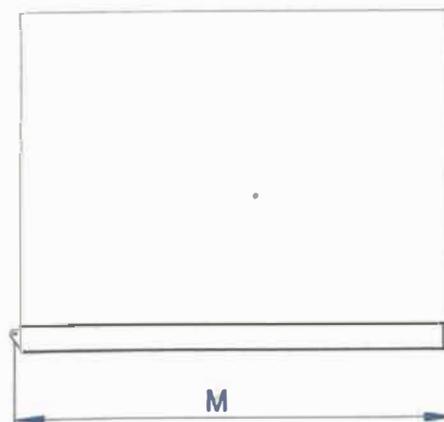
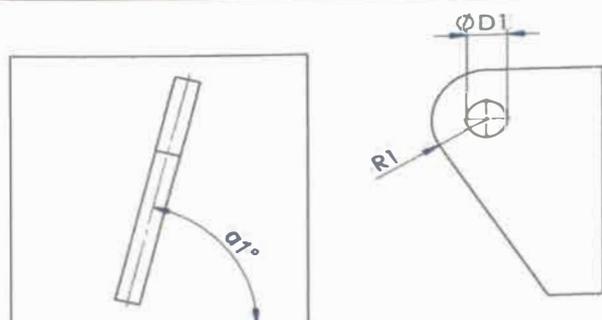
N° Plano referencial | JU-001-06-0201A-2373-04-DG-0011



Puntos de izaje

A1	2.631	m	A4	4.806	m
A2	4.785	m	M	4.147	m
A3	5.665	m	M: Distancia entre centro de orejas de izaje		

Orejas de izaje



D1	40	mm
R1	55	mm
$\alpha 1$	76	°

FORMATO 1: DIMENSIONES DE MÓDULOS

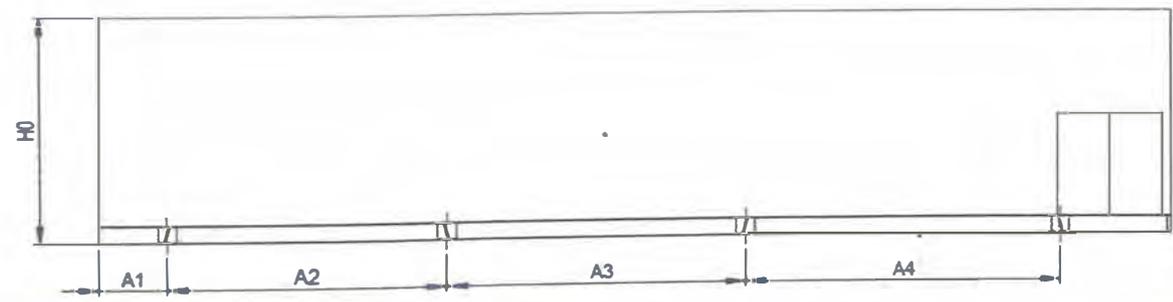
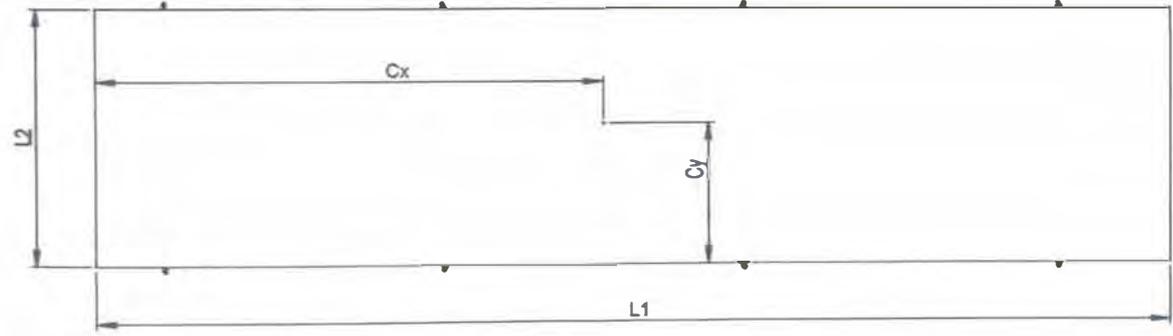
Nombre de Proyecto | Mina Justa - Sulfide Plant

Datos generales

Nombre de módulo | Sala electrica 2374-SS-204

Longitud (L1)	17.000	m	Peso (W)	46829	kg
Ancho (L2)	5.000	m	Centro gravedad x (Cx)	8.144	m
Altura (H0)	4.048	m	Centro gravedad y (Cy)	2.507	m

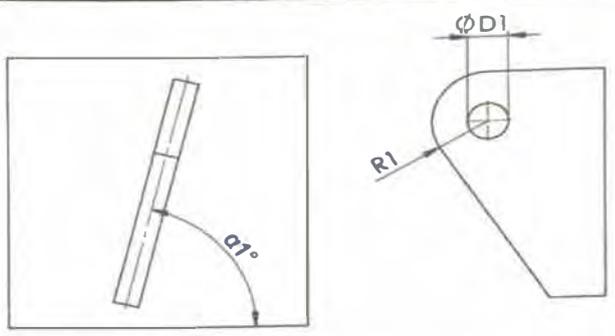
N° Plano referencial | JU-001-06-0201A-2374-04-DG-0011



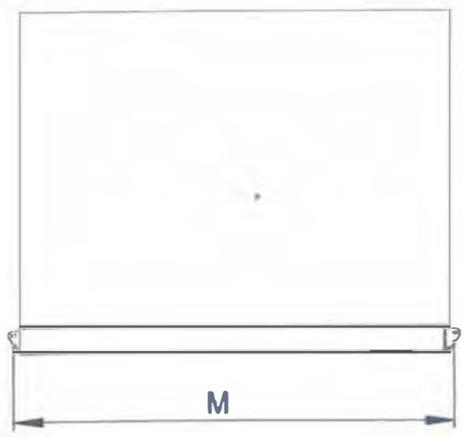
Puntos de izaje

A1	2.125	m	A4	4.172	m
A2	4.080	m	M	5.147	m
A3	4.632	m	M: Distancia entre centro de orejas de izaje		

Orejas de izaje



D1	40	mm
R1	55	mm
alpha1	76	°



FORMATO 1: DIMENSIONES DE MÓDULOS

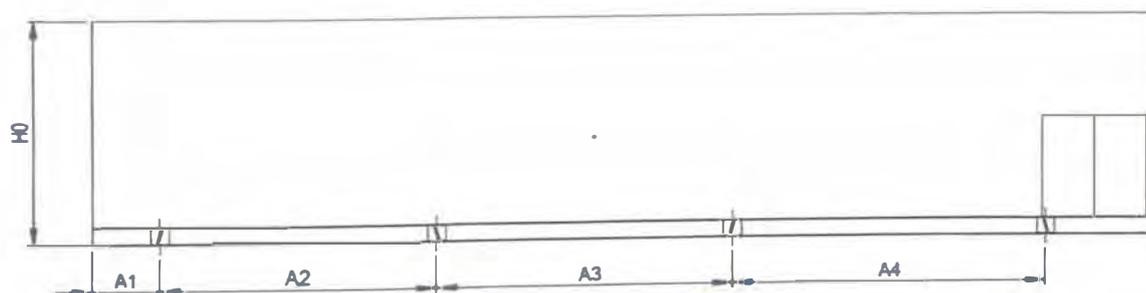
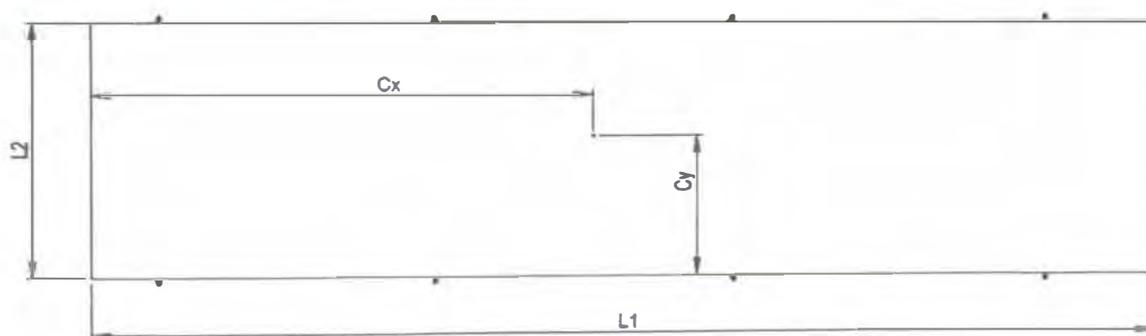
Nombre de Proyecto | Mina Justa - Sulfide Plant

Datos generales

Nombre de módulo | Sala electrica 4310-SS-407

Longitud (L1)	13.000	m	Peso (W)	28233	kg
Ancho (L2)	4.500	m	Centro gravedad x (Cx)	6.451	m
Altura (H0)	4.048	m	Centro gravedad y (Cy)	2.132	m

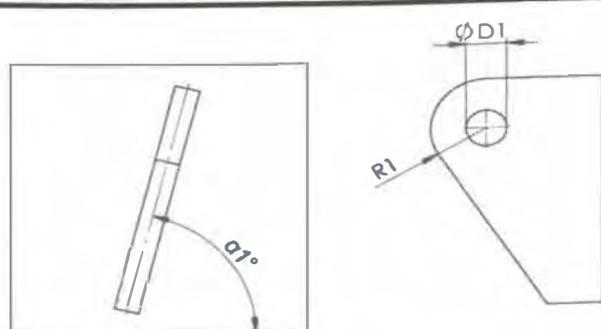
N° Plano referencial | JU-001-06-0201A-4310-04-DG-0011



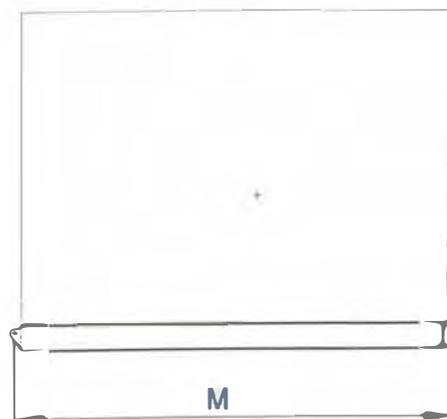
Puntos de izaje

A1	1.144	m	A4	3.179	m
A2	3.732	m	M	4.647	m
A3	3.201	m	M: Distancia entre centro de orejas de izaje		

