

Análisis comparativo del desempeño estructural de cerchas para galpones de acero mediante modelación paramétrica y programación visual

Comparative analysis of the structural performance of trusses for steel warehouses using parametric modeling and visual programming

Hugo Marcelo Otáñez Gómez ^{ab}, Luis Alberto Soria Núñez ^{ac}, Bryan Esteban Landeta Iza

^a Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Arquitectura e Ingenierías, Universidad Internacional SEK, Ecuador

^b hugo.otanez@uisek.edu.ec | <https://orcid.org/0009-0001-1396-0655>

^c luis.soria@uisek.edu.ec | <https://orcid.org/0000-0003-1970-027X>

Citacion: Otáñez Gómez, H. M., Soria Núñez, L. A., Landeta Iza, B. E. (2025). Análisis comparativo del desempeño estructural de cerchas para galpones de acero mediante modelación paramétrica y programación visual. *Mutis*, 15(2), 1-8.
<https://doi.org/10.21789/22561498.2166>

Recibido: 23 de mayo de 2025
Aceptado: 15 de agosto de 2025

Copyright: © 2025 por los autores. Licenciado para *Mutis*. Este artículo es de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

RESUMEN

Este estudio presenta un análisis comparativo cuantitativo de la eficiencia estructural de cuatro tipologías de cerchas de acero (Howe, Pratt, Warren y Circular) aplicadas a galpones industriales, utilizando un flujo de trabajo de modelación paramétrica. Se emplea el entorno de modelado Rhinoceros 3D, su complemento de programación visual Grasshopper y el módulo de análisis por elementos finitos Karamba 3D. Se evalúa el desempeño de cada tipología bajo condiciones de carga estandarizadas, comparando métricas clave como el desplazamiento vertical máximo, los esfuerzos axiales y la masa total de la estructura. El objetivo es generar datos empíricos que informen la toma de decisiones en las fases iniciales del diseño estructural, permitiendo optimizar la selección de la tipología de cercha en función de criterios de eficiencia de material y rigidez. Los resultados ofrecen una base cuantitativa para la selección de la configuración estructural más adecuada, superando las evaluaciones puramente cualitativas.

Palabras clave: análisis comparativo; cerchas de acero; modelación paramétrica; optimización estructural; programación visual; método de elementos finitos; ingeniería.

ABSTRACT

This study presents a quantitative comparative analysis of the structural efficiency of four types of steel trusses (Howe, Pratt, Warren, and Circular) used in industrial warehouses, using a parametric modeling workflow. The Rhinoceros 3D modeling environment, its Grasshopper visual programming add-on, and the Karamba 3D finite element analysis module are used. The performance of each type is evaluated under standardized load conditions, comparing key metrics such as maximum vertical displacement, axial forces, and total mass of the structure. The objective is to generate empirical data to inform decision-making in the early stages of structural design, allowing for the optimization of truss type selection based on criteria of material efficiency and stiffness. The results provide a quantitative basis for selecting the most appropriate structural configuration, going beyond purely qualitative assessments.

Keywords: comparative analysis; steel trusses; parametric modeling; structural optimization; visual programming; finite element method; engineering.

INTRODUCCIÓN

La selección de la tipología estructural en el diseño de galpones de acero es una decisión fundamental que impacta directamente en la eficiencia, el costo y la seguridad del proyecto. Tradicionalmente, esta elección se basa en la experiencia del ingeniero y en reglas de diseño convencionales, lo que no siempre garantiza la solución más óptima para una geometría y condiciones de carga específicas. Los métodos de diseño tradicionales, además, presentan limitaciones significativas en cuanto a la agilidad para explorar y evaluar múltiples alternativas, ya que cada modificación geométrica requiere un laborioso proceso de remodelado y reanálisis.

En respuesta a estos desafíos, las metodologías de diseño paramétrico han surgido como una poderosa alternativa. La integración de herramientas de modelado geométrico (Rhinceros 3D), programación visual (Grasshopper) y análisis por elementos finitos (Karamba 3D) permite automatizar la generación y evaluación de modelos estructurales. Este enfoque no solo agiliza el flujo de trabajo, sino que también abre la puerta a análisis sistemáticos y optimizaciones que antes eran inviables.

