

REVISTA INDUSTRIAL 4.0

EDICIÓN DIGITAL Nro. 8
MARZO 2024

ISSN-L 2958-0188



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Industrial

M.Sc. Oscar Arnaldo Heredia Vargas
Dra. María Eugenia García Moreno
Ing. Alejandro Martín Mayori Machicao
Ing. Freddy Gutiérrez Barea
Ing. Franz José Zenteno Benítez

Rector
Vicerrector
Decano Facultad de Ingeniería
ViceDecano Facultad de Ingeniería
Director de Carrera Ingeniería Industrial

Revista Industrial 4.0
Edición Impresa N°. 8 - Marzo 2024
Impresa: ISSN 2958-017X
En Línea: ISSN-L 2958-0188

Comite Editor:
Ing. Grover Sanchez Eid
Ing. Mario Zenteno Benitez PhD

Diseño Versión Impresa & web:
Ing. Enrique Orosco Crespo

Imagen Tapa:
Carrera de Ingeniería Industrial

Imprenta:
Walking Graf

Deposito Legal:
4-3-68-20

Web:
<https://industrial.umsa.bo/revistaindustrial-40>
Email:
revistaindustrial4.0@umsa.bo

Av. Mcal. Santa Cruz N° 1175, Plaza del Obelisco
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería
TEL. 2205000-2205067, Int. 1402
Campus Universitario, Cota Cota - calle 30



PRESENTACIÓN

La revista Industrial 4.0, es una publicación semestral (impresa y digital) de la Carrera de Ingeniería Industrial, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Mayor de San Andrés. Fue creada para la difusión de los trabajos que realizan los profesionales -nacionales o extranjeros- en tecnología, innovación, ingeniería e investigación.

Una mirada atrás, nos muestra un recorrido de mas de cuatro años, tiempo en el cual, especialmente profesionales vinculados a la carrera, han plasmado su sapiencia, escribiendo artículos bajo estándares cada vez más exigentes. Por lo anotado en esta edición Numero 8 de la Revista Industrial 4.0, me complace presentar una muestra de esa renovación e investigación constante de mis colegas, de la cual me siento orgulloso en pertenecer y aportar con mi juicio, que espero impulse y aporte al mejoramiento continuo de este emprendimiento.

La Revista Industrial 4.0 en su número 8, tiene artículos variados y renovados que son la imagen de la carrera de Ingeniería Industrial al mundo científico, principalmente vinculado al surgimiento y mejoramiento de sistemas productivos.

Mgp. Ing. Lucio Grover Sánchez Eid

Director del Instituto de Investigaciones Amazónicas

Optimización topológica en el diseño mecánico

Cesar Colquehuanca Apaza
ORCID: 0009-0005-4928-0060
ces_elm@hotmail.com

Recibido: 30 de enero; aprobado: 13 de marzo

RESUMEN

El presente artículo muestra la importancia que tiene el diseño mecánico para el diario vivir de la sociedad, el empleo de tecnologías y uso de computadores permite obtener estructuras mecánicas (maquinas, techos, escaleras y otros) más livianas y económicas esto gracias a la optimización topológica. Adicionalmente se presenta la teoría sobre el diseño mecánico, resistencia mecánica, el método de elemento finito y su aplicación a la optimización de recursos, para luego finalizar con una aplicación a una viga tipo voladizo, en la cual, se evidencia que el porcentaje de reducción en material es del 24,1 %, de 78 kg a 59,2 kg, generando una estructura más liviana y con la correspondiente seguridad estructural; con relación al factor de seguridad esta misma disminuyo en un 13,22 % de 2,95 a 2,56 manteniéndose en un rango de confiabilidad para la estructura tipo viga en voladizo. Finalmente se menciona que la optimización topológica en diferentes estructuras mecánicas beneficia al diseñador proveyéndole de herramientas para el óptimo manejo de recursos en el diseño de una maquina o estructura mecánica.

PALABRAS CLAVE

1. Optimización
2. Topológico
3. Diseño
4. Viga
5. Mecánica.

ABSTRACT

This article shows the importance of mechanical design for the daily life of society, the use of technologies and the use of computers allows us to obtain lighter and more economical mechanical structures (machines, roofs, stairs and others), thanks to topological optimization. Additionally, the theory on mechanical design,

mechanical resistance, the finite element method and its application to the optimization of resources is presented, and then ends with an application to a cantilever beam, in which it is evident that the percentage reduction in material it is 24.1%, from 78 kg to 59.2 kg, generating a lighter structure and with the corresponding structural safety; In relation to the safety factor, this decreased by 13.22% from 2.95 to 2.56, maintaining a reliability range for the cantilever beam type structure. Finally, it is mentioned that topological optimization in different mechanical structures benefits the designer by providing tools for optimal resource management in the design of a machine or mechanical structure.