Orejas de izaje

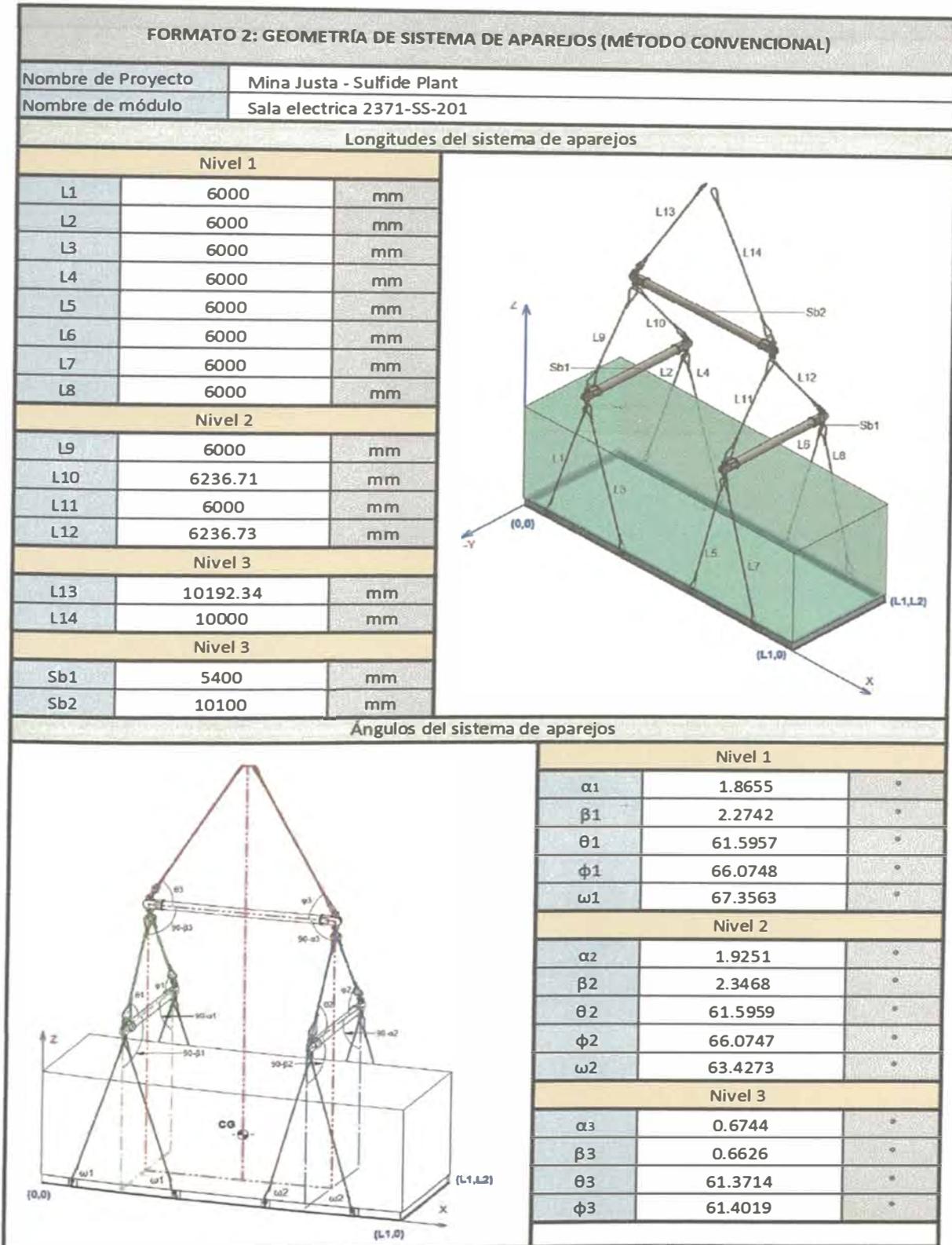


D1	40	mm
R1	55	mm
$\alpha1$	76	°

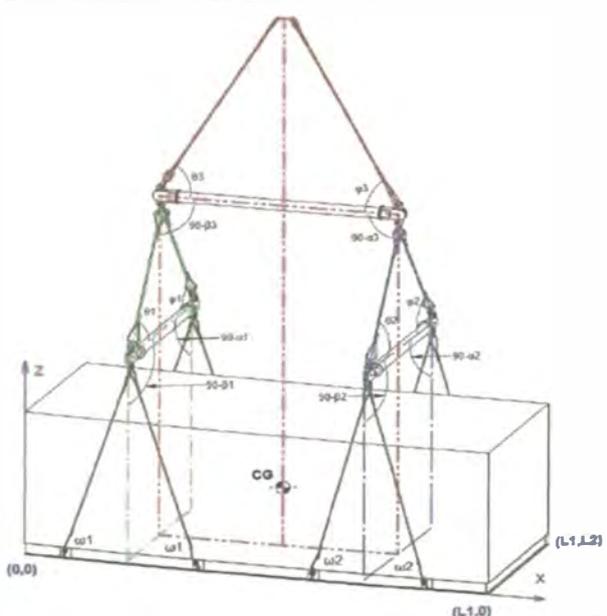
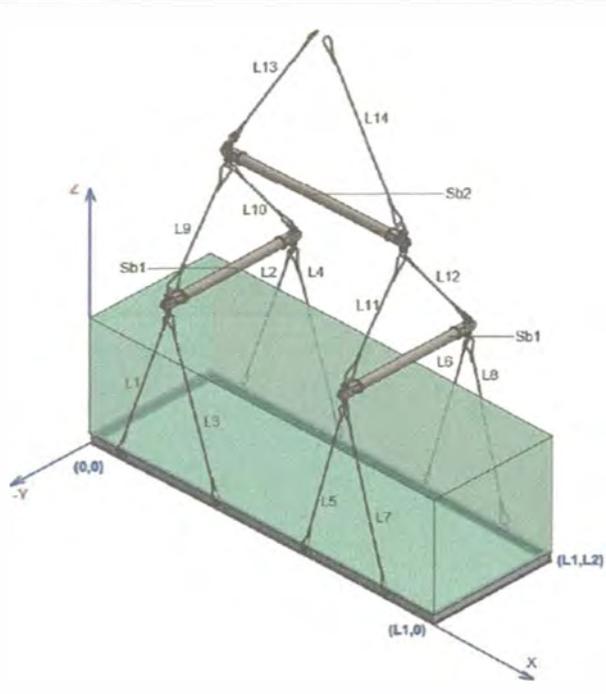


ANEXO II

**Reportes de la geometría del sistema de aparejos
por método convencional**

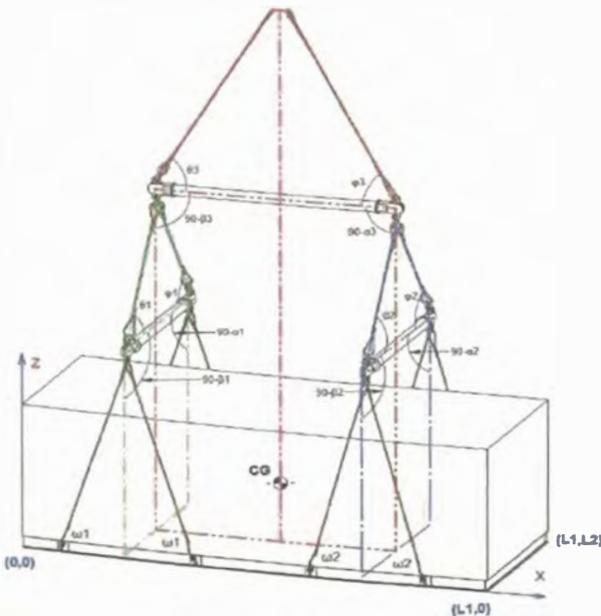
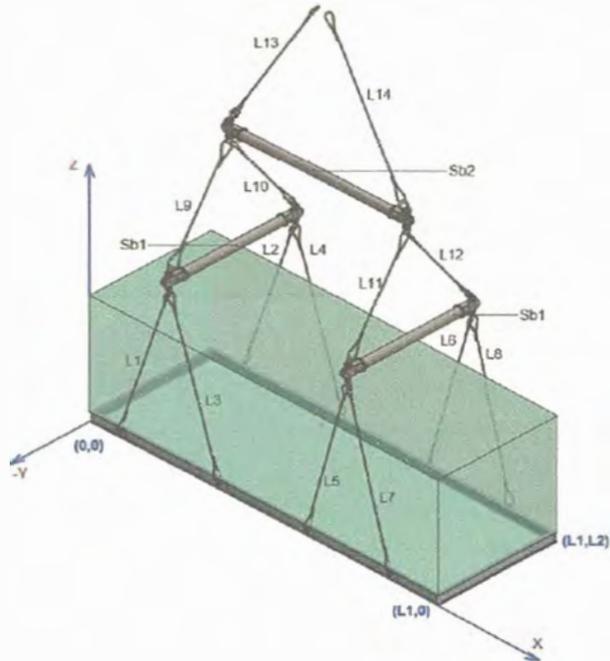


FORMATO 2: GEOMETRÍA DE SISTEMA DE APAREJOS (MÉTODO CONVENCIONAL)			
Nombre de Proyecto		Mina Justa - Sulfide Plant	
Nombre de módulo		Sala electrica 2372-SS-202_1	
Longitudes del sistema de aparejos			
Nivel 1			
L1	6000	mm	
L2	6000	mm	
L3	6000	mm	
L4	6000	mm	
L5	6000	mm	
L6	6000	mm	
L7	6000	mm	
L8	6000	mm	
Nivel 2			
L9	6000	mm	
L10	6330.88	mm	
L11	6000	mm	
L12	6330.88	mm	
Nivel 3			
L13	6185.72	mm	
L14	6000	mm	
Nivel 3			
Sb1	5400	mm	
Sb2	6650	mm	
Ángulos del sistema de aparejos			
Nivel 1			
α_1	1.714	"	
β_1	2.2679	"	
θ_1	60.8635	"	
ϕ_1	67.1182	"	
ω_1	73.6303	"	
Nivel 2			
α_2	1.7112	"	
β_2	2.2641	"	
θ_2	60.8445	"	
ϕ_2	67.0931	"	
ω_2	73.9585	"	
Nivel 3			
α_3	2.3683	"	
β_3	2.0965	"	
θ_3	60.8689	"	
ϕ_3	57.7681	"	

