



Recibido: 23, diciembre 2025

Aceptado: 14, enero 2026

Publicado: 23, enero 2026

Como citar: F. Echeverría et al., "Diseño y validación estructural de un sistema mecánico de elevación para columnas tipo reticular utilizando análisis por elementos finitos", *ARKSIS-Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 19-32, Jan. 2026, doi: 10.63957/arksis.v1i1.0004

Diseño y validación estructural de un sistema mecánico de elevación para columnas tipo reticular utilizando análisis por elementos finitos

Structural design and validation of a mechanical lifting system for truss-type columns using finite element analysis

Francisco Echeverría^{ID}^a, Gloria Vanegas-Zabala^{ID}^a, Pablo Amancha-Proaño^{ID}^a, Marco Pilco-Núñez^{ID}^a

^aCarrera de Diseño Industrial, Escuela de Hábitat, Infraestructura y Creatividad, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ambato 180207, Ecuador.

Autor de correspondencia: fecheverria@pucesa.edu.ec

Creative Commons CC BY 4.0



Resumen

La instalación de escenarios modulares con estructuras de tipo reticular requiere levantar estructuras interconectadas que pesan hasta 175 kg, por medio de un esfuerzo manual, lo que genera riesgos musculoesqueléticos para el personal técnico. Este estudio presenta el diseño y la validación mediante elementos finitos en el software de Diseño Asistido por Computadora (CAD) para establecer el soporte estructural de un sistema mecánico de elevación adaptable a columnas reticulares de 12 m de altura, destinado a reducir el esfuerzo físico y mejorar la seguridad laboral. Se desarrolló una metodología basada en diseño de producto (Lobach) y análisis estructural computacional mediante el método de elementos finitos. El prototipo combina un motor eléctrico AC de 500 kg, poleas y una estructura de acero, que en conjunto permiten una elevación controlada de las estructuras. Los resultados de la simulación muestran un desplazamiento máximo de 3,81 mm y esfuerzos de 82,3 MPa, valores dentro del límite elástico del material, lo que garantiza la integridad estructural del sistema. Por tanto, este dispositivo reduce la cantidad de operadores de 4 a 1, eliminando la manipulación manual de cargas pesadas. Además, su bajo costo de producción representa una opción económica para pequeñas empresas del sector de eventos. Finalmente, a partir de los resultados se destaca que el sistema es seguro, ergonómico y viable para su implementación industrial.

Palabras Clave: Análisis por elementos finitos, columna reticular, elevación mecánica, ergonomía industrial, diseño industrial, CAD.

Abstract

The assembly of modular stages with lattice structures requires lifting interconnected structures weighing up to 175 kg by hand, which poses musculoskeletal risks for technical personnel. This paper presents the design and validation using finite elements in Computer-Aided Design (CAD) software to establish the structural support of a mechanical lifting system adaptable to 12 m high lattice columns, intended to reduce physical effort and improve occupational safety. A methodology based on product design (Lobach) and computational structural analysis using the finite element method was developed. The prototype combines a 500 kg AC electric motor, pulleys, and a steel structure, which together allow for controlled lifting of the structures. The simulation results show a maximum displacement of 3.81 mm and stresses of 82.3 MPa, values within the elastic range of the material, ensuring the structural integrity of the system. Therefore, this device reduces the number of operators from 4 to 1, eliminating the manual handling of heavy loads. In addition, its low production cost represents an economical option for small businesses in the events sector. Finally, the results highlight that the system is safe, ergonomic, and viable for industrial implementation.

Keywords: Finite element analysis, truss columns, mechanical lifting system, occupational ergonomics, mechanical design, CAD.

1. Introducción

Las estructuras tipo reticular se utilizan de forma generalizada en sistemas modulares para eventos debido a su elevada relación resistencia-peso y a su facilidad de montaje, características que las convierten en elementos indispensables dentro de la industria del entretenimiento y de la construcción temporal [1],[2]. No obstante, el levantamiento manual de columnas reticulares con longitudes que alcanzan los 12 m y pesos que superan los 150 kg, representan un riesgo significativo para la salud ocupacional, ya que este tipo de manipulación se asocia con lesiones musculoesqueléticas, fatiga física y accidentes derivados de pérdidas de control [3]. En el caso analizado, las columnas reticulares pesan aproximadamente 175 kg y requieren la intervención simultánea de tres o cuatro operadores para lograr su elevación inicial.

Informes recientes de la Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo (EU-OSHA) muestran que los trastornos musculoesqueléticos siguen siendo el problema de salud laboral más común en la Unión Europea, afectando a más del 60% de las actividades que implican levantar cargas o mantener posturas incómodas [4]. De manera similar, investigaciones en América Latina han señalado que el levantamiento manual repetitivo es el principal factor de riesgo para lesiones lumbares en trabajadores del sector industrial y del entretenimiento [5],[6].