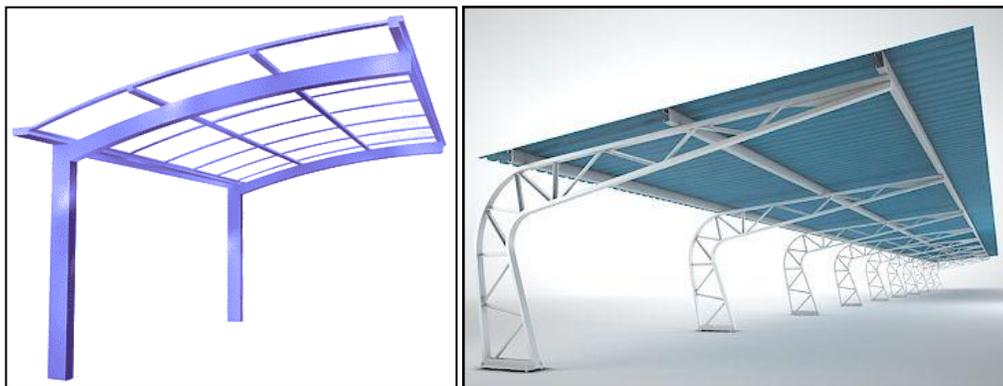
KEYWORDS

1. Optimization 2. Topological 3. Design 4. Beam 5. Mechanics.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día la importancia de construir máquinas e infraestructura mecánicas de manera rápida y económica se ha vuelto cada vez mayor y cuanto más con materiales de alta resistencia como el acero; en la actualidad se están buscando formas más efectivas de aprovechar este material y en el mejor de los casos algún posible sustituto, ver figura 1.

Figura 1. Estructura mecánica tipo techo.



Fuente: Tomado de <https://www.pngwing.com/en/free-png-toqie>

La necesidad de reducir recursos como ser: menor cantidad de material, estructuras más livianas, menor cantidad de elementos mecánicos, menor tiempo en montaje y otros, hace que el diseñador acuda a herramientas tecnológicas que permitan tal

fin. Una alternativa para el diseño y construcción de máquinas y/o infraestructuras mecánicas es la optimización topológica.

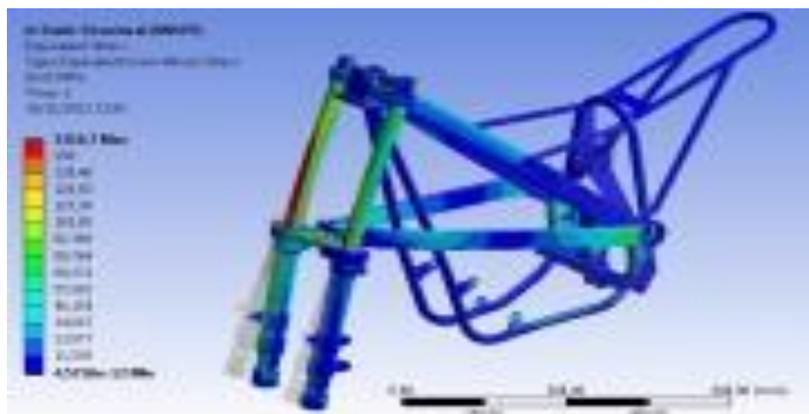
1.1. Diseño mecánico

El diseño mecánico es un proceso que demanda buenas horas de trabajo e investigación, en donde el involucrado (ingeniero, especialista o experto en el área) debe escoger la mejor geometría, el material correcto, y la resistencia adecuada para la aplicación a la cual será sometido el elemento o mecanismo modelado.

Según Niesbet, J., & Budynas, R. (2008) señala que el diseño es un proceso iterativo con muchas fases interactivas. Existen muchos recursos para apoyar al diseñador, entre los que se incluyen muchas fuentes de información y una gran abundancia de herramientas de diseño por computadora.

El procedimiento básico que se sugiere para el desarrollo de un determinado elemento mecánico, consiste en primer lugar del estudio geométrico, posterior a ello el análisis matemático y físico, la selección de materiales, el análisis de esfuerzos y para finalizar y muy importante la verificación de la resistencia mecánica. Con el avance de la tecnología este desarrollo se lo puede realizar con el manejo de software de diseño mecánico como ser: ANSYS, Solid Works, Catia, Autodesk Inventor y otros, las mismas que poseen excelentes beneficios. Ver figura 2.