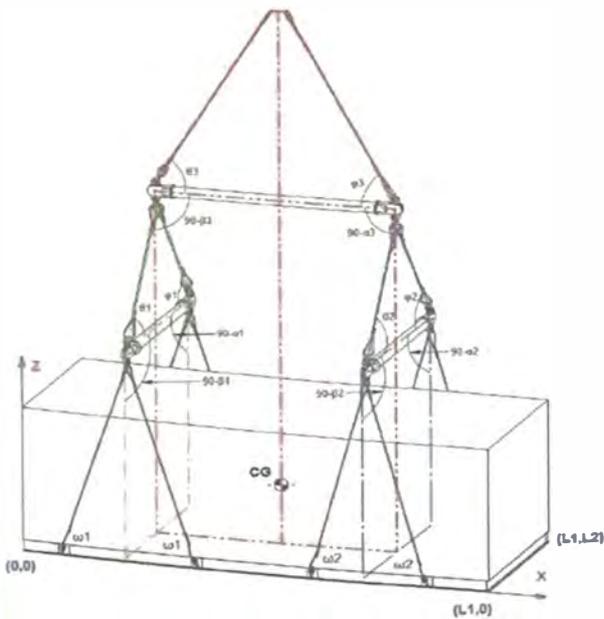
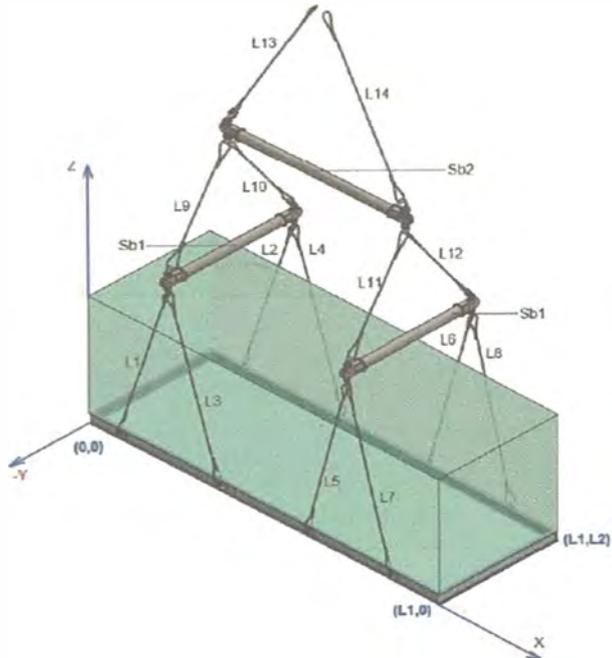


FORMATO 2: GEOMETRÍA DE SISTEMA DE APAREJOS (MÉTODO CONVENCIONAL)			
Nombre de Proyecto		Mina Justa - Sulfide Plant	
Nombre de módulo		Sala electrica 2372-SS-202_2	
Longitudes del sistema de aparejos			
Ni vel 1			
L1	6000	mm	
L2	6000	mm	
L3	6000	mm	
L4	6000	mm	
L5	6000	mm	
L6	6000	mm	
L7	6000	mm	
L8	6000	mm	
Ni vel 2			
L9	6000	mm	
L10	6162.9	mm	
L11	6000	mm	
L12	6162.9	mm	
Ni vel 3			
L13	6255.94	mm	
L14	6000	mm	
Ni vel 3			
Sb1	5400	mm	
Sb2	6650	mm	
Ángulos del sistema de aparejos			
Ni vel 1			
α_1	1.8804	°	
β_1	2.1528	°	
θ_1	62.0759	°	
ϕ_1	65.1485	°	
ω_1	71.3119	°	
Ni vel 2			
α_2	1.8653	°	
β_2	2.1355	°	
θ_2	62.0587	°	
ϕ_2	65.1288	°	
ω_2	72.7325	°	
Ni vel 3			
α_3	1.8277	°	
β_3	1.5143	°	
θ_3	61.9706	°	
ϕ_3	57.0757	°	

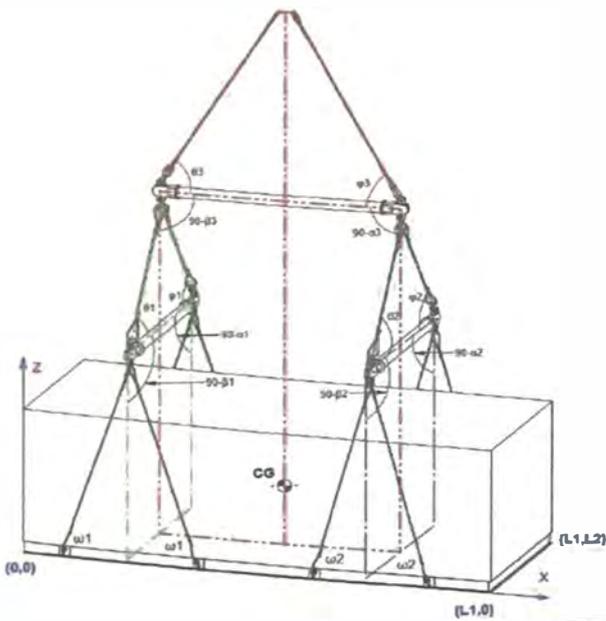
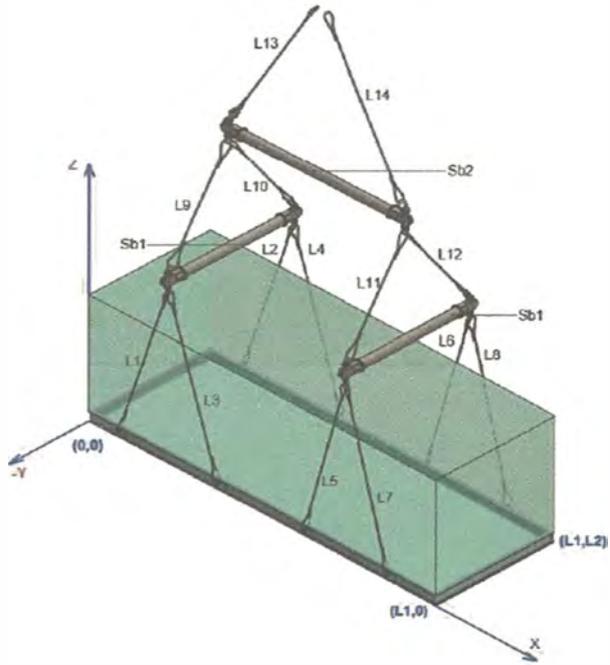
FORMATO 2: GEOMETRÍA DE SISTEMA DE APAREJOS (MÉTODO CONVENCIONAL)			
Nombre de Proyecto		Mina Justa - Sulfide Plant	
Nombre de módulo		Sala electrica 2373-SS-203_1	
Longitudes del sistema de aparejos			
Nivel 1			
L1	6000	mm	
L2	6000	mm	
L3	6000	mm	
L4	6000	mm	
L5	6000	mm	
L6	6000	mm	
L7	6000	mm	
L8	6000	mm	
Nivel 2			
L9	6000	mm	
L10	6484.88	mm	
L11	6000	mm	
L12	6484.81	mm	
Nivel 3			
L13	10919.65	mm	
L14	10000	mm	
Nivel 3			
Sb1	4400	mm	
Sb2	10100	mm	
Ángulos del sistema de aparejos			
Nivel 1			
α_1	1.42388	°	
β_1	2.70186	°	
θ_1	63.61429	°	
ϕ_1	75.34418	°	
ω_1	67.8314	°	
Nivel 2			
α_2	1.45051	°	
β_2	2.75234	°	
θ_2	63.61464	°	
ϕ_2	75.34416	°	
ω_2	65.38093	°	
Nivel 3			
α_3	0.08486	°	
β_3	0.05822	°	
θ_3	66.81098	°	
ϕ_3	58.33466	°	

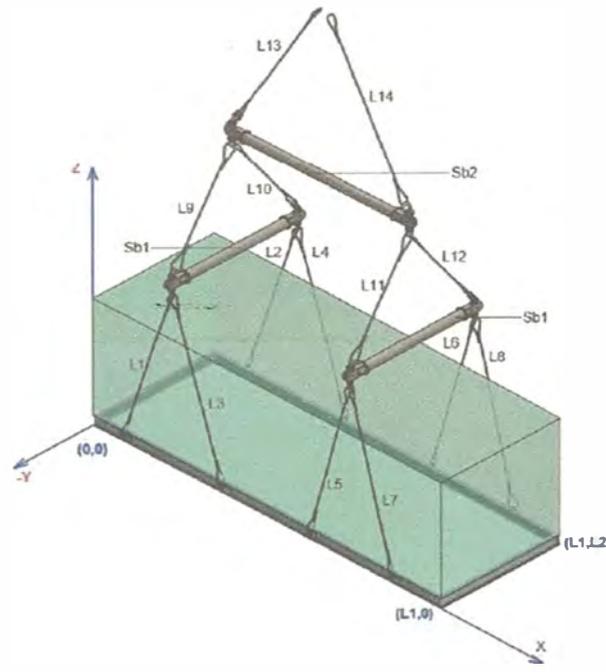
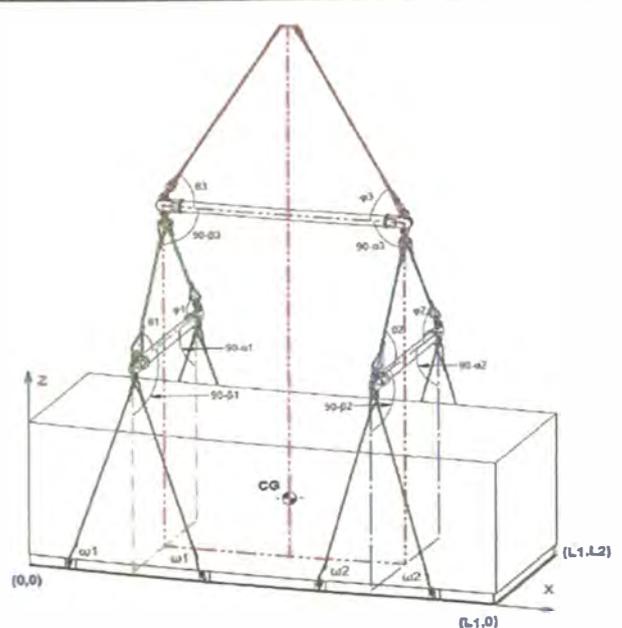
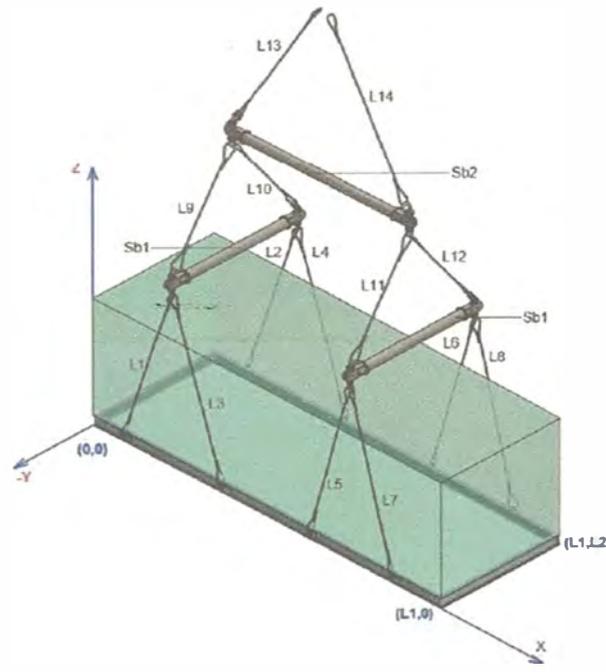
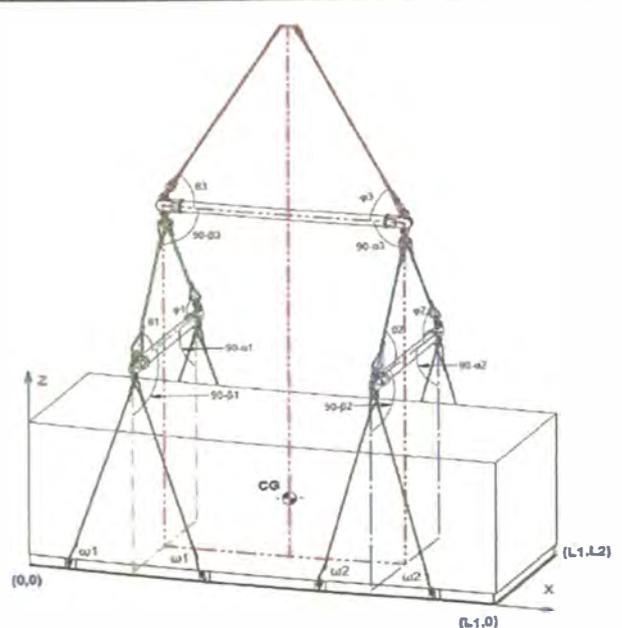
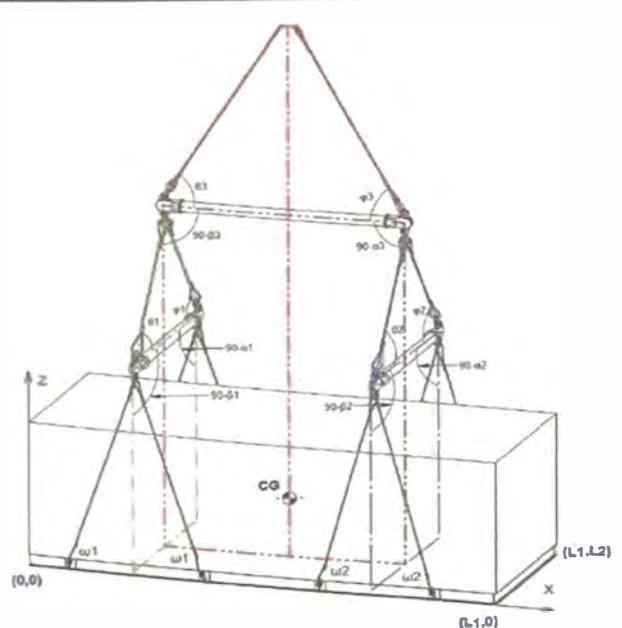