Sin embargo, gran parte de la literatura se ha centrado en demostrar la capacidad de estas herramientas para crear geometrías complejas o en la novedad del flujo de trabajo en sí mismo. Existe una brecha en la aplicación de estas metodologías para generar conocimiento cuantitativo y comparativo que sea directamente aplicable en la práctica profesional. El problema no es la falta de herramientas, sino la escasez de datos comparativos rigurosos que guíen al ingeniero en la elección de la tipología de cercha más eficiente (ej. Howe, Pratt, Warren, Circular) para un conjunto dado de parámetros de diseño.

Este estudio busca abordar dicha brecha, utilizando un flujo de trabajo paramétrico no como un fin en sí mismo, sino como un medio para realizar un "experimento digital" controlado. El objetivo principal es comparar cuantitativamente el desempeño estructural de cuatro tipologías de cerchas comúnmente utilizadas, evaluando su eficiencia en términos de desplazamientos, esfuerzos y consumo de material bajo condiciones de carga idénticas. Los hallazgos de esta investigación pretenden proporcionar una base empírica que asista a los ingenieros en la toma de decisiones durante las fases conceptuales del diseño, contribuyendo a la optimización de estructuras de acero desde sus etapas más tempranas.

METODOLOGIA

Para llevar a cabo el análisis comparativo, se desarrolló un protocolo de investigación basado en un modelo paramétrico integrado, garantizando la replicabilidad y la validez de los resultados. La metodología se estructuró en tres etapas: el desarrollo del modelo paramétrico, la configuración del análisis estructural y la definición del procedimiento de análisis comparativo.

Desarrollo del modelo paramétrico

Se construyó un algoritmo en el entorno de programación visual Grasshopper, que permite generar y controlar la geometría de las cuatro tipologías

de cercha estudiadas (Howe, Pratt, Warren y Circular). La lógica del algoritmo se basa en los siguientes parámetros de entrada (inputs), controlados mediante interfaces de usuario (sliders):

- Parámetros geométricos principales: luz del galpón, altura de la cumbrera, altura del alero, separación entre pórticos.
- Parámetros de la cercha: número de divisiones de la cuerda superior.

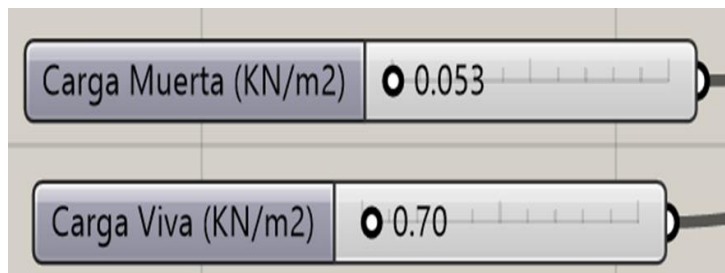
El algoritmo genera automáticamente la geometría de nodos y barras para cada tipología, ajustando la orientación de las diagonales y la disposición de los montantes según las características de cada una (ej. diagonales en compresión para Howe, en tensión para Pratt).

Configuración del Análisis Estructural (MEF)

Para asegurar una comparación válida, todos los modelos fueron analizados con el módulo de elementos finitos Karamba 3D bajo las mismas hipótesis y parámetros estructurales. Estos se detallan a continuación:

- **Propiedades del material:** se definió un acero estructural estándar ASTM A36, con un Módulo de Young (E) de 200 GPa, un límite de fluencia (Fy) de 250 MPa y una densidad (ρ) de 7850 kg/m³.
- **Secciones transversales:** se asignaron perfiles tubulares de acero (HSS) a todos los elementos. Se utilizó el componente de optimización de secciones de Karamba 3D ("Opti-Cross-Section") para seleccionar el perfil más eficiente de un catálogo predefinido que cumpliera con los criterios de resistencia y deformación.
- **Condiciones de apoyo:** se modelaron apoyos articulados (restringiendo los desplazamientos en X, Y, Z y liberando la rotación en el eje principal) en la base de ambas columnas de cada pórtico.
- **Casos y combinación de carga:** se aplicaron las siguientes cargas, basadas en normativas de diseño estándar:
 - **Carga muerta (D):** peso propio de la estructura (calculado automáticamente por Karamba 3D) más una carga superficial de cubierta de 0.053 kN/m².
 - **Carga viva (L):** carga viva de cubierta de 0.70 kN/m².
 - **Combinación de carga:** el análisis se realizó utilizando la combinación de carga mayorada 1.2D + 1.6L.