Figura 2. Aplicación de software en el diseño mecánico



Fuente: Tomado de <https://eps.ujaen.es/la-escuela/motostudent/proyecto/disenomecanico>

1.2. Los esfuerzos principales

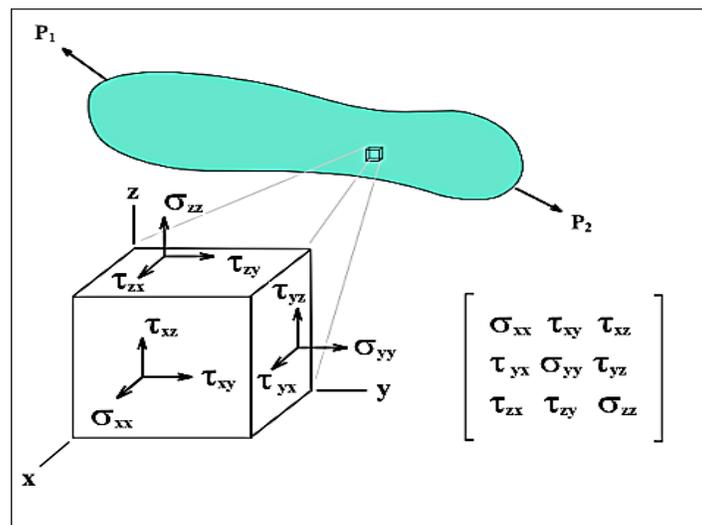
La aplicación de cargas en elementos mecánicos, figura 3, origina esfuerzos internos, que son representados por vectores en la cara de un cubo imaginario, las

las mismas que pueden ser cuantificadas mediante las siguientes formulas:

$$\sigma = \frac{M_z y}{I_z} \quad \tau = \frac{V Q}{I_z b}$$

Estas mismas formulas son aplicadas a una viga sometida a flexión y corte, en el cual, se puede apreciar un esfuerzo normal σ y el otro cortante τ , representado en un cubo imaginario (punto crítico) del elemento.

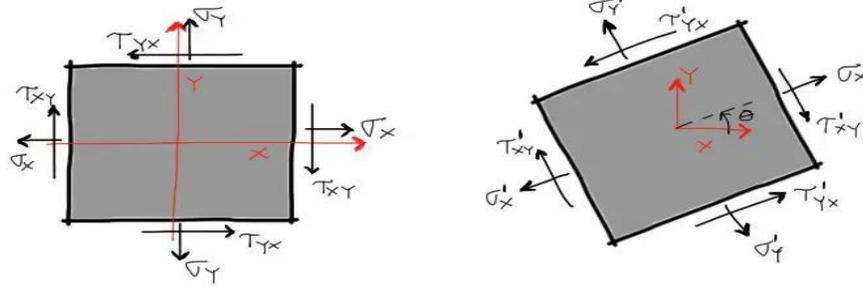
Figura 3. Esfuerzos internos en un elemento mecánico y cubo de esfuerzos



Fuente: Tomado de https://es.wikipedia.org/wiki/Esfuerzo_interno

De la figura 3 se observa el cubo de esfuerzos en el espacio, cabe señalar que estos valores (esfuerzos normal y cortante), no suelen presentarse a menudo, más al contrario suelen estar en un plano mediante aproximaciones para un análisis rápido y menos tedioso, ver figura 4.

Figura 4. Estado de esfuerzos en el plano



Fuente: Tomado de <https://marcelopardo.com/teoria-de-transformacion-de-esfuerzo-plano-circulo-de-mohr/>

El estado general de esfuerzos en el plano y en un punto de un elemento mecánico está representado por una combinación de dos componentes de esfuerzo uno normal como ser $(\sigma_x; \sigma_y)$ y el segundo cortante (τ_{xy}) que actúan en las 4 aristas (caras del elemento). Una característica de este estado de tensiones en el plano es que si esta se puede hacer rotar un ángulo θ , estos valores de esfuerzo pueden magnificar su valor a uno máximo y mínimo, mediante la siguiente expresión matemática:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (1)$$

Donde:

$\sigma_1 =$ esfuerzo principal máximo

$\sigma_2 =$ esfuerzo principal mínimo

La determinación de un esfuerzo principal máximo traerá un resultado de verificación en la resistencia de un determinado elemento, por ello su determinación es de gran importancia en el diseño mecánico.