Aunque existe oferta comercial de torres elevadoras basadas en sistemas hidráulicos o mecánicos, el costo de adquisición supera en muchos casos los USD 8000, lo cual limita su implementación en empresas pequeñas dedicadas al montaje de estructuras temporales. Esta situación evidencia una brecha tecnológica que afecta la seguridad de los trabajadores y la eficiencia operativa del sector, que aún recurre a métodos manuales para la manipulación de elementos pesados.

En consecuencia, el desarrollo de sistemas mecánicos de elevación de bajo costo se ha convertido en una línea de investigación relevante dentro del diseño mecánico y la ingeniería aplicada [7]. Estudios recientes han demostrado que estructuras reforzadas y accionamientos eléctricos permiten reducir las cargas físicas sobre los operadores sin comprometer la estabilidad estructural de los elementos en elevación [8], mientras que los análisis mediante el método de elementos finitos (FEA) permiten predecir y optimizar su comportamiento mecánico antes de la fabricación [9].

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo diseñar y validar un sistema mecánico de elevación adaptable a columnas tipo reticular que facilite la transición desde la posición horizontal hasta la posición vertical, eliminando así la necesidad de levantamiento manual directo y reduciendo el riesgo de lesiones. Es importante destacar que la propuesta incluye modelado CAD, análisis estructural mediante elementos finitos y una evaluación comparativa del proceso de montaje asistido respecto al método manual tradicional.

El artículo está organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se presenta la descripción de los materiales, los métodos de diseño y el procedimiento de análisis estructural empleados en el desarrollo del sistema de elevación; en la sección 3 se exponen los resultados obtenidos a partir del modelado computacional y del análisis por elementos finitos, incluyendo el comportamiento estructural y los parámetros críticos de operación; en la sección 4 se discuten los resultados en relación con estudios previos y con los criterios de seguridad y ergonomía establecidos; y, finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones del trabajo y se proponen líneas de investigación futura.

2. Métodos y materiales

En la presente sección se presentan los criterios técnicos empleados para el diseño y la validación del sistema mecánico de elevación propuesto. Se detallan los parámetros, variables y restricciones considerados, así como el procedimiento seguido para garantizar la reproducibilidad del estudio.

2.1. Definición del problema y alcance del estudio

El montaje de columnas estructurales tipo reticular en escenarios modulares requiere elevar manualmente elementos de hasta 12 m de longitud y un peso aproximado de 175 kg. Este procedimiento supera los límites recomendados para la manipulación manual de cargas y expone a los operadores a riesgos musculoesqueléticos elevados. El presente estudio aborda el diseño y la validación estructural de un sistema mecánico de elevación que permita realizar la transición de la columna desde la posición horizontal hasta la vertical sin intervención manual directa.

El sistema se diseñó para soportar una carga máxima $W=175\text{kg}$ equivalente a una fuerza gravitacional (eq. 1):

Fuerza equivalente (F):

$$F = W \cdot g = 175\text{kg} \cdot 9.81\text{m/s}^2 = 1715\text{ N} \quad (1)$$

Con el fin de garantizar condiciones seguras de operación, se aplicó un factor de seguridad 1.5, por lo que la fuerza de diseño se definió como muestra la (eq. 2).

Fuerza de diseño (Fd):

$$Fd = F \cdot FS = 1715N \cdot 1.5 = 2572.5N \quad (2)$$

Entonces, el objetivo consiste en desarrollar un sistema mecánico de elevación capaz de soportar Fd sin fallas estructurales y con desplazamientos dentro de los límites admisibles para estructuras de acero (definidos según comportamiento elástico del material y normativas de diseño mecánico [2]).

2.2. Materiales

En esta sección, se describen los materiales y componentes principales utilizados en el sistema mecánico de elevación. Se especifican las propiedades mecánicas del material estructural elegido y las características técnicas de los elementos que lo componen. La elección de estos materiales se basa en criterios como disponibilidad comercial, compatibilidad estructural y seguridad en su funcionamiento. Esta información sirve como base para el análisis y la validación del diseño propuesto.

a) **Material estructural**

Los materiales empleados para el diseño y análisis del sistema se describen a continuación, por una parte, el material estructural son tipo acero estructural A36, módulo de elasticidad (E): 210 GPa, límite elástico (σ_y): 207 MPa, coeficiente de Poisson (ν): 0.30, densidad (ρ): 7850 kg/m³ [3].

b) **Componentes mecánicos**

Son motor eléctrico Century PA1000, 500 kg, 110 V, Polea superior en V, acero inoxidable, Cable de acero de 6 mm con gancho de seguridad, Base móvil con ruedas de 4 y 6 pulgadas y estructura reticular estructural de 2 m como columna soporte. Finalmente, el software utilizado está basado en CAM, lo que permitió desarrollar el modelado y posterior el análisis estático lineal.