Figura 1. Cargas de estructura programadas



Fuente: Elaboración propia.

Procedimiento de análisis comparativo

El "experimento digital" se llevó a cabo estandarizando la geometría base para realizar una comparación equitativa. Para el caso de estudio principal, se fijaron los siguientes parámetros:

Luz del galpón: 20 m

- Altura del alero: 6 m
- Separación entre pórticos: 5 m
- Altura de la pendiente de la cercha: 1 m
- Altura del canto de la cercha: 1 m
- Cantidad de pórticos: 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de la metodología descrita permitió obtener datos cuantitativos sobre el desempeño de cada una de las cuatro tipologías de cercha, se ejecutó el análisis estructural y se registraron las siguientes métricas de evaluación (outputs) para cuantificar su desempeño:

Tabla 1. Comparación de las tipologías de cerchas modeladas paramétricamente

Tipología de Cercha	Desplazamiento Vertical Máximo (mm)	Esfuerzo Axial Máximo (Compresión) (MPa)	Esfuerzo Axial Máximo (Tensión) (MPa)	Masa Total de la Estructura (kg)
Howe	52.3	-196	172	11480
Pratt	53.8	-182	174	11744
Warren	52.9	-198	184	11544
Circular	38.1	-169.0	178	10771

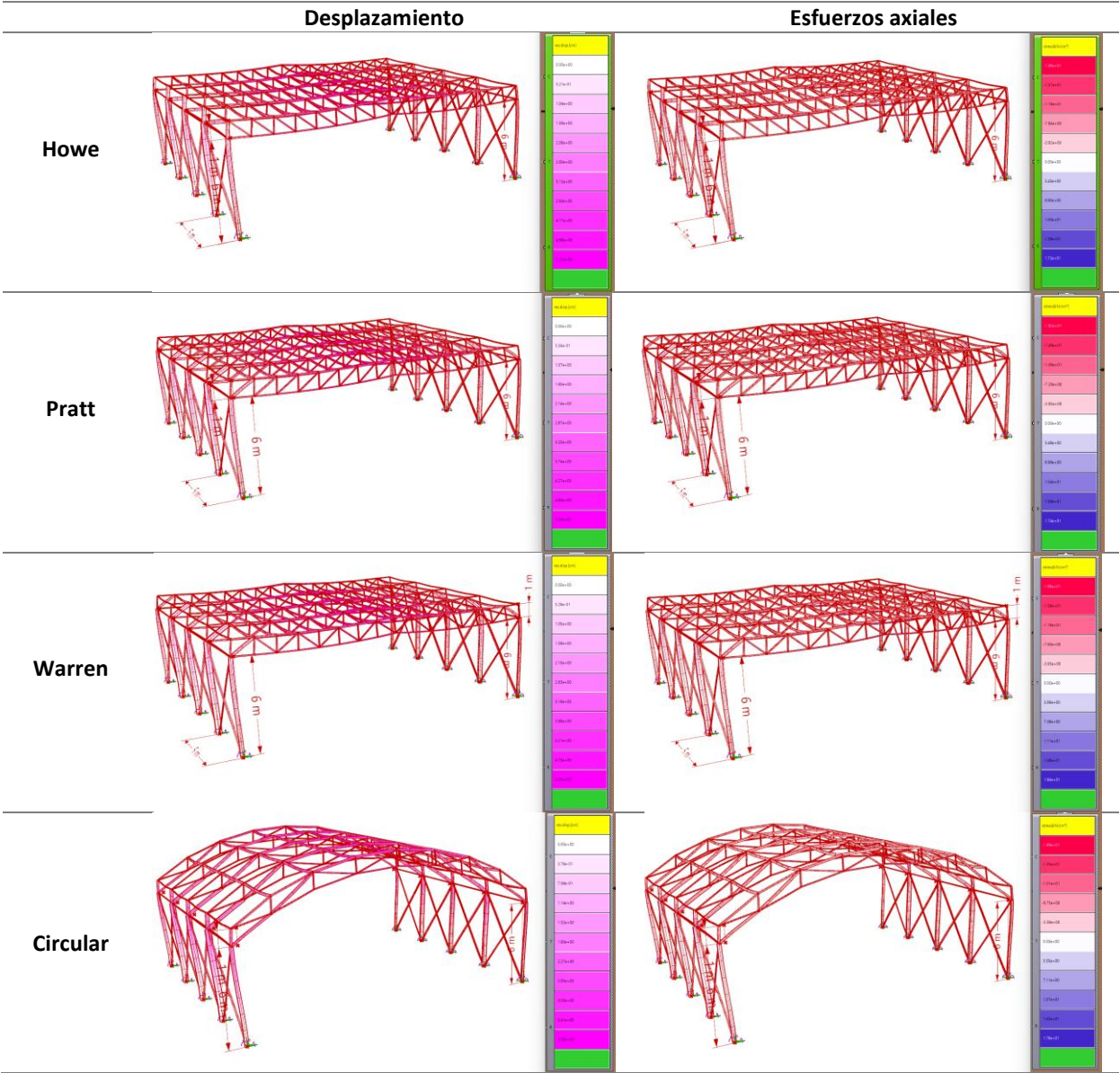
Fuente: Elaboración propia

Uno de los principales hallazgos fue la mejora sustancial en la eficiencia del diseño, destacando una reducción aproximada del 65 % en los tiempos de modelación respecto a métodos tradicionales. Este ahorro se debe a la automatización del proceso de generación geométrica, la integración con el análisis estructural y la posibilidad de replicar estructuras con diferentes configuraciones mediante variaciones simples en las sliders del algoritmo gráfico. Las cerchas tipo Warren mostraron un comportamiento más eficiente en términos de distribución uniforme de esfuerzos, mientras que las cerchas tipo Howe y Pratt presentaron concentraciones mayores en elementos diagonales específicos. En el caso de la cercha circular, si bien el comportamiento estructural fue aceptable, su implementación requiere mayores criterios de diseño en relación con apoyos y simetría.