1.3. Resistencia mecánica

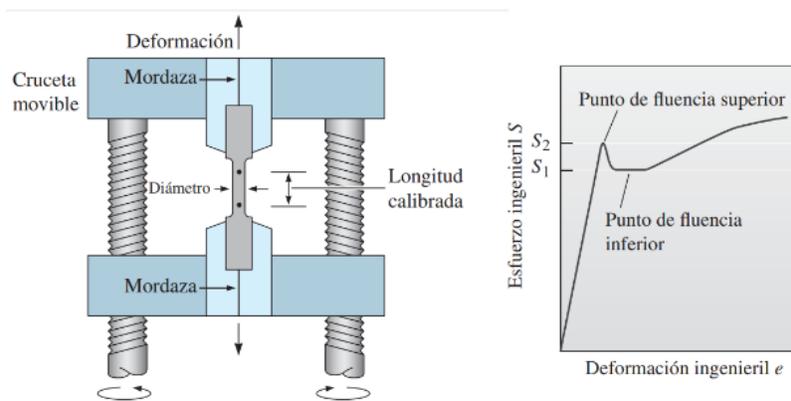
Las características mecánicas de un material indican el comportamiento de un material cuando se encuentra sometido a fuerzas externas, como por ejemplo el estiramiento de un material (cable de acero).

La resistencia mecánica es la capacidad de un material en oponerse a la deformación o ruptura ante la presencia de fuerzas o cargas externas.

El método más usual para evaluar si un material resiste con seguridad las cargas aplicadas es la comparación entre los esfuerzos reales en una pieza con la resistencia a la cedencia (fluencia σ_f) de un metal (Mott et al.,2009).

El ensayo de tracción, figura 5, es probablemente el tipo de ensayo más fundamental que se puede realizar a un material esto para determinar ciertas características que se requieran, como ser el valor de la fluencia, la tenacidad, el módulo de rigidez y otros (Askeland, D. R., & Wright, W. J., 2017).

Figura 5. Ensayo de tracción a materiales



Fuente: Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2017).

Por lo general la **resistencia mecánica** de un elemento se lo denota por S_y que significa que el material no debe sobrepasar el valor de la fluencia σ_f en el ensayo de tracción, lo que conlleva a la siguiente ecuación

$$S_y = \sigma_f \quad (2)$$

En esta parte aparece un nuevo termino de prevención y cuidado que es el factor de seguridad F.S. o la letra griega η

$$S_y = \frac{\sigma_f}{\eta} \quad (3)$$

Donde η corresponde a un factor de seguridad de diseño mecánico, y que este valor nunca debe ser menor a 1, ya que la misma generaría el termino llamado **FALLA MECANICA**, por ello, este valor debe ser siempre mayor a 1.

Para verificar si un elemento sometido a cargas externas resiste, se debe hacer una comparación del valor máximo determinado en el elemento σ_1 y S_y , donde la resistencia mecánica siempre debe ser mayor al esfuerzo principal máximo caso contrario ocurrirá la mencionada falla mecánica del elemento.

$$\sigma_1 = S_y \quad (4)$$

La ecuación 4, corresponde a uno de los criterios de verificación que se lo denomina **CRITERIO DE TENSION NORMAL MAXIMA**, la misma compara la tensión normal máxima en un punto crítico de un elemento con la resistencia mecánica, es aquí donde la falla mecánica inicia, cuando se cumple la igual de ambas ecuaciones.

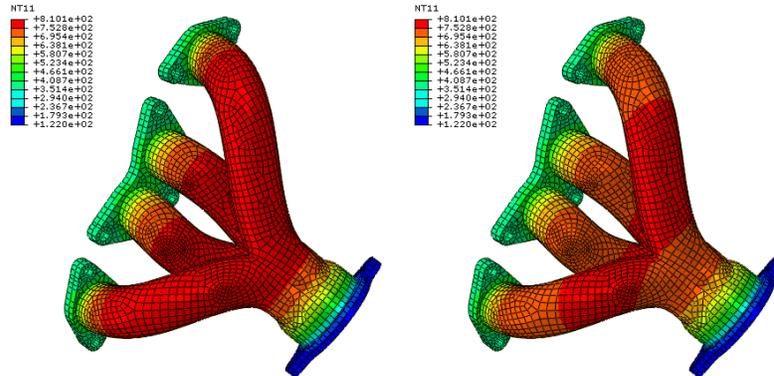
1.4. El método de elementos finitos (MEF)

El método de elemento finito es un método numérico empleado para resolver problemas en las ramas de las ciencias exactas y la ingeniería. Es una técnica numérica utilizada para aproximar soluciones a ecuaciones diferenciales parciales que involucra dividir la pieza en estudio a elementos muy pequeños y finitos mediante la discretización. De forma general, el método de los elementos finitos consiste en la discretización del medio continuo (o sea, es dividirlo imaginariamente en sub-dominios llamados elementos finitos) (Molina P. J., 2010).