FORMATO 2: GEOMETRÍA DE SISTEMA DE APAREJOS (MÉTODO CONVENCIONAL)		
Nombre de Proyecto	Mina Justa - Sulfide Plant	
Nombre de módulo	Sala electrica 2373-SS-203_2	
Longitudes del sistema de aparejos		
Nivel 1		
L1	6000	mm
L2	6000	mm
L3	6000	mm
L4	6000	mm
L5	6000	mm
L6	6000	mm
L7	6000	mm
L8	6000	mm
Nivel 2		
L9	6000	mm
L10	6030.83	mm
L11	6000	mm
L12	6030.83	mm
Nivel 3		
L13	10246.37	mm
L14	10000	mm
Nivel 3		
Sb1	4400	mm
Sb2	10100	mm
Ángulos del sistema de aparejos		
Nivel 1		
α_1	2.1226	°
β_1	2.0435	°
θ_1	68.8491	°
ϕ_1	68.1116	°
ω_1	66.4999	°
Nivel 2		
α_2	2.1244	°
β_2	2.0452	°
θ_2	68.833	°
ϕ_2	68.0961	°
ω_2	66.3906	°
Nivel 3		
α_3	1.9415	°
β_3	1.7485	°
θ_3	62.7299	°
ϕ_3	60.226	°



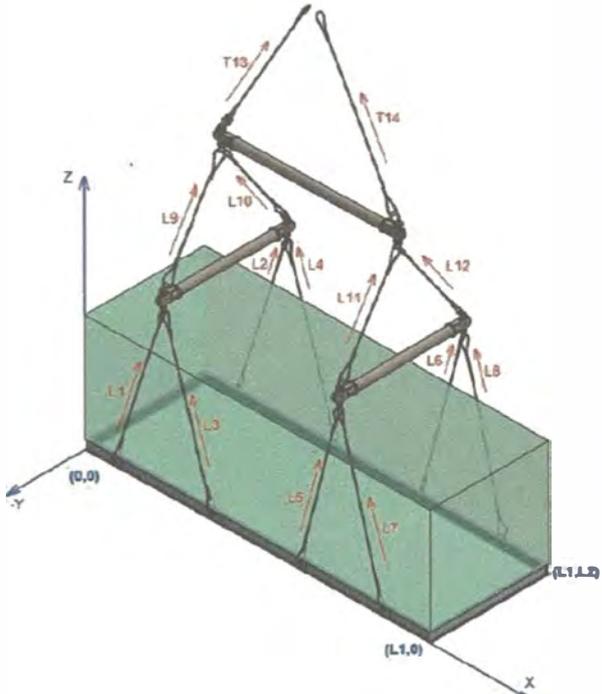
FORMATO 2: GEOMETRÍA DE SISTEMA DE APAREJOS (MÉTODO CONVENCIONAL)		
Nombre de Proyecto	Mina Justa - Sulfide Plant	
Nombre de módulo	Sala electrica 2374-SS-204	
Longitudes del sistema de aparejos		
Nivel 1		
L1	6000	mm
L2	6000	mm
L3	6000	mm
L4	6000	mm
L5	6000	mm
L6	6000	mm
L7	6000	mm
L8	6000	mm
Nivel 2		
L9	6000	mm
L10	6006.83	mm
L11	6000	mm
L12	6006.84	mm
Nivel 3		
L13	8404.39	mm
L14	8000	mm
Nivel 3		
Sb1	5400	mm
Sb2	8800	mm
Ángulos del sistema de aparejos		
Nivel 1		
α_1	2.0256	°
β_1	2.037	°
θ_1	63.2077	°
ϕ_1	63.3364	°
ω_1	70.1231	°
Nivel 2		
α_2	2.0317	°
β_2	2.0431	°
θ_2	63.2074	°
ϕ_2	63.3361	°
ω_2	69.6553	°
Nivel 3		
α_3	0.24	°
β_3	0.2088	°
θ_3	61.6169	°
ϕ_3	57.0835	°



FORMATO 2: GEOMETRÍA DE SISTEMA DE APAREJOS (MÉTODO CONVENCIONAL)				
Nombre de Proyecto		Mina Justa - Sulfide Plant		
Nombre de módulo		Sala electrica 4310-SS-407		
Longitudes del sistema de aparejos				
Nivel 1				
L1	6000	mm		
L2	6000	mm		
L3	6000	mm		
L4	6000	mm		
L5	6000	mm		
L6	6000	mm		
L7	6000	mm		
L8	6000	mm		
Nivel 2				
L9	4000	mm		
L10	4142.43	mm		
L11	4000	mm		
L12	4142.43	mm		
Nivel 3				
L13	6180.74	mm		
L14	6000	mm		
Nivel 3				
Sb1	4700	mm		
Sb2	6650	mm		
Ángulos del sistema de aparejos				
Nivel 1				
α_1	1.0575	°		
β_1	0.9521	°		
θ_1	56.1728	°		
ϕ_1	53.3409	°		
ω_1	71.8805	°		
Nivel 2				
α_2	1.0423	°		
β_2	0.9384	°		
θ_2	56.1728	°		
ϕ_2	53.3409	°		
ω_2	74.638	°		
Nivel 3				
α_3	0.0545	°		
β_3	0.0576	°		
ϕ_3	59.9664	°		

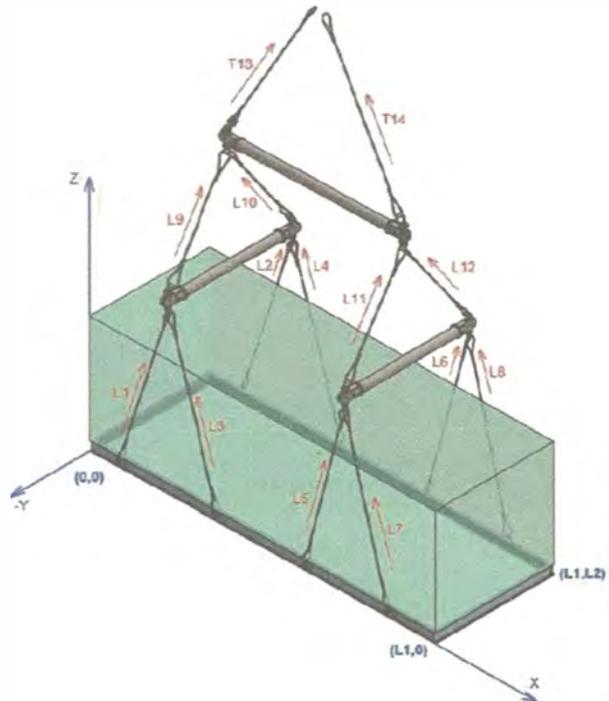
ANEXO III

Reportes de tensiones del sistema de aparejos
por método convencional

FORMATO 3: TENSIONES DE SISTEMA DE APAREJOS (MÉTODO CONVENCIONAL)		
Nombre de Proyecto	Mina Justa - Sulfide Plant	
Nombre de módulo	Sala electrica 2371-SS-201	
Tensiones del sistema de aparejos		
Nivel 1		
T1	5445.9	kg-f
T2	6633.1	kg-f
T3	5720	kg-f
T4	6994.8	kg-f
T5	5808.2	kg-f
T6	7071.7	kg-f
T7	5540	kg-f
T8	6749.1	kg-f
Nivel 2		
T9	11702	kg-f
T10	13769	kg-f
T11	11534	kg-f
T12	13512	kg-f
Nivel 3		
T13	25865	kg-f
T14	25813	kg-f
		