2.3 Método de diseño

El proceso de diseño se desarrolló con base en la metodología propuesta por Bernd Lobach [10], la cual estructura el desarrollo de productos mediante fases secuenciales. En este estudio se aplicaron las siguientes etapas: análisis del problema, definición de requisitos técnicos y ergonómicos, generación de alternativas de solución, evaluación mediante una matriz multicriterio y selección de la alternativa óptima.

2.4 Modelado tridimensional

El sistema seleccionado se modeló en un entorno CAD. El modelo incluyó la geometría real de los perfiles, los puntos de unión, las condiciones de apoyo y la trayectoria del cable de elevación. Las dimensiones y espesores de los elementos estructurales se definieron con el objetivo de mantener los esfuerzos por debajo del límite elástico del material y minimizar el peso total del sistema [10], [11].

2.5 Análisis por elementos finitos

El análisis estructural se realizó mediante el método de elementos finitos bajo un enfoque estático lineal. El dominio se discretizó utilizando elementos tetraédricos sólidos. La formulación del problema se basó en la ecuación de equilibrio global:

$$Ku = F \quad (3)$$

donde K representa la matriz de rigidez global, u el vector de desplazamientos nodales y F el vector de fuerzas aplicadas.

Las condiciones de contorno consideraron seis puntos de apoyo completamente restringidos en la base del sistema. La carga Fd se aplicó de forma estática en el punto de enganche del cable. Se evaluaron los desplazamientos máximos, los esfuerzos equivalentes de Von Mises y las reacciones en los apoyos, con el fin de verificar la integridad estructural del sistema.

Cinco propuestas conceptuales fueron evaluadas considerando criterios de estabilidad estructural, seguridad operativa, facilidad de transporte y compatibilidad con estructuras reticulares comerciales. La alternativa seleccionada presentó el mejor desempeño global y sirvió como base para el desarrollo del modelo definitivo.

2.6 Restricciones, límites operativos y disponibilidad de datos

El diseño y las simulaciones se desarrollaron bajo restricciones que garantizaron un comportamiento estructural seguro. No se aceptaron deformaciones superiores al 1% de la longitud total ni esfuerzos que excedieran el 60% del límite elástico del material. La base permaneció fija durante todo el proceso de elevación y la carga se aplicó de manera estática. Los límites operativos considerados incluyeron una temperatura ambiente entre 18 °C y 25 °C, una variación máxima de $\pm 10\%$ en la carga debido a accesorios adicionales y un coeficiente de fricción suelo-rueda aproximada de $\mu = 0.7$. Los modelos CAD, los archivos de simulación por elementos finitos y los cálculos numéricos empleados en este estudio se encuentran disponibles para consulta académica bajo solicitud, sin restricciones de divulgación.

3. Resultados

Esta sección presenta los resultados derivados de la aplicación de la metodología de diseño y del análisis estructural del sistema mecánico de elevación propuesto. Se muestran los hallazgos de cada etapa del proceso de diseño, desde el análisis del problema hasta la validación estructural por medio de elementos finitos. Los resultados están organizados de forma clara con figuras y tablas que simplifican su comprensión. Este apartado sirve como fundamento para la discusión y evaluación crítica del rendimiento del sistema.

3.1. Resultados de la fase de análisis del problema

La fase inicial permitió caracterizar el proceso real de montaje de columnas tipo reticular y establecer los requerimientos técnicos y ergonómicos del sistema de elevación. Análisis del proceso operativo. A través de la observación directa y entrevistas al personal técnico, se registraron detalles como el número de operadores necesarios, puntos críticos de manipulación (ver Figura 1), [12], [13], [14] posturas adoptadas, distancias y trayectorias de movimiento, así como riesgos ergonómicos existentes y tipos de accidentes, como se puede muestra en La Figura 2. Esta información sirvió para definir parámetros de entrada en el diseño, siguiendo las recomendaciones de ergonomía industrial en la manipulación de cargas [2], [5], [15], [16].