Adicionalmente este método de elemento finito (MEF), a veces llamado análisis de elemento finito (AEF), es una técnica computacional usada para obtener soluciones aproximadas de problemas con valores límite en diversos campos de la ingeniería (Nápoles et al., 2015).

Con el avance de la tecnología y de las computadoras, la aplicación del MEF puede ampliarse a modelos mucho más complejos y con relativa facilidad al análisis de esfuerzos y deformaciones en automóviles, aeronaves, edificios y estructuras de puentes hasta el análisis en los campos de flujo de calor, de fluidos, magnético y otros (Chandrupatla, T., 1999). Ver figura 6.

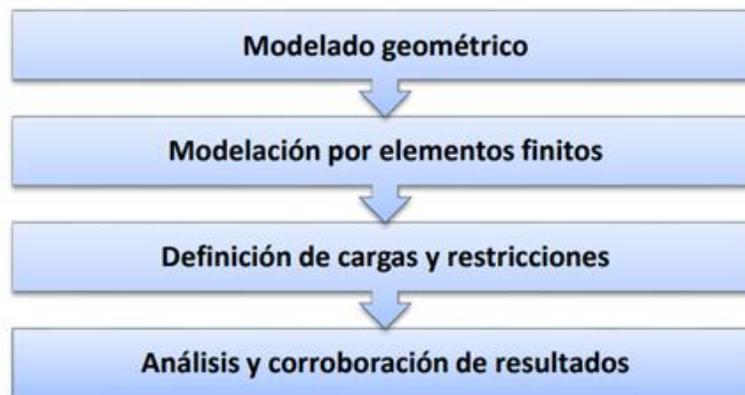
Figura 6. Aplicación del MEF al flujo de calor al escape vehicular



Fuente: Obtenido de <https://www.4realsim.com/es/analisis-termico-fem-por-conduccion-conveccion-y-radiacion/>

El proceso de modelado o análisis por elemento finito a un elemento se puede describir mediante el siguiente esquema, ver figura 7.

Figura 7. Proceso de modelado del MEF



Fuente: Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Raide-Gonzalez-Carbonell/publication/283151622_Una_introduccion_al_Analisis_por_Elementos_Finitos_aplicaciones_y_ejemplos/links/595a83e145851511773d2b04/Una-introduccion-al-Analisis-por-Elementos-Finitos-aplicaciones-y-ejemplos.pdf

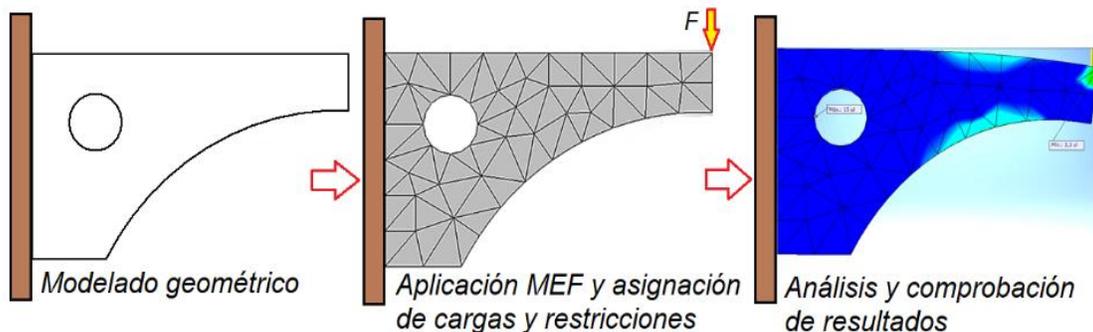
De acuerdo a especialistas y a los que se dedican al diseño mecánico, este proceso de modelamiento se describe de la siguiente manera:

- **Etapas del modelado geométrico:** La presente etapa consiste en la representación a priori de cómo se verá la pieza a ser diseñada, considerando cálculos de manera aproximada. Para ello se hace uso de un paquete CAD que permite visualizar tanto en 2D como en 3D la pieza a ser diseñada.