FORMATO 3: TENSIONES DE SISTEMA DE APAREJOS (MÉTODO CONVENCIONAL)		
Nombre de Proyecto	Mina Justa - Sulfide Plant	
Nombre de módulo	Sala electrica 2372-SS-202_1	
Tensiones del sistema de aparejos		
Nivel 1		
T1	5551	kg-f
T2	7343	kg-f
T3	4322	kg-f
T4	5716	kg-f
T5	3724	kg-f
T6	4927	kg-f
T7	4975	kg-f
T8	6584	kg-f
Nivel 2		
T9	10840	kg-f
T10	13590	kg-f
T11	9568	kg-f
T12	12000	kg-f
Nivel 3		
T13	25190	kg-f
T14	22930	kg-f

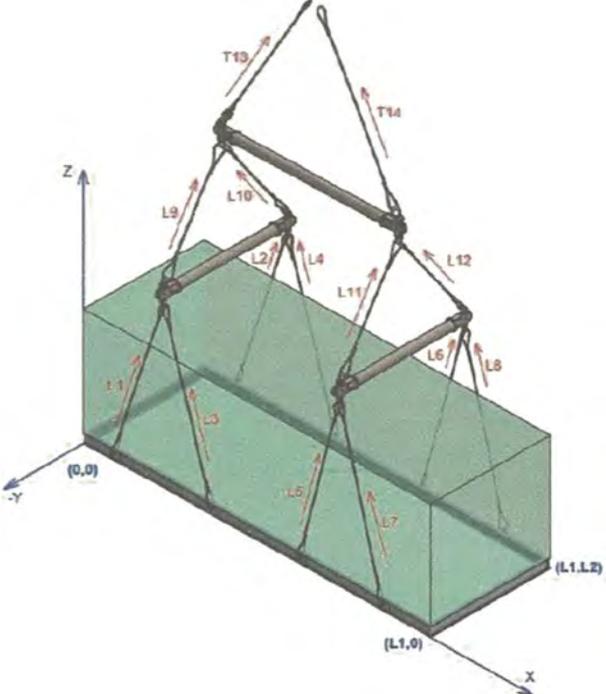
FORMATO 3: TENSIONES DE SISTEMA DE APAREJOS (MÉTODO CONVENCIONAL)		
Nombre de Proyecto	Mina Justa - Sulfide Plant	
Nombre de módulo	Sala electrica 2372-SS-202_2	
Tensiones del sistema de aparejos		
Nivel 1		
T1	5869.6	kg-f
T2	6731.2	kg-f
T3	5012.1	kg-f
T4	5700.6	kg-f
T5	4011.7	kg-f
T6	4604.9	kg-f
T7	4928.9	kg-f
T8	5657.8	kg-f
Nivel 2		
T9	11675	kg-f
T10	12969	kg-f
T11	9658.5	kg-f
T12	10795	kg-f
Nivel 3		
T13	25099	kg-f
T14	21743	kg-f



FORMATO 3: TENSIONES DE SISTEMA DE APAREJOS (MÉTODO CONVENCIONAL)		
Nombre de Proyecto	Mina Justa - Sulfide Plant	
Nombre de módulo	Sala electrica 2373-SS-203_1	
Tensiones del sistema de aparejos		
Nivel 1		
T1	4817	kg-f
T2	9077	kg-f
T3	4851	kg-f
T4	9268	kg-f
T5	3393	kg-f
T6	6505	kg-f
T7	3380	kg-f
T8	6328	kg-f
Nivel 2		
T9	9989	kg-f
T10	17550	kg-f
T11	6867	kg-f
T12	12050	kg-f
Nivel 3		
T13	28090	kg-f
T14	21060	kg-f

FORMATO 3: TENSIONES DE SISTEMA DE APAREJOS (MÉTODO CONVENCIONAL)		
Nombre de Proyecto	Mina Justa - Sulfide Plant	
Nombre de módulo	Sala electrica 2373-SS-203_2	
Tensiones del sistema de aparejos		
Nivel 1		
T1	6307	kg-f
T2	6005	kg-f
T3	5439	kg-f
T4	5278	kg-f
T5	4885	kg-f
T6	4716	kg-f
T7	5714	kg-f
T8	5455	kg-f
Nivel 2		
T9	11530	kg-f
T10	11170	kg-f
T11	10400	kg-f
T12	10050	kg-f
Nivel 3		
T13	23750	kg-f
T14	21920	kg-f

FORMATO 3: TENSIONES DE SISTEMA DE APAREJOS (MÉTODO CONVENCIONAL)		
Nombre de Proyecto	Mina Justa - Sulfide Plant	
Nombre de módulo	Sala electrica 2374-SS-204	
Tensiones del sistema de aparejos		
Nivel 1		
T1	6694	kg-f
T2	6724	kg-f
T3	6810	kg-f
T4	6936	kg-f
T5	5767	kg-f
T6	5768	kg-f
T7	5600	kg-f
T8	5583	kg-f
Nivel 2		
T9	14210	kg-f
T10	14390	kg-f
T11	11940	kg-f
T12	11900	kg-f
Nivel 3		
T13	29010	kg-f
T14	25380	kg-f

FORMATO 3: TENSIONES DE SISTEMA DE APAREJOS (MÉTODO CONVENCIONAL)		
Nombre de Proyecto	Mina Justa - Sulfide Plant	
Nombre de módulo	Sala electrica 4310-SS-407	
Tensiones del sistema de aparejos		
Nivel 1		
T1	3815	kg-f
T2	3461	kg-f
T3	3731	kg-f
T4	3384	kg-f
T5	3961	kg-f
T6	3557	kg-f
T7	4015	kg-f
T8	3611	kg-f
Nivel 2		
T9	8626	kg-f
T10	8053	kg-f
T11	9249	kg-f
T12	8612	kg-f
Nivel 3		
T13	16090	kg-f
T14	16740	kg-f
		

ANEXO IV

Reportes del tiempo de diseño por método convencional

FORMATO 4: REPORTE DE TIEMPO DE DISEÑO DE SISTEMA (MÉTODO CONVENCIONAL)					
Nombre de Proyecto		Mina Justa - Sulfide Plant			
Datos generales					
Nombre de módulo		Sala electrica 2371-SS-201			
Longitud (L1)	18	m	Peso (W)	45367	kg
Ancho (L2)	5	m	Centro gravedad x (Cx)	8.403	m
Altura (H0)	4.042	m	Centro gravedad y (Cy)	2.747	m
N° Plano referencial		JU-001-06-0201A-2371-04-DG-0011			
Actividad					Tiempo (min)
Estimación de tensiones de sistema de aparejos de módulo					12.2
Estimación de geometría de sistema de aparejos de módulo					22.5
Selección de aparejos del sistema					61.8
Total					96.5

FORMATO 4: REPORTE DE TIEMPO DE DISEÑO DE SISTEMA (MÉTODO CONVENCIONAL)

Nombre de Proyecto						Mina Justa - Sulfide Plant					
Datos generales											
Nombre de módulo						Sala electrica 2372-SS-202-1					
Longitud (L1)		14.5		m		Peso (W)		41400		kg	
Ancho (L2)		5		m		Centro gravedad x (Cx)		6.965		m	
Altura (H0)		4.048		m		Centro gravedad y (Cy)		2.848		m	
N° Plano referencial						JU-001-06-0201A-2372-04-DG-0011					
Actividad										Tiempo (min)	
Estimación de tensiones de sistema de aparejos de módulo										12.4	
Estimación de geometría de sistema de aparejos de módulo										20.7	
Selección de aparejos del sistema										66.8	
Total										99.9	

FORMATO 4: REPORTE DE TIEMPO DE DISEÑO DE SISTEMA (MÉTODO CONVENCIONAL)					
Nombre de Proyecto		Mina Justa - Sulfide Plant			
Datos generales					
Nombre de módulo		Sala electrica 2372-SS-202-2			
Longitud (L1)	15	m	Peso (W)	40406	kg
Ancho (L2)	5	m	Centro gravedad x (Cx)	6.954	m
Altura (H0)	4.048	m	Centro gravedad y (Cy)	2.669	m
N° Plano referencial		JU-001-06-0201A-2372-04-DG-0011			
Actividad					Tiempo (min)
Estimación de tensiones de sistema de aparejos de módulo					12.1
Estimación de geometría de sistema de aparejos de módulo					21.8
Selección de aparejos del sistema					58.8
Total					92.7

FORMATO 4: REPORTE DE TIEMPO DE DISEÑO DE SISTEMA (MÉTODO CONVENCIONAL)					
Nombre de Proyecto	Mina Justa - Sulfide Plant				
Datos generales					
Nombre de módulo	Sala electrica 2373-SS-203-1				
Longitud (L1)	20	m	Peso (W)	43742	kg
Ancho (L2)	4	m	Centro gravedad x (Cx)	9.023	m
Altura (H0)	4.18	m	Centro gravedad y (Cy)	2.62	m
N° Plano referencial	JU-001-06-0201A-2373-04-DG-0011				
Actividad					Tiempo (min)
Estimación de tensiones de sistema de aparejos de módulo					14
Estimación de geometría de sistema de aparejos de módulo					21.5
Selección de aparejos del sistema					70.2
Total					105.7

FORMATO 4: REPORTE DE TIEMPO DE DISEÑO DE SISTEMA (MÉTODO CONVENCIONAL)					
Nombre de Proyecto		Mina Justa - Sulfide Plant			
Datos generales					
Nombre de módulo		Sala electrica 2373-SS-203-2			
Longitud (L1)	20	m	Peso (W)	40129	kg
Ancho (L2)	4	m	Centro gravedad x (Cx)	9.98	m
Altura (H0)	4.18	m	Centro gravedad y (Cy)	1.962	m
N° Plano referencial		JU-001-06-0201A-2373-04-DG-0011			
Actividad					Tiempo (min)
Estimación de tensiones de sistema de aparejos de módulo					12.8
Estimación de geometría de sistema de aparejos de módulo					26.1
Selección de aparejos del sistema					61.5
Total					100.4

FORMATO 4: REPORTE DE TIEMPO DE DISEÑO DE SISTEMA (MÉTODO CONVENCIONAL)					
Nombre de Proyecto		Mina Justa - Sulfide Plant			
Datos generales					
Nombre de módulo		Sala electrica 2374-SS-204			
Longitud (L1)	17	m	Peso (W)	46829	kg
Ancho (L2)	5	m	Centro gravedad x (Cx)	8.144	m
Altura (H0)	4.048	m	Centro gravedad y (Cy)	2.507	m
N° Plano referencial		JU-001-06-0201A-2374-04-DG-0011			
Actividad					Tiempo (min)
Estimación de tensiones de sistema de aparejos de módulo					13
Estimación de geometría de sistema de aparejos de módulo					20
Selección de aparejos del sistema					60.6
Total					93.6

FORMATO 4: REPORTE DE TIEMPO DE DISEÑO DE SISTEMA (MÉTODO CONVENCIONAL)					
Nombre de Proyecto		Mina Justa - Sulfide Plant			
Datos generales					
Nombre de módulo		Sala electrica 4310-SS-407			
Longitud (L1)	13	m	Peso (W)	28233	kg
Ancho (L2)	4.5	m	Centro gravedad x (Cx)	6.451	m
Altura (H0)	4.048	m	Centro gravedad y (Cy)	2.132	m
N° Plano referencial		JU-001-06-0201A-4310-04-DG-0011			
Actividad					Tiempo (min)
Estimación de tensiones de sistema de aparejos de módulo					12.5
Estimación de geometría de sistema de aparejos de módulo					20.7
Selección de aparejos del sistema					59.7
Total					92.9

ANEXO V

Reportes de los resultados del algoritmo.