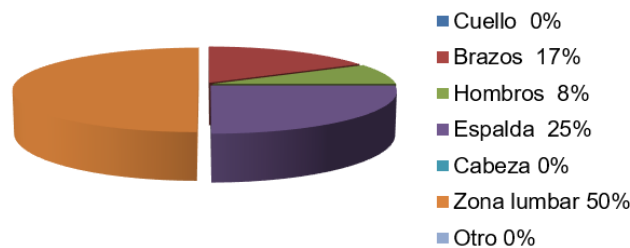


Figura 1. Lesión o dolor después de una jornada laboral

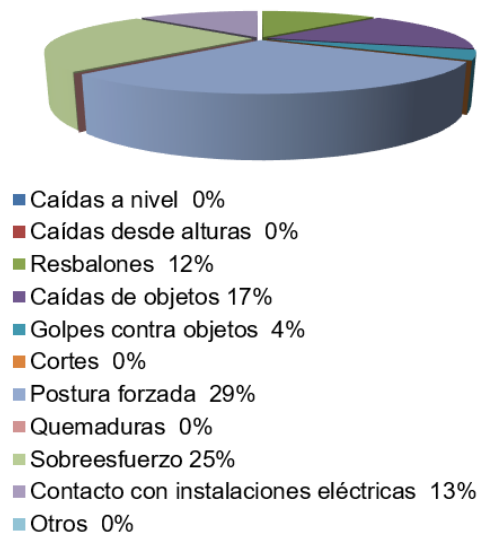


Figura 2. Tipos de accidentes más frecuentes al momento del montaje de estructura.

3.2. Resultados de la fase de generación de alternativas

Con base en los requisitos establecidos, se desarrollaron cinco propuestas conceptuales de sistemas de elevación que difirieron en su configuración estructural, mecanismo de accionamiento y forma de apoyo. Las alternativas se representaron mediante esquemas conceptuales, los cuales permiten visualizar sus diferencias principales (ver Figura 3). La evaluación se realizó mediante una matriz multicriterio que consideró estabilidad estructural, seguridad operativa, facilidad de transporte, compatibilidad con estructuras reticulares existentes y costo estimado. Los resultados de

esta evaluación se presentan en la (ver Tabla 1), donde se observa que la alternativa 5 alcanzó la mayor puntuación global y fue seleccionada para el desarrollo detallado.

Tabla 1: Requerimientos funcionales.

Alternativa	Estabilidad estructural	Seguridad operativa	Facilidad de transporte	Compatibilidad con reticular existentes	Costo estimado	Puntaje total
Propuesta 1	3	3	4	3	2	15
Propuesta 2	4	3	3	4	3	17
Propuesta 3	3	4	2	3	4	16
Propuesta 4	4	4	3	3	2	16
Propuesta 5	5	5	4	5	4	23

Escala de evaluación:

1 = Muy deficiente, 2 = Deficiente, 3 = Aceptable, 4 = Bueno, 5 = Muy bueno.

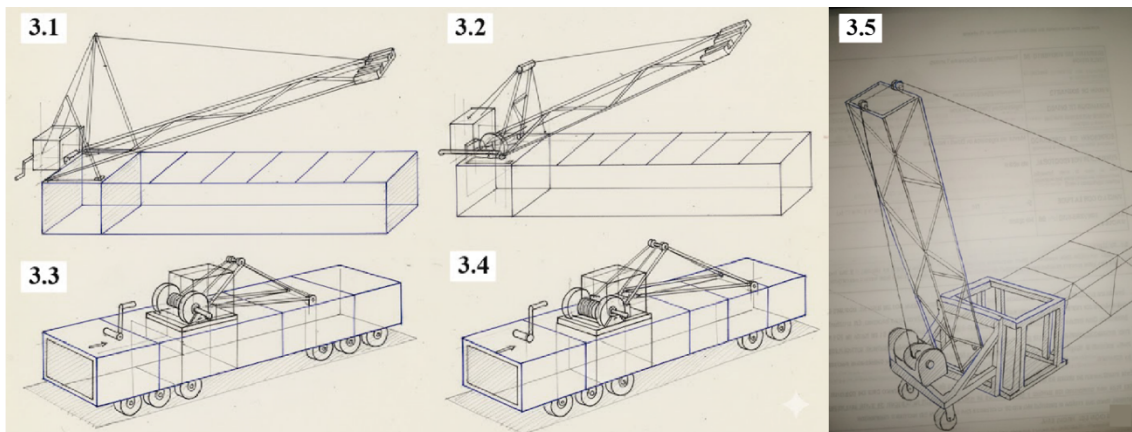


Figura 3. Bocetos de la propuesta.

3.3. Resultados de la fase de diseño detallado

La alternativa seleccionada se desarrolló a nivel de diseño detallado mediante modelado tridimensional. El modelo final incorporó la estructura portante, el sistema de poleas, el motor eléctrico y la base móvil. El modelo CAD del sistema y la identificación de sus componentes principales se presentan (ver Figura 4). En esta fase se definieron las dimensiones finales, los espesores de los perfiles y la disposición de los elementos mecánicos, con el objetivo de garantizar un comportamiento estructural seguro. Los principales parámetros geométricos del diseño final se resumen en la (ver Tabla 2). Las dimensiones y espesores se ajustaron para cumplir con el límite elástico del acero y minimizar el peso total, siguiendo criterios de diseño mecánico establecidos por Shigley [5].