- **Aplicación del método de elementos finitos:** Utilizando un software apropiado se inicia con la discretización o la subdivisión de la geometría del modelo en elementos discretos, para posteriormente asignar las propiedades del material a ser utilizado.
- **Asignación de cargas y restricciones:** Posterior a la selección de las características del material se asignan las cargas y las restricciones del elemento o pieza a ser analizado. La selección del material, restricciones y cargas debe ser lo más importante en esta etapa, ya que un error cometido generaría resultados catastróficos.
- **Análisis y corroboración de resultados:** Finalizado la etapa de modelamiento del elemento se procede al análisis de los efectos de las cargas, enmallado, material y otros, para la obtención de resultados (tensiones, deformaciones, y otros.) a partir de análisis estáticos o dinámicos, para luego compararlos con los criterios de diseño que se emplea. Cuando los criterios no son satisfechos se procede al rediseño de la pieza y repetir el proceso si fuese necesario.

Como se mencionó anteriormente este proceso de modelamiento debe regirse al pie de la letra según las descripciones señaladas en párrafos anteriores, para así de esta manera evitar errores no deseados. Como resumen a la aplicación de esta metodología se tiene la figura 8, que ejemplifica tal procedimiento.

Figura 8. Proceso de modelamiento en la aplicación del MEF



Fuente: Elaboración propia

En la actualidad la utilización del método de elemento finito MEF ha crecido en gran manera, esto debido a la utilización de computadores de gran capacidad y softwares

avanzados. Entre la gran variedad de programas comerciales de Elementos Finitos se encuentran: AUTODESK INVENTOR, SOLIDWORKS, ANSYS, ABAQUS y COSMOS/M y otros.

1.5. Optimización topológica

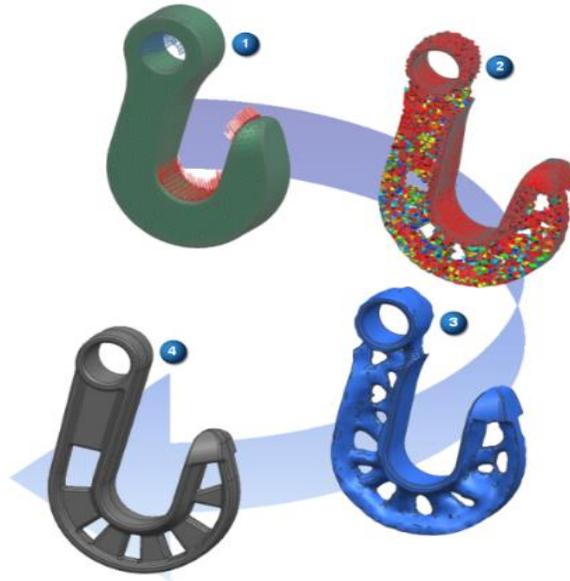
La necesidad de reducir material u otros recursos en el diseño de productos ha llevado a diferentes industrias a investigar nuevas alternativas para el diseño y fabricación de sus componentes mediante la optimización topológica.

La optimización topológica a un elemento a ser diseñado, consiste en dar una forma óptima a un medio continuo con la principal característica de maximizar o minimizar la masa del objeto, elevar la rigidez de una estructura, reducir las concentraciones de esfuerzos u otros; generando condiciones de restricción a la geometría del objeto, tensión o los desplazamientos (Durgun, I., y Yildiz, A. R., 2012).

De acuerdo a Meza Valencia C. A. (2012) establece que la optimización topológica es un campo de la investigación donde intervienen diferentes ramas de la ciencia como ser las matemáticas, la mecánica, la informática, y otras, que contribuyen a diferentes áreas de la industria y en especial al sector manufacturero con el diseño y mecanizado de mecanismos flexibles, por ejemplo.

Con el avance de la tecnología y en especial de las computadoras, este proceso de optimización se hace cada vez más sencillo, con los pasos adecuados y el correcto uso de un ordenador y su correspondiente software se logran excelentes resultados, tal cual, como se evidencia en la figura 9.

Figura 9. Proceso de Optimización Topológica de un Gancho mecánico. 1) Diseño del área y optimización. 2) Modelo optimizado. 3) Geometría de referencia a ser considerado. 4) Gancho diseño por software CAD-CAE.