Formato 5: Reporte de Resultados de Algoritmo

1. Información módulo

- Nombre de módulo:

name

name = "2371-SS-201"

- Largo (m)

Largo

Largo = 18

- Ancho (m)

Ancho

Ancho = 5

- Alto (m)

H0

H0 = 4.2000

- Peso (ton)

W

W = 45.3670

- Posición del centro de gravedad (m)

B

B = 1x2

8.4030 2.7470

Nota:

Se emplea base de datos de aparejos del proyecto.

2. Reporte de geometría

- Longitudes

Tabla1

Tabla1 = 14x3 table

	ID	Longitud	Unidad
1	"L1"	6.0000	"m"
2	"L2"	6.0000	"m"
3	"L3"	6.0000	"m"
4	"L4"	6.0000	"m"
5	"L5"	6.0000	"m"
6	"L6"	6.0000	"m"
7	"L7"	6.0000	"m"
8	"L8"	6.0000	"m"
9	"L9"	6.2367	"m"
10	"L10"	6.0000	"m"
11	"L11"	6.2367	"m"
12	"L12"	6.0000	"m"
13	"L13"	10.0000	"m"
14	"L14"	10.1923	"m"

- Ángulos

Tabla2

Tabla2 = 14x3 table

	ID	Angulo	Unidad
1	"alfa 1"	1.8655	" ° "
2	"beta 1"	2.2742	" ° "
3	"theta 1"	61.5957	" ° "
4	"phi 1"	66.0748	" ° "
5	"alfa 2"	1.9251	" ° "
6	"beta 2"	2.3468	" ° "
7	"theta 2"	61.5959	" ° "
8	"phi 2"	66.0747	" ° "
9	"alfa 3"	0.6665	" ° "
10	"beta 3"	0.6554	" ° "
11	"theta 3"	61.3759	" ° "
12	"phi 3"	61.4066	" ° "
13	"omega 1"	67.3563	" ° "
14	"omega 2"	63.4273	" ° "

Tiempo de estimación de geometría (s):

Tiempo1

Tiempo1 = 3.1340

2. Reporte de tensiones

Tabla3

Tabla3 = 14x3 table

	ID	Tension	Unidad
1	"T1"	5.4361	"ton-f"
2	"T2"	6.6245	"ton-f"
3	"T3"	5.7426	"ton-f"
4	"T4"	6.9980	"ton-f"
5	"T5"	5.8036	"ton-f"
6	"T6"	7.0722	"ton-f"
7	"T7"	5.5398	"ton-f"
8	"T8"	6.7507	"ton-f"
9	"T9"	11.7206	"ton-f"
10	"T10"	13.7478	"ton-f"
11	"T11"	11.5248	"ton-f"
12	"T12"	13.5181	"ton-f"
13	"T13"	25.8254	"ton-f"
14	"T14"	25.8507	"ton-f"

Tiempo de estimación de tensiones (s):

Tiempo2

Tiempo2 = 0.0120

3. Listado de Aparejos:

Unidades de las tablas de aparejos:

Díametro (pulg.); Longitud (metros); Capacidad (Ton-f); Factor de utilización (%)

a. Balancines

Tabla4

Tabla4 = 2x4 table

	Balancín	Long	Capacidad	Cantidad
1	"Sb1"	5.4000	35	2
2	"Sb2"	10.1000	70	1

b. Aparejos nivel 1

Grilletes en oreja de izaje

Tabla5

Tabla5 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	1	8.5000	8	83.2019

Estrobos nivel 1

Tabla6

Tabla6 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	1.2500	6	15	8	47.1477

Grilletes inferior de balancín 1

Tabla7

Tabla7 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	1.5000	17	4	73.9553

c. Aparejos nivel 2

Lado simple

Grilletes superior balancín 1

Tabla8

Tabla8 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	1.7500	25	2	54.9914

Estrobos nivel 2 - Lado simple

Tabla9

Tabla9 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	1.5000	6	21	2	65.4659

Lado compuesto

Grilletes superior balancín 1

Tabla10

Tabla10 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2	35	2	33.4873

Estrobos nivel 2 - Lado compuesto

Tabla11

Tabla11 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	1.5000	6	21	2	55.8122

Grilletes de compesación

Tabla12

Tabla12 = 1x4 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad
1	"Grillete"	2.5000	55	1

Tecles

Tabla13

Tabla13 = "No se requieren tecles"

Grilletes inferior de balancín 2

Tabla14

Tabla14 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2	35	2	39.2795

d. Aparejos nivel 3

Lado simple

Grilletes superior balancín 2

Tabla15

Tabla15 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2.5000	55	1	46.9553

Estrobos nivel 3 - Lado simple

Tabla16

Tabla16 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	2.5000	10	54	1	47.8248

Lado compuesto

Grilletes superior balancín 2

Tabla17

Tabla17 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2.5000	55	1	47.0013

Estrobos nivel 3 - Lado compuesto

Tabla18

Tabla18 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	2.5000	10	54	1	47.8717

Grilletes de compesación

Tabla19

Tabla19 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2	35	1	73.7869

Tiempo de selección de aparejos

Tiempo3

Tiempo3 = 0.4580

 Final de reporte

Formato 5: Reporte de Resultados de Algoritmo

1. Información módulo

- Nombre de módulo:

name

name = "2372-SS-202_1"

- Largo (m)

Largo

Largo = 14.5000

- Ancho (m)

Ancho

Ancho = 5

- Alto (m)

H0

H0 = 4.2000

- Peso (ton)

W

W = 41.4000

- Posición del centro de gravedad (m)

B

B = 1x2
6.9650 2.8480

Nota:

Se emplea base de datos de aparejos del proyecto.

2. Reporte de geometría

- Longitudes

Tabla1

Tabla1 = 14x3 table

	ID	Longitud	Unidad
1	"L1"	6.0000	"m"
2	"L2"	6.0000	"m"
3	"L3"	6.0000	"m"
4	"L4"	6.0000	"m"
5	"L5"	6.0000	"m"
6	"L6"	6.0000	"m"
7	"L7"	6.0000	"m"
8	"L8"	6.0000	"m"
9	"L9"	6.3309	"m"
10	"L10"	6.0000	"m"
11	"L11"	6.3309	"m"
12	"L12"	6.0000	"m"
13	"L13"	6.0000	"m"
14	"L14"	6.1857	"m"

- Ángulos

Tabla2

Tabla2 = 14x3 table

	ID	Angulo	Unidad
1	"alfa 1"	1.7140	" ° "
2	"beta 1"	2.2679	" ° "
3	"theta 1"	60.9324	" ° "
4	"phi 1"	67.2093	" ° "
5	"alfa 2"	1.7112	" ° "
6	"beta 2"	2.2641	" ° "
7	"theta 2"	60.9324	" ° "
8	"phi 2"	67.2093	" ° "
9	"alfa 3"	2.3683	" ° "
10	"beta 3"	2.0966	" ° "
11	"theta 3"	60.8689	" ° "
12	"phi 3"	57.7681	" ° "
13	"omega 1"	73.6303	" ° "
14	"omega 2"	73.9585	" ° "

Tiempo de estimación de geometría (s):

Tiempo1

Tiempo1 = 2.0150

2. Reporte de tensiones

Tabla3

Tabla3 = 14x3 table

	ID	Tension	Unidad
1	"T1"	5.5451	"lon-f"
2	"T2"	7.3333	"lon-f"
3	"T3"	4.3161	"lon-f"
4	"T4"	5.7080	"lon-f"
5	"T5"	3.7304	"lon-f"
6	"T6"	4.9333	"lon-f"
7	"T7"	4.9838	"lon-f"
8	"T8"	6.5910	"lon-f"
9	"T9"	10.8237	"lon-f"
10	"T10"	13.5752	"lon-f"
11	"T11"	9.5824	"lon-f"
12	"T12"	12.0184	"lon-f"
13	"T13"	25.1581	"lon-f"
14	"T14"	22.9629	"lon-f"

Tiempo de estimación de tensiones (s):

Tiempo2

Tiempo2 = 0.0060

3. Listado de Aparejos:

Unidades de las tablas de aparejos:

Díametro (pulg.); Longitud (metros); Capacidad (Ton-f); Factor de utilización (%)

a. Balancines

Tabla4

Tabla4 = 2x4 table

	Balancin	Long	Capacidad	Cantidad
1	"Sb1"	5.4000	35	2
2	"Sb2"	6.6500	70	1

b. Aparejos nivel 1

Grilletes en oreja de izaje

Tabla5

Tabla5 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	1.2500	12	8	61.1105

Estrobos nivel 1

Tabla6

Tabla6 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	1.2500	6	15	8	48.8884

Grilletes inferior de balancín 1

Tabla7

Tabla7 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	1.5000	17	4	73.6035

c. Aparejos nivel 2

Lado simple

Grilletes superior balancín 1

Tabla8

Tabla8 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	1.7500	25	2	54.3010

Estrobos nivel 2 - Lado simple

Tabla9

Tabla9 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	1.5000	6	21	2	64.6440

Lado compuesto

Grilletes superior balancín 1

Tabla10

Tabla10 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2	35	2	30.9247

Estrobo nivel 2 - Lado compuesto

Tabla11

Tabla11 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	1.5000	6	21	2	51.5412

Grilletes de compesación

Tabla12

Tabla12 = 2x4 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad
1	"Grillete"	1.5000	17	1
2	"Grillete"	1.7500	25	1

Tecles

Tabla13

Tabla13 = "No se requieren tecles"

Grilletes inferior de balancín 2

Tabla14

Tabla14 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2	35	2	38.7864

d. Aparejos nivel 3

Lado simple

Grilletes superior balancín 2

Tabla15

Tabla15 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2.5000	55	1	45.7420

Formato 5: Reporte de Resultados de Algoritmo

1. Información módulo

- Nombre de módulo:

name

name = "2372-SS-202_2"

- Largo (m)

Largo

Largo = 15

- Ancho (m)

Ancho

Ancho = 5

- Alto (m)

H0

H0 = 4.2000

- Peso (ton)

W

W = 40.4060

- Posición del centro de gravedad (m)

B

B = 1x2

6.9540 2.6690

Nota:

Se emplea base de datos de aparejos del proyecto.