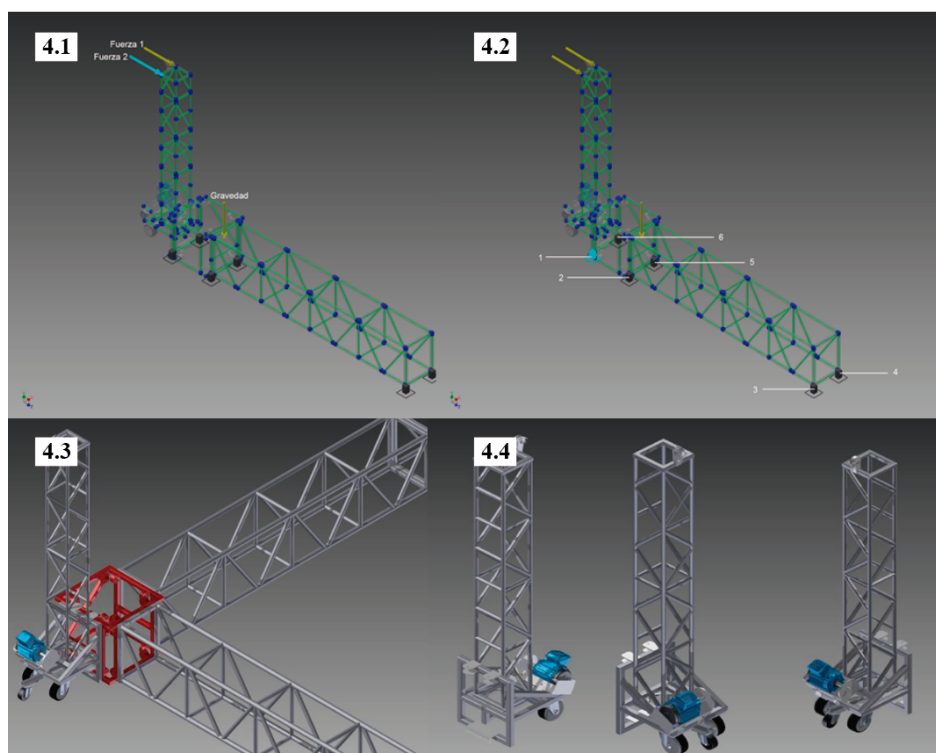


Figura 4. Modelo CAD y simulación.

Tabla 2: Parámetros geométricos y constructivos del diseño detallado del sistema de elevación.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Descripción
Altura de la estructura portante	h_s	2.0	m	Altura total del reticular soporte del sistema
Sección del perfil estructural	$b \times b$	34 × 34	cm	Sección cuadrada compatible con reticular estándar
Espesor del perfil	t	2.0	mm	Espesor del material estructural
Longitud máxima de la columna a elevar	L	12.0	m	Longitud total de la columna reticular
Capacidad nominal del motor	C_m	500	kg	Capacidad máxima del motor eléctrico
Diámetro del cable de acero	d_c	6	mm	Cable galvanizado con gancho de seguridad
Número de ruedas en la base	n_r	4	—	Ruedas industriales para movilidad del sistema
Diámetro de ruedas	D_r	4-6	pulgadas	Ruedas delanteras y traseras
Peso aproximado del sistema	W_s	65	kg	Peso total del sistema de elevación
Altura de la estructura portante	h_s	2.0	m	Altura total del reticular soporte del sistema

3.4. Resultados del análisis estructural por elementos finitos

El modelo CAD definitivo se sometió a un análisis estructural estático mediante el método de elementos finitos. La aplicación de la carga de diseño permitió evaluar la

respuesta estructural del sistema. El mapa de desplazamientos totales se presenta en la Figura 5, mientras que la distribución de esfuerzos equivalentes de Von Mises se muestra [17], (ver Figura 5). El desplazamiento máximo obtenido fue de 3.81 mm, localizado en el extremo superior del sistema, valor que se mantiene dentro de los límites admisibles. El esfuerzo máximo de Von Mises alcanzó 82.3 MPa, correspondiente al 39.7% del límite elástico del material. Los principales resultados numéricos del análisis se resumen (ver Tabla 3). El método de elementos finitos permite estimar el comportamiento de estructuras sometidas a cargas complejas y se considera un estándar válido para el diseño y optimización de mecanismos de elevación [3], [4], [8], [18].

Tabla 3. Resultados principales del análisis estructural por elementos finitos (FEA).