Fuente: Tomado de: Nx Topology optimization.
https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/10/nx_help#uid:index_advanced:xid384581:id1262387

1.6. Aplicación de software para la optimización topológica

Para el desarrollo de elementos en particular o máquinas donde interiormente llevan sus respectivos mecanismos, se deben realizar diseños y sus correspondientes cálculos de forma manual, la misma que llevan una gran cantidad de tiempo en su ejecución, es por tal situación que se opta por el manejo de paquetes computacionales como ser los CAD.

El software CAD (Diseño Asistido por Computadora) es un conjunto de herramientas informáticas que permiten la creación, modificación y optimización de objetos físicos de manera virtual tanto en dos o tres dimensiones.

De acuerdo a Soba (2016) señala que el diseño asistido por ordenador, CAD, “Es una de las tecnologías que se basan en el uso de sistemas informáticos como herramienta de soporte en los procesos involucrados en el diseño y la fabricación de los productos”.

En el presente documento, se hará uso del software Autodesk Inventor para la aplicación en la optimización topológica a una viga tipo voladizo, adicionalmente se debe señalar que en la actualidad existen diferentes paquetes computacionales

tanto libres y de compra que permiten al diseñador hacer uso de estos para un determinado diseño.

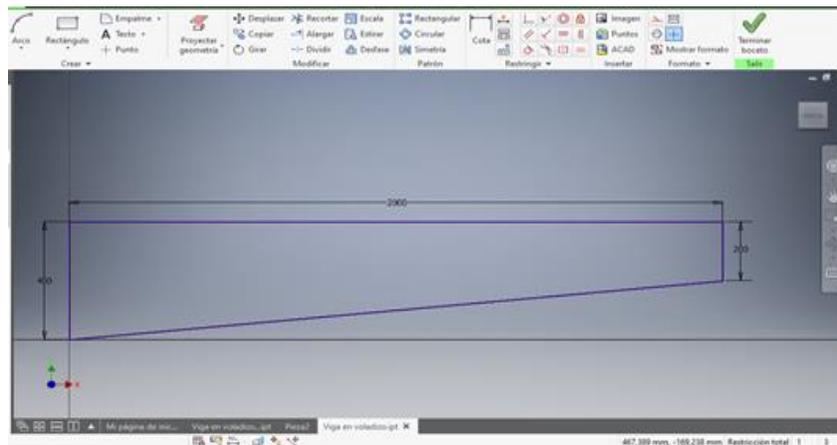
2. DESARROLLO

Para el desarrollo de la presente investigación se realizará una comparación de una viga tipo voladizo entera y una optimizada en material (optimización topológica), con la principal característica de que no exista la llamada falla mecánica.

Análisis en simulación

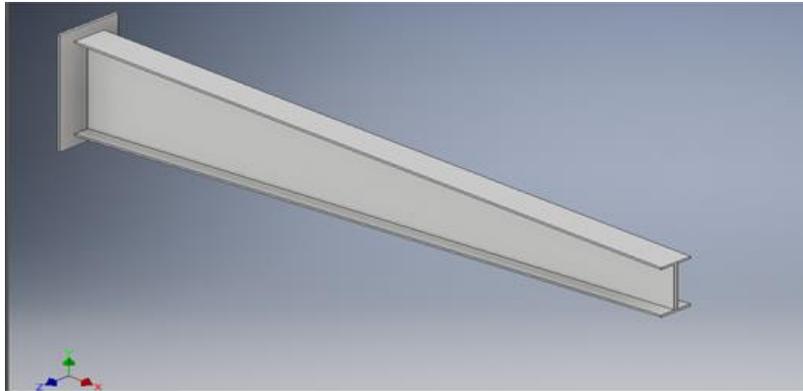
En primera instancia se realiza el bosquejo de la estructura a ser diseñada (viga tipo voladizo) con los datos y cálculos necesarios, ver figuras 10 y 11, posteriormente se procede a la optimización de la estructura y su verificación a la resistencia mecánica.