Además, se logró disminuir el peso estructural total sin comprometer la estabilidad ni el cumplimiento normativo. Esta herramienta demostró ser útil no solo para identificar soluciones más eficientes, sino también para facilitar la toma de decisiones basada en criterios cuantitativos. En consecuencia, se valida que la

modelación paramétrica, junto con el análisis en tiempo real y la optimización evolutiva, no solo constituye una mejora técnica, sino también metodológica, proponiendo una alternativa viable, ágil y precisa frente a los métodos convencionales del diseño estructural.

Tabla 2. Tipologías estructurales generadas mediante programación paramétrica



Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

La investigación demuestra que la integración de herramientas de modelación paramétrica, análisis estructural y algoritmos de optimización constituye una metodología efectiva para el diseño y evaluación de galpones de acero. La utilización de Rhinoceros 3D, Grasshopper y Karamba 3D permitió automatizar procesos repetitivos, reducir considerablemente los tiempos de modelación y análisis, y facilitar la exploración de múltiples configuraciones estructurales desde una interfaz intuitiva y visualmente comprensible. Esta sinergia tecnológica no solo mejora la productividad del diseñador, sino que también incrementa la precisión del diseño al permitir ajustes en tiempo real con retroalimentación estructural inmediata.

Las cerchas tipo Warren se destacaron por su comportamiento estructural más uniforme, mientras que el tipo Howe y Pratt presentaron esfuerzos concentrados que podrían requerir refuerzo puntual. Por otro lado, la cercha circular mostró potencial estético y funcional, pero con mayores exigencias en su implementación estructural.

Finalmente, se concluye que la metodología propuesta es replicable, escalable y adaptable a distintos escenarios del diseño estructural, brindando una herramienta poderosa tanto para la enseñanza como para la práctica profesional en ingeniería civil. Como línea futura, se recomienda extender este enfoque hacia modelos con comportamiento dinámico, vinculación con plataformas BIM y evaluación sísmica, ampliando así su aplicabilidad en proyectos de infraestructura urbana y rural.