Resultado	Símbolo	Valor	Unidad	Ubicación/criterio
Carga de diseño aplicada	F_d	2572.5	N	Punto de enganche del cable
Desplazamiento máximo total	δ_{max}	3.81	mm	Extremo superior de la estructura
Esfuerzo equivalente máximo (Von Mises)	$\sigma_{VM,max}$	82.3	MPa	Zona de conexión/área crítica
Límite elástico del material	σ_y	207	MPa	Acero estructural
Relación ($\sigma_{VM,max}/\sigma_y$)	—	0.397	—	Verificación de régimen elástico
Factor de seguridad estimado	FS	2.51	—	$FS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{VM,max}}$
Reacción vertical máxima en apoyos	$(R_{z,max})$	6077	N	Punto de apoyo crítico en la base

Los resultados del análisis estructural por elementos finitos, resumidos (ver Tabla 3), evidencian que el sistema de elevación presenta un comportamiento mecánico adecuado bajo la carga de diseño aplicada. El desplazamiento máximo total alcanzó 3.81 mm, localizado en el extremo superior de la estructura, lo que representa una fracción mínima de la longitud total del sistema y se mantiene dentro de los límites admisibles establecidos. El esfuerzo equivalente máximo de Von Mises fue de 82.3 MPa, valor que corresponde al 39.7% del límite elástico del acero estructural considerado, lo que confirma que el sistema opera dentro del régimen elástico. El factor de seguridad estimado fue de 2.51, lo cual proporciona un margen adecuado frente a posibles variaciones de carga. Asimismo, la reacción vertical máxima registrada en los apoyos fue de 6077 N, valor coherente con la configuración de seis apoyos completamente restringidos en la base, lo que garantiza la estabilidad global del sistema durante el proceso de elevación. (ver Figura 5).

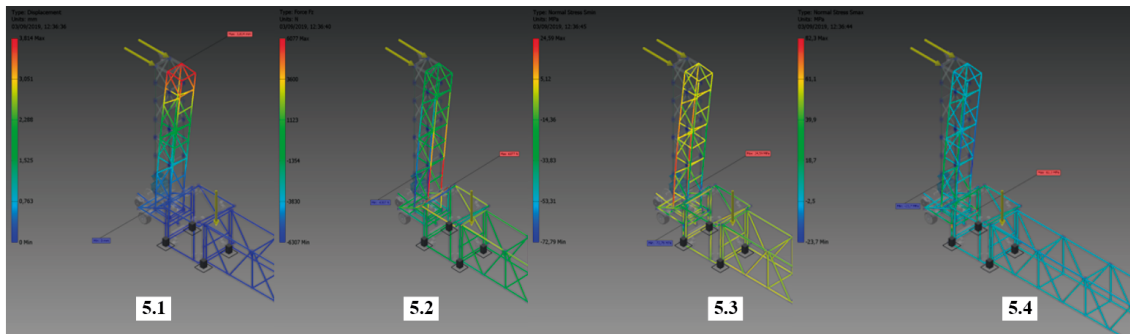


Figura 5: Análisis estructural por elementos finitos (FEA).

Las simulaciones y el diseño se realizaron considerando múltiples restricciones para asegurar la estabilidad estructural. No se toleraron deformaciones mayores al 1% de la longitud total y se descartaron configuraciones que excedieran el 60% del límite elástico del material, con el fin de mantener un margen de seguridad frente a fallas por sobreesfuerzo. La base permaneció fija durante toda la elevación, y la carga se aplicó de manera estática en el punto de enganche del cable, permitiendo simular un escenario controlado. Además, se establecieron límites ambientales y operativos: una temperatura de trabajo entre 18 °C y 25 °C, una variación máxima de $\pm 10\%$ en la carga por accesorios adicionales y un coeficiente de fricción suelo-rueda aproximado de $\mu = 0.7$, acorde con condiciones típicas de montaje en exteriores. Los modelos CAD, los archivos de simulación por elementos finitos y los cálculos numéricos utilizados en este estudio están disponibles para consulta académica sin restricciones, ya que el sistema es resultado de un desarrollo original basado en materiales y herramientas comerciales.

4. Discusión

Los resultados obtenidos a partir de la metodología de diseño y del análisis estructural por elementos finitos confirman la viabilidad técnica del sistema mecánico de elevación propuesto para columnas tipo reticular. El comportamiento estructural evidenciado, caracterizado por desplazamientos reducidos y esfuerzos equivalentes muy por debajo del límite elástico del material, concuerda con estudios previos que destacan la eficacia del análisis FEA como herramienta predictiva para el diseño de mecanismos de elevación y estructuras sometidas a cargas concentradas [1], [3].