2. Reporte de geometría

- Longitudes

Tabla1

Tabla1 = 14x3 table

	ID	Longitud	Unidad
1	"L1"	6.0000	"m"
2	"L2"	6.0000	"m"
3	"L3"	6.0000	"m"
4	"L4"	6.0000	"m"
5	"L5"	6.0000	"m"
6	"L6"	6.0000	"m"
7	"L7"	6.0000	"m"
8	"L8"	6.0000	"m"
9	"L9"	6.1629	"m"
10	"L10"	6.0000	"m"
11	"L11"	6.1629	"m"
12	"L12"	6.0000	"m"
13	"L13"	6.0000	"m"
14	"L14"	6.2559	"m"

- Ángulos

Tabla2

Tabla2 = 14x3 table

	ID	Angulo	Unidad
1	"alfa 1"	1.8804	" ° "
2	"beta 1"	2.1528	" ° "
3	"theta 1"	62.1137	" ° "
4	"phi 1"	65.1917	" ° "
5	"alfa 2"	1.8653	" ° "
6	"beta 2"	2.1355	" ° "
7	"theta 2"	62.1137	" ° "
8	"phi 2"	65.1917	" ° "
9	"alfa 3"	1.8277	" ° "
10	"beta 3"	1.5143	" ° "

Tiempo de estimación de geometría (s):

Tiempo1

Tiempo1 = 2.2080

2. Reporte de tensiones

Tabla3

Tabla3 = 14x3 table

	ID	Tension	Unidad
1	"T1"	5.8677	"ton-f"
2	"T2"	6.7161	"ton-f"
3	"T3"	5.0170	"ton-f"
4	"T4"	5.7424	"ton-f"
5	"T5"	4.0132	"ton-f"
6	"T6"	4.5936	"ton-f"
7	"T7"	4.9315	"ton-f"
8	"T8"	5.6446	"ton-f"
9	"T9"	11.6612	"ton-f"
10	"T10"	12.9990	"ton-f"

Tiempo de estimación de tensiones (s):

Tiempo2

Tiempo2 = 0.0090

3. Listado de Aparejos:

Unidades de las tablas de aparejos:

Díametro (pulg.); Longitud (metros); Capacidad (Ton-f); Factor de utilización (%)

a. Balancines

Tabla4

Tabla4 = 2x4 table

	Balancin	Long	Capacidad	Cantidad
1	"Sb1"	5.4000	35	2
2	"Sb2"	6.6500	70	1

b. Aparejos nivel 1

Grilletes en oreja de izaje

Tabla5

Tabla5 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	1	8.5000	8	79.0130

Estrobos nivel 1

Tabla6

Tabla6 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	1.2500	6	15	8	44.7740

Grilletes inferior de balancín 1

Tabla7

Tabla7 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	1.5000	17	4	69.4217

c. Aparejos nivel 2

Lado simple

Grilletes superior balancín 1

Tabla8

Tabla8 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2	35	2	37.1401

Estrobos nivel 2 - Lado simple

Tabla9

Tabla9 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	1.5000	6	21	2	61.9002

Lado compuesto

Grilletes superior balancín 1

Tabla10

Tabla10 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	1.7500	25	2	46.6450

Estrobos nivel 2 - Lado compuesto

Tabla11

Tabla11 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	1.5000	6	21	2	55.5297

Grilletes de compesación

Tabla12

Tabla12 = 1x4 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad
1	"Grillete"	1.5000	17	1

Tecles

Tabla13

Tabla13 = "No se requieren tecles"

Grilletes inferior de balancín 2

Tabla14

Tabla14 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2	35	2	37.1401

d. Aparejos nivel 3

Lado simple

Grilletes superior balancín 2

Tabla15

Tabla15 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	3	85	1	29.5547

Estrobos nivel 3 - Lado simple

Tabla16

Tabla16 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	2	6	37	1	67.8959

Lado compuesto
Grilletes superior balancín 2**Tabla17**

Tabla17 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2.5000	55	1	39.4900

Estrobo nivel 3 - Lado compuesto**Tabla18**

Tabla18 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	2	6	37	1	58.7013

Grilletes de compensación**Tabla19**

Tabla19 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2	35	1	71.7757

Tiempo de selección de aparejos
Tiempo3

Tiempo3 = 0.2660

Final de reporte

Formato 5: Reporte de Resultados de Algoritmo

1. Información módulo

- Nombre de módulo:

name

name = "2373-SS-203_1"

- Largo (m)

Largo

Largo = 20

- Ancho (m)

Ancho

Ancho = 4

- Alto (m)

H0

H0 = 4.2000

- Peso (ton)

W

W = 43.7420

- Posición del centro de gravedad (m)

B

B = 1×2

9.0230 2.6200

Nota:

Se emplea base de datos de aparejos del proyecto.

2. Reporte de geometría

- Longitudes

Tabla1

Tabla1 = 14x3 table

	ID	Longitud	Unidad
1	"L1"	6.0000	"m"
2	"L2"	6.0000	"m"
3	"L3"	6.0000	"m"
4	"L4"	6.0000	"m"
5	"L5"	6.0000	"m"
6	"L6"	6.0000	"m"
7	"L7"	6.0000	"m"
8	"L8"	6.0000	"m"
9	"L9"	6.4848	"m"
10	"L10"	6.0000	"m"
11	"L11"	6.4849	"m"
12	"L12"	6.0000	"m"
13	"L13"	10.0000	"m"
14	"L14"	10.9196	"m"

- Ángulos

Tabla2

Tabla2 = 14x3 table

	ID	Angulo	Unidad
1	"alfa 1"	1.4239	" ° "
2	"beta 1"	2.7019	" ° "
3	"theta 1"	63.6143	" ° "
4	"phi 1"	75.3442	" ° "
5	"alfa 2"	1.4505	" ° "
6	"beta 2"	2.7523	" ° "
7	"theta 2"	63.6146	" ° "
8	"phi 2"	75.3442	" ° "
9	"alfa 3"	0.0818	" ° "
10	"beta 3"	0.0562	" ° "
11	"theta 3"	66.8122	" ° "
12	"phi 3"	58.3363	" ° "
13	"omega 1"	67.8314	" ° "
14	"omega 2"	65.3809	" ° "

Tiempo de estimación de geometría (s):

Tiempo1

Tiempo1 = 2.0980

2. Reporte de tensiones

Tabla3

Tabla3 = 14x3 table

	ID	Tension	Unidad
1	"T1"	4.8254	"ton-f"
2	"T2"	9.1462	"ton-f"
3	"T3"	4.8487	"ton-f"
4	"T4"	9.1904	"ton-f"
5	"T5"	3.3971	"ton-f"
6	"T6"	6.4387	"ton-f"
7	"T7"	3.3760	"ton-f"
8	"T8"	6.3987	"ton-f"
9	"T9"	9.9897	"ton-f"
10	"T10"	17.5468	"ton-f"
11	"T11"	6.8656	"ton-f"
12	"T12"	12.0591	"ton-f"
13	"T13"	28.0820	"ton-f"
14	"T14"	21.0640	"ton-f"

Tiempo de estimación de tensiones (s):

Tiempo2

Tiempo2 = 0.0070

3. Listado de Aparejos:

Unidades de las tablas de aparejos:

Díametro (pulg.); Longitud (metros); Capacidad (Ton-f); Factor de utilización (%)

a. Balancines

Tabla4

Tabla4 = 2x4 table

	Balancin	Long	Capacidad	Cantidad
1	"Sb1"	4.4000	35	2
2	"Sb2"	10.1000	70	1

b. Aparejos nivel 1

Grilletes en oreja de izaje

Tabla5

Tabla5 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	1.2500	12	8	76.5864

Estrobos nivel 1

Tabla6

Tabla6 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	1.2500	6	15	8	61.2691

Grilletes inferior de balancín 1

Tabla7

Tabla7 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	1.7500	25	4	67.9244

c. Aparejos nivel 2

Lado simple

Grilletes superior balancín 1

Tabla8

Tabla8 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2	35	2	50.1337

Estrobos nivel 2 - Lado simple

Tabla9

Tabla9 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	1.5000	6	21	2	83.5561

Lado compuesto

Grilletes superior balancín 1

Tabla10

Tabla10 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2	35	2	28.5420

Estrobos nivel 2 - Lado compuesto

Tabla11

Tabla11 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	1.5000	6	21	2	47.5701

Grilletes de compesación

Tabla12

Tabla12 = 2x4 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad
1	"Grillete"	1.5000	17	2
2	"Grillete"	2.0000	35	1

Teclas

Tabla13

Tabla13 = "No se requieren teclas"

Grilletes inferior de balancín 2

Tabla14

Tabla14 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2.5000	55	2	31.9032

d. Aparejos nivel 3

Lado simple

Grilletes superior balancín 2

Tabla15

Tabla15 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	3	85	1	33.0377

Estrobos nivel 3 - Lado simple

Tabla16

Tabla16 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	2.5000	10	54	1	52.0037

Lado compuesto

Grilletes superior balancín 2

Tabla17

Tabla17 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2.5000	55	1	38.2981

Estrobos nivel 3 - Lado compuesto

Tabla18

Tabla18 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	2.5000	10	54	1	39.0073

Grilletes de compesación

Tabla19

Tabla19 = 2x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2	35	1	80.2343
2	"Grillete"	3	85	2	33.0377

Tiempo de selección de aparejos

Tiempo3

Tiempo3 = 0.6850

Final de reporte

Formato 5: Reporte de Resultados de Algoritmo

1. Información módulo

- Nombre de módulo:

name

name = "2373-SS-203_2"

- Largo (m)

Largo

Largo = 20

- Ancho (m)

Ancho

Ancho = 4

- Alto (m)

H0

H0 = 4.2000

- Peso (ton)

W

W = 40.1290

- Posición del centro de gravedad (m)

B

B = 1x2

9.9800 1.9620

Nota:

Se emplea base de datos de aparejos del proyecto.