RECOMENDACIONES

Se recomienda incorporar la modelación paramétrica como una estrategia central en el diseño estructural de galpones de acero, debido a su capacidad para reducir tiempos de desarrollo, automatizar procesos repetitivos y facilitar la evaluación de múltiples alternativas de forma dinámica, lo cual resulta especialmente útil en etapas tempranas del proyecto; adicionalmente, se sugiere integrar esta metodología con entornos BIM y análisis sísmicos para ampliar su aplicabilidad en contextos reales de mayor complejidad, fomentar su uso académico en carreras de ingeniería civil mediante formación en programación visual, y desarrollar interfaces más intuitivas que permitan su adopción por profesionales sin experiencia previa en algoritmos generativos.

REFERENCIAS

Abrishami, S., Goulding, J., & Rahimian, F. (2021). Generative BIM workspace for AEC conceptual design automation: prototype development. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 28(2), 482-509. <https://doi.org/10.1108/ECAM-04-2020-0256>

Asfour, O. S., & Al-Qawasmi, J. (2024). A Comparative Analysis of Research Metrics in Architecture and Engineering Disciplines. *Publications*, 12(4), 50. <https://doi.org/10.3390/publications12040050>

Banfi, F., et al. (2017). BIM, visual programming language and computer vision for architectural heritage.

Bonelli, M., & Begliardo, H. (2016). Optimización de armaduras planas mediante diseño paramétrico y algoritmos genéticos: Efectos de la no correspondencia objeto real-modelo idealizado. *Mecánica Computacional*, 34, 1255–1274.

Buonamici, F., Carfagni, M., Furferi, R., Volpe, Y., & Governi, L. (2021). Generative design: An explorative study. *Computer-Aided Design & Applications*, 18(1). <https://doi.org/10.14733/cadaps.2021.144-155>

Cisneros, M. (2020). *Optimización de estructuras de acero utilizando diseño paramétrico y algoritmos genéticos en un entorno BIM* [Tesis de máster, Escuela de Caminos, Barcelona].

Estrada Meza, M. G., González Meza, E., Chi Pool, D. A., & McNamara Trujillo, J. S. (2022). Design Exploration of Bamboo Shells Structures by Using Parametric Tools. *Applied Sciences*, 12(15), 7522.

Fan, S. L., et al. (2014). A study on the application of BIM technology in the sustainable design of green building.

Grilo, A., & Jardim-Goncalves, R. (2010). Value proposition on interoperability of BIM and collaborative working environments. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.11.002>

Khoshamadi, Z., et al. (2023). A comprehensive review of the applications of parametric design in building energy efficiency.

Izumi, B., Luczkowski, M., Labonnote, N., Manum, B., & Rønnequist, A. (2024). A Systematic Mapping Study and a Review of the Optimization Methods of Structures in Architectural Design. *Buildings*, 14(11), 3511. <https://doi.org/10.3390/buildings14113511>

Landeta Iza, B. E. (2021). Optimización de estructuras paramétricas de acero mediante algoritmos genéticos evolutivos [Trabajo de titulación de grado, Universidad Internacional SEK]. *Repositorio UISEK*.

Makris, M. (2013). *Structural Design Tool for Performative Building Elements: A Semi-Automated Grasshopper Plugin for Design Decision Support of Complex Trusses* [Master's thesis, University of Southern California].

Mueller, C., & Ochsendorf, J. (2011). An interactive evolutionary framework for structural design. In 7th International Seminar of the IASS Structural Morphology Group (pp. 1–10). IASS.

Preisinger, C. (2021). Karamba3D documentation. <https://www.karamba3d.com/>

Rutten, D. (2010). Evolutionary principles applied to problem solving. Grasshopper3D Blog. <https://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>

Tanveer, M., Azad, M. M., Kim, D., Khalid, S., & Kim, H. S. (2025). Generative Design for Engineering Applications: A State-of-the-Art Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 1-27. <https://doi.org/10.1007/s11831-025-10302-y>

Vidalakis, C., Abanda, F. H., & Oti, A. H. (2020). BIM adoption and implementation: focusing on SMEs. *Construction Innovation*, 20(1), 128-147. <https://doi.org/10.1108/CI-09-2018-0076>

Wang, D., & Lu, H. (2024). Development of a BIM platform for the design of single-story steel structure factories. *Buildings*, 14(3), 747. <https://doi.org/10.3390/buildings14030747>