El desplazamiento máximo registrado de 3.81 mm representa una deformación pequeña en relación con la geometría global del sistema, lo que garantiza la estabilidad durante la operación. Valores de esta magnitud se consideran aceptables en estructuras de acero destinadas a aplicaciones temporales y móviles, siempre que se mantengan dentro del régimen elástico, tal como se observa en diseños similares reportados en la literatura [4]. Asimismo, el esfuerzo máximo de Von Mises alcanzó únicamente el 39.7% del límite elástico del acero, lo que proporciona un margen de seguridad adecuado frente a variaciones de carga y condiciones operativas no ideales.

Desde el punto de vista del proceso de diseño, la aplicación de una metodología estructurada permitió integrar criterios técnicos, ergonómicos y económicos en la selección de la alternativa final. La matriz multicriterio facilitó una toma de decisiones objetiva y coherente, práctica ampliamente utilizada en el desarrollo de productos de

ingeniería cuando se requiere balancear múltiples restricciones y objetivos [5]. La alternativa seleccionada demostró un desempeño superior en estabilidad estructural, seguridad operativa y compatibilidad con estructuras reticular existentes, aspectos clave para su implementación en contextos reales.

En términos de seguridad y ergonomía, la reducción del número de operadores necesarios para la elevación de columnas tipo reticular constituye uno de los aportes más relevantes del sistema. La eliminación del levantamiento manual directo de cargas pesadas responde a las recomendaciones de organismos internacionales de seguridad laboral, que sugieren limitar la manipulación manual de cargas para prevenir trastornos musculoesqueléticos [19]. Aunque el presente estudio no incluye una evaluación biomecánica experimental, los resultados operativos permiten inferir una disminución significativa del riesgo asociado al montaje de escenarios.

El análisis económico mostró que el costo estimado de fabricación del sistema es considerablemente inferior al de soluciones comerciales existentes, lo que refuerza su potencial de adopción por parte de pequeñas y medianas empresas del sector eventos. Este aspecto resulta coherente con investigaciones que resaltan la necesidad de desarrollar soluciones de ingeniería accesibles y adaptadas a contextos locales, sin sacrificar criterios de seguridad y desempeño estructural [8].

No obstante, el estudio presenta algunas limitaciones. El análisis estructural se realizó bajo un enfoque estático lineal y no considera efectos dinámicos asociados al arranque del motor, vibraciones ni cargas cíclicas durante el uso repetitivo. Además, las condiciones ambientales se asumieron constantes y no se evaluó el comportamiento del sistema ante escenarios extremos. Estas limitaciones abren oportunidades para trabajos futuros orientados a un análisis dinámico, estudios de fatiga y validaciones experimentales a escala real.

4. Conclusiones

Este estudio diseñó y validó un sistema mecánico de elevación para columnas estructurales tipo reticular, con el objetivo de mejorar la seguridad y eficiencia en el montaje de escenarios modulares. Utilizó una metodología de diseño estructurado para definir una solución técnica que combina criterios de estabilidad, seguridad operativa y viabilidad económica.

El análisis por elementos finitos indicó que el sistema presenta un comportamiento mecánico adecuado bajo la carga de diseño, con una deformación máxima de 3.81 mm y un esfuerzo de Von Mises de 82.3 MPa, ambos dentro del rango elástico del acero estructural. El factor de seguridad estimado de 2.51 proporciona un margen suficiente frente a variaciones de carga y condiciones reales. Funcionalmente, el sistema reduce significativamente la intervención manual en la elevación de columnas, pasando de cuatro a una persona, disminuyendo esfuerzo físico y riesgo de lesiones musculoesqueléticas, en línea con normas internacionales de seguridad laboral.

El análisis económico reveló que el costo de fabricación es mucho menor que las soluciones comerciales actuales, facilitando su adopción por pequeñas y medianas empresas que montan estructuras temporales. La combinación de buen desempeño

estructural, seguridad y menor coste constituye uno de los principales aportes del estudio.

Para futuras investigaciones, se recomienda realizar ensayos a escala real para validar las simulaciones, incorporar análisis dinámicos de vibración, arranque del motor y cargas cíclicas, además de evaluar su comportamiento en condiciones ambientales extremas y considerar la integración de sensores para monitoreo en tiempo real de cargas y desplazamientos, ampliando su utilidad y seguridad.

Debido a los primeros resultados alcanzados en este trabajo se ha planteado realizar un conjunto de simulaciones dinámicas, con el objetivo de realizar nuevos análisis que impliquen de efectos de vibración y fatiga y de esta forma completar el trabajo a través de evaluación biomecánica cuantitativa.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa dedicada al montaje de escenarios y estructuras temporales por facilitar el acceso a la información técnica y permitir la observación del proceso operativo utilizado en el desarrollo del presente estudio. Asimismo, se reconoce el apoyo institucional brindado por la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Ambato, a través de la Carrera de Diseño Industrial, por el acompañamiento académico y el acceso a herramientas de modelado y simulación necesarias para la realización de la investigación.