2. Reporte de geometría

- Longitudes

Tabla1

Tabla1 = 14x3 table

	ID	Longitud	Unidad
1	"L1"	6.0000	"m"
2	"L2"	6.0000	"m"
3	"L3"	6.0000	"m"
4	"L4"	6.0000	"m"
5	"L5"	6.0000	"m"
6	"L6"	6.0000	"m"
7	"L7"	6.0000	"m"
8	"L8"	6.0000	"m"
9	"L9"	6.0000	"m"
10	"L10"	6.0308	"m"

- Ángulos

Tabla2

Tabla2 = 14x3 table

	ID	Angulo	Unidad
1	"alfa 1"	2.1226	" ° "
2	"beta 1"	2.0435	" ° "
3	"theta 1"	68.9182	" ° "
4	"phi 1"	68.1781	" ° "
5	"alfa 2"	2.1244	" ° "
6	"beta 2"	2.0452	" ° "
7	"theta 2"	68.9182	" ° "
8	"phi 2"	68.1781	" ° "
9	"alfa 3"	1.9415	" ° "
10	"beta 3"	1.7485	" ° "

Tiempo de estimación de geometría (s):

Tiempo1

Tiempo1 = 2.3880

2. Reporte de tensiones

Tabla3

Tabla3 = 14x3 table

	ID	Tension	Unidad
1	"T1"	6.2810	"ton-f"
2	"T2"	6.0474	"ton-f"
3	"T3"	5.4569	"ton-f"
4	"T4"	5.2539	"ton-f"
5	"T5"	4.8795	"ton-f"
6	"T6"	4.6980	"ton-f"
7	"T7"	5.6999	"ton-f"
8	"T8"	5.4880	"ton-f"
9	"T9"	11.5345	"ton-f"
10	"T10"	11.1615	"ton-f"

Tiempo de estimación de tensiones (s):

Tiempo2

Tiempo2 = 0.0060

3. Listado de Aparejos:

Unidades de las tablas de aparejos:

Díametro (pulg.); Longitud (metros); Capacidad (Ton-f); Factor de utilización (%)

a. Balancines

Tabla4

Tabla4 = 2x4 table

	Balancin	Long	Capacidad	Cantidad
1	"Sb1"	4.4000	35	2
2	"Sb2"	10.1000	70	1

b. Aparejos nivel 1

Grilletes en oreja de izaje

Tabla5

Tabla5 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	1	8.5000	8	73.8940

Estrobos nivel 1

Tabla6

Tabla6 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	1.2500	6	15	8	41.8733

Grilletes inferior de balancín 1

Tabla7

Tabla7 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	1.5000	17	4	63.3197

c. Aparejos nivel 2

Lado simple

Grilletes superior balancín 1

Tabla8

Tabla8 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2	35	2	32.9558

Estrobos nivel 2 - Lado simple

Tabla9

Tabla9 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	1.5000	6	21	2	54.9264

Lado compuesto

Grilletes superior balancín 1

Tabla10

Tabla10 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	1.7500	25	2	44.6460

Estrobos nivel 2 - Lado compuesto

Tabla11

Tabla11 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	1.5000	6	21	2	53.1500

Grilletes de compensación

Tabla12

Tabla12 = "No se requieren grilletes de compensación"

Tecles

Tabla13

Tabla13 = "No se requieren tecles"

Grilletes inferior de balancín 2

Tabla14

Tabla14 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2	35	2	32.9558

d. Aparejos nivel 3

Lado simple

Grilletes superior balancín 2

Tabla15

Tabla15 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	3	85	1	27.9396

Estrobos nivel 3 - Lado simple

Tabla16

Tabla16 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	2.5000	10	54	1	43.9790

Lado compuesto

Grilletes superior balancín 2

Tabla17

Tabla17 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2.5000	55	1	39.8409

Estrobo nivel 3 - Lado compuesto

Tabla18

Tabla18 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	2.5000	10	54	1	40.5787

Grilletes de compesación

Tabla19

Tabla19 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2	35	1	67.8533

Tiempo de selección de aparejos

Tiempo3

Tiempo3 = 0.2530

 Final de reporte

Formato 5: Reporte de Resultados de Algoritmo

1. Información módulo

- Nombre de módulo:

name

name = "2374-SS-204"

- Largo (m)

Largo

Largo = 17

- Ancho (m)

Ancho

Ancho = 5

- Alto (m)

H0

H0 = 4.2000

- Peso (ton)

W

W = 46.8260

- Posición del centro de gravedad (m)

B

B = 1x2

8.1440 2.5070

Nota:

Se emplea base de datos de aparejos del proyecto.

2. Reporte de geometría

- Longitudes

Tabla1

Tabla1 = 14x3 table

	ID	Longitud	Unidad
1	"L1"	6.0000	"m"
2	"L2"	6.0000	"m"
3	"L3"	6.0000	"m"
4	"L4"	6.0000	"m"
5	"L5"	6.0000	"m"
6	"L6"	6.0000	"m"
7	"L7"	6.0000	"m"
8	"L8"	6.0000	"m"
9	"L9"	6.0068	"m"
10	"L10"	6.0000	"m"
11	"L11"	6.0068	"m"
12	"L12"	6.0000	"m"
13	"L13"	8.0000	"m"
14	"L14"	8.4048	"m"

- Ángulos

Tabla2

Tabla2 = 14x3 table

	ID	Angulo	Unidad
1	"alfa 1"	2.0256	" ° "
2	"beta 1"	2.0370	" ° "
3	"theta 1"	63.2084	" ° "
4	"phi 1"	63.3371	" ° "
5	"alfa 2"	2.0317	" ° "
6	"beta 2"	2.0431	" ° "
7	"theta 2"	63.2084	" ° "
8	"phi 2"	63.3371	" ° "
9	"alfa 3"	0.2448	" ° "
10	"beta 3"	0.2038	" ° "
11	"theta 3"	61.6205	" ° "
12	"phi 3"	57.0819	" ° "
13	"omega 1"	70.1231	" ° "
14	"omega 2"	69.6553	" ° "

Tiempo de estimación de geometría (s):

Tiempo1

Tiempo1 = 2.4260

2. Reporte de tensiones

Tabla3

Tabla3 = 14x3 table

	ID	Tension	Unidad
1	"T1"	6.7111	"ton-f"
2	"T2"	6.7487	"ton-f"
3	"T3"	6.8445	"ton-f"
4	"T4"	6.8828	"ton-f"
5	"T5"	5.7254	"ton-f"
6	"T6"	5.7575	"ton-f"
7	"T7"	5.5950	"ton-f"
8	"T8"	5.6263	"ton-f"
9	"T9"	14.2722	"ton-f"
10	"T10"	14.3360	"ton-f"
11	"T11"	11.8833	"ton-f"
12	"T12"	11.9364	"ton-f"
13	"T13"	29.0119	"ton-f"
14	"T14"	25.3747	"ton-f"

Tiempo de estimación de tensiones (s):

Tiempo2

Tiempo2 = 0.0080

3. Listado de Aparejos:

Unidades de las tablas de aparejos:

Díametro (pulg.); Longitud (metros); Capacidad (Ton-f); Factor de utilización (%)

a. Balancines

Tabla4

Tabla4 = 2x4 table

	Balancín	Long	Capacidad	Cantidad
1	"Sb1"	5.4000	35	2
2	"Sb2"	8.8000	70	1

b. Aparejos nivel 1

Grilletes en oreja de izaje

Tabla5

Tabla5 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	1	8.5000	8	80.9747

Estrobos nivel 1

Tabla6

Tabla6 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	1.2500	6	15	8	45.8857

Grilletes inferior de balancín 1

Tabla7

Tabla7 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	1.5000	17	4	75.4087

c. Aparejos nivel 2

Lado simple

Grilletes superior balancín 1

Tabla8

Tabla8 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	1.7500	25	2	57.3440

Estrobos nivel 2 - Lado simple

Tabla9

Tabla9 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	1.5000	6	21	2	68.2667

Lado compuesto

Grilletes superior balancín 1

Tabla10

Tabla10 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	1.7500	25	2	57.0888

Estrobos nivel 2 - Lado compuesto

Tabla11

Tabla11 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	1.5000	6	21	2	67.9628

Grilletes de compesación

Tabla12

Tabla12 = "No se requieren grilletes de compesación"

Tecles

Tabla13

Tabla13 = "No se requieren tecles"

Grilletes inferior de balancín 2

Tabla14

Tabla14 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2	35	2	40.9600

d. Aparejos nivel 3

Lado simple

Grilletes superior balancín 2

Tabla15

Tabla15 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2.5000	55	1	52.7489

Estrobos nivel 3 - Lado simple

Tabla16

Tabla16 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	2.5000	8	54	1	53.7258

Lado compuesto
Grilletes superior balancín 2

Tabla17

Tabla17 = 1x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	3	85	1	29.8526

Estrobos nivel 3 - Lado compuesto

Tabla18

Tabla18 = 1x6 table

	ID	Diametro	Long	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Estrobo"	2.5000	8	54	1	46.9902

Grilletes de compesación

Tabla19

Tabla19 = 2x5 table

	ID	Diametro	Capacidad	Cantidad	Fu
1	"Grillete"	2.0000	35	1	82.8912
2	"Grillete"	2.5000	55	1	52.7489

Tiempo de selección de aparejos

Tiempo3

Tiempo3 = 0.3050

Final de reporte

ANEXO VI

Reportes de la base de datos de aparejos de izaje del proyecto de construcción.

FORMATO 6: Base datos de aparejos real				
Nombre de Proyecto		Mina Justa - Sulfide Plant		
Tipos de Aparejós				
Estrobos				
Item	Diam (pulg)	Long (m)	Capacidad Vert. (t)	Cantidad (und)
1	1	4	9.8	4
2	1	6	9.8	4
3	1	10	9.8	4
4	1	12	9.8	4
5	1.25	6	15	8
6	1.5	4	21	4
7	1.5	4.5	21	2
8	1.5	6	21	4
9	1.5	8	21	4
10	1.5	10	21	4
11	2	6	37	4
12	2.5	8	54	4
13	2.5	10	54	2
14				

Grilletes			
Item	Diam (pulg)	Capacidad (t)	Cantidad (und)
1	1	8.5	24
2	1.25	12	23
3	1.5	17	28
4	1.75	25	4
5	2	35	8
6	2.5	55	12
7	3	85	4

Balancines			
Item	Long (m)	Capacidad (t)	Capacidad (m)
1	6	150	1
2	4	130	1
3	4.3	35	2
4	4.7	35	2
5	5.3	35	2
6	6.65	70	1
7	8.8	70	1
8	10.1	70	1
9			

FORMATO 6: Base de datos de aparos real				
Nombre de Proyecto		Mina Justa - Sulfide Plant		
Tecles				
Item	Capacidad Vert. (t)	Long 1 (m)	Long 2 (m)	Cantidad (und)
1	10	0.8	5.4	2
2	20	0.8	5.4	2
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				