Contribución de los autores

Los autores declaran sus contribuciones en la siguiente matriz:

	Francisco Echeverria	Gloria Vanegas Zabala	Pablo Amancha Proaño	Marco Pilco Núñez
Conceptualización				
Análisis formal				
Investigación				
Metodología				
Recursos				
Validación				
Redacción - revisión y edición				

Referencias

- [1] V. De Biagi, "Structural behavior of a metallic truss under progressive damage," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 82, pp. 56–64, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2015.12.016.
- [2] Z. Wang, H. Hayashida, D. Zhang, F. Gong, and T. Ueda, "Structural behaviors evaluation of RC beam under frost damage - A methodology with meso-macro material/bond simulation and integrating into structural analysis," *Eng. Struct.*, vol. 206, p. 110162, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.110162.

- [3] GARG, Arun; PUTZ-ANDERSON, Vernon; WATERS, Thomas R. Applications Manual for the Revised NIOSH Lifting Equation (Superseded). 1994. DOI: 10.26616/NIOSH PUB94110
- [4] TAKALA, Jukka; URRUTIA, Marta. Safety and health at work: a European perspective. *Revista Portuguesa de Saúde Pública*, 2009, p. 21-30.
- [5] SAPSIS, Bill (ed.). *Entertainment Rigging for the 21st Century: Compilation of Work on Rigging Practices, Safety, and Related Topics*. CRC Press, 2014. [Online]. Available: <https://acortar.link/fvC7DB>
- [6] M. Ramaganesh, R. Jayasuriyan, T. Rajpradeesh, S. Bathrinath, and R. Manikandan, "Ergonomics hazard analysis techniques- A technical review," *Mater. Today Proc.*, vol. 46, pp. 7789-7797, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.329.
- [7] S. Chizhov, A. Pismak, and A. Antonyuk, "The stability of the wall of the main beam of the movable bridge (application of SP method)," *E3S Web Conf.*, vol. 157, p. 06014, Jan. 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202015706014.
- [8] SAPSIS, Bill (ed.). *Entertainment Rigging for the 21st Century: Compilation of Work on Rigging Practices, Safety, and Related Topics*. CRC Press, 2014.
- [9] SANUSI, H., et al. Optimisation of scissor lifting machine structures using finite element analysis (FEA). En AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2019. p. 020003. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5118011>
- [10] S. Vinodh, S. r. Devadasan, S. Maheshkumar, M. Aravindakshan, M. Arumugam, and K. Balakrishnan, "Theory and practice of CAD/CAM infused agile characteristics in the traditional products," *Int. J. Product. Qual. Manag.*, vol. 8, no. 2, pp. 225-246, Jan. 2011, doi: 10.1504/IJPQM.2011.041847.
- [11] V. Sharma, V. Sharma, and O. J. Shukla, *Principles and Practices of CAD/CAM*. New York: Chapman and Hall/CRC, 2023. doi: 10.1201/9781003350842.
- [12] P. Lee, A. Helewa, C. H. Goldsmith, H. A. Smythe, and L. W. Stitt, "Low back pain: prevalence and risk factors in an industrial setting," *J. Rheumatol.*, vol. 28, no. 2, pp. 346-351, Feb. 2001.
- [13] KARWOWSKI, Waldemar; MARRAS, William S. (ed.). *The occupational ergonomics handbook*. Crc Press, 1998.
- [14] S. McGill, *Low Back Disorders: Evidence-Based Prevention and Rehabilitation*. Human Kinetics, 2015.
- [15] W. S. Marras, *The Working Back: A Systems View*. John Wiley & Sons, 2008.
- [16] Y. E. Rodríguez, "Manipulación manual de carga como principal factor de riesgo ergonómico desencadenante de trastornos lumbares en la industria de la construcción," *Saluta*, no. 4, pp. 31-50, 2021, doi: 10.37594/saluta.v1i4.611.
- [17] J. López Martínez, *Cálculo y diseño de máquinas: problemas resueltos I*. Editorial Universidad de Almería, 2017. Accessed: Dec. 19, 2025. [Online]. Available: <https://elibro.puce.elogim.com/es/ereader/puce/44600>
- [18] J. A. G. Caiza, "DISEÑO, INFRAESTRUCTURA Y SISTEMAS SOCIALES Y AMBIENTALES PARA UN HÁBITAT SOSTENIBLE". [Online]. Available: <https://repositorio.puce.edu.ec/items/67a2b71a-1eaf-41dd-8250-9ce7eb2665e3>

- [19] LEE, PETER, et al. Low back pain: prevalence and risk factors in an industrial setting. *The Journal of rheumatology*, 2001, vol. 28, no 2, p. 346-351.