Figura 10. Bosquejo de la viga en voladizo



Fuente: Elaboración propia

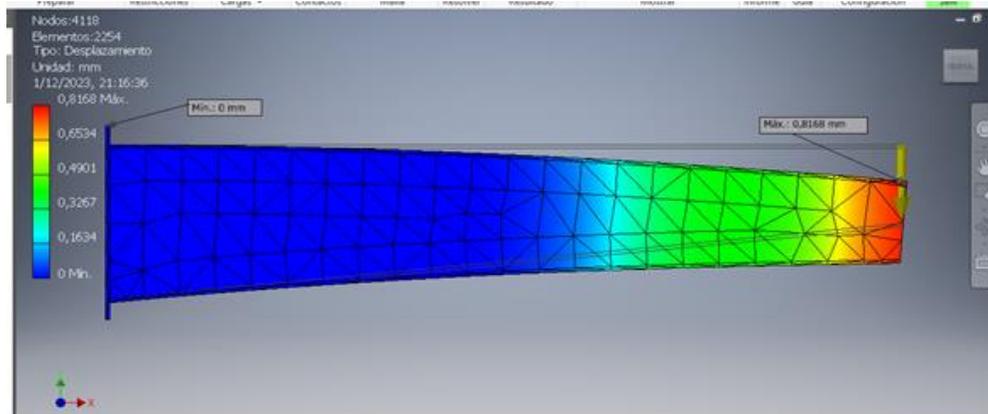
Figura 11. Isométrica de la viga en voladizo



Fuente: Elaboración propia

Se verifica la resistencia mecánica ante las cargas propuestas mediante el simulador Autodesk Inventor, ver figura 12.

Figura 12. Verificación de la resistencia mecánica de la estructura tipo viga

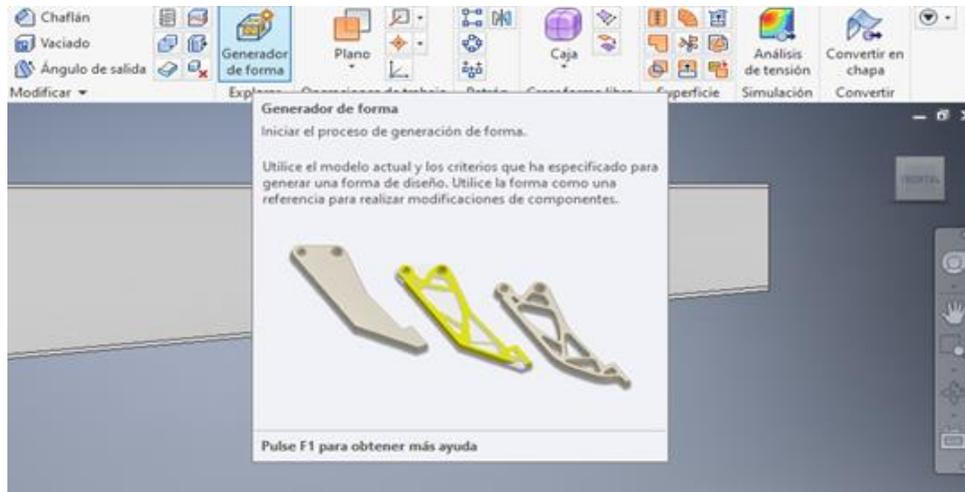


Fuente: Elaboración propia

En la figura 12, se evidencia que la estructura posee una resistencia adecuada de un F.S. igual a 2,95, la misma que no provocará una falla mecánica.

Una vez finalizada la comprobación de resistencia mecánica a la estructura, se procede a su optimización mediante el generador de forma del software Autodesk Inventor, ver figura 13.

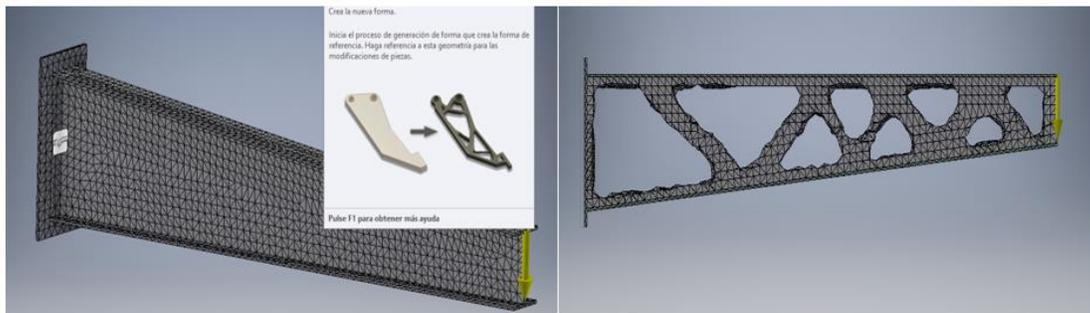
Figura 13. Optimización topológica en Autodesk Inventor



Fuente: Elaboración propia

Se procede a la asignación de valores de carga y restricciones, con el propósito de optimizar material en el diseño de una viga tipo volatizo. Ver figura 14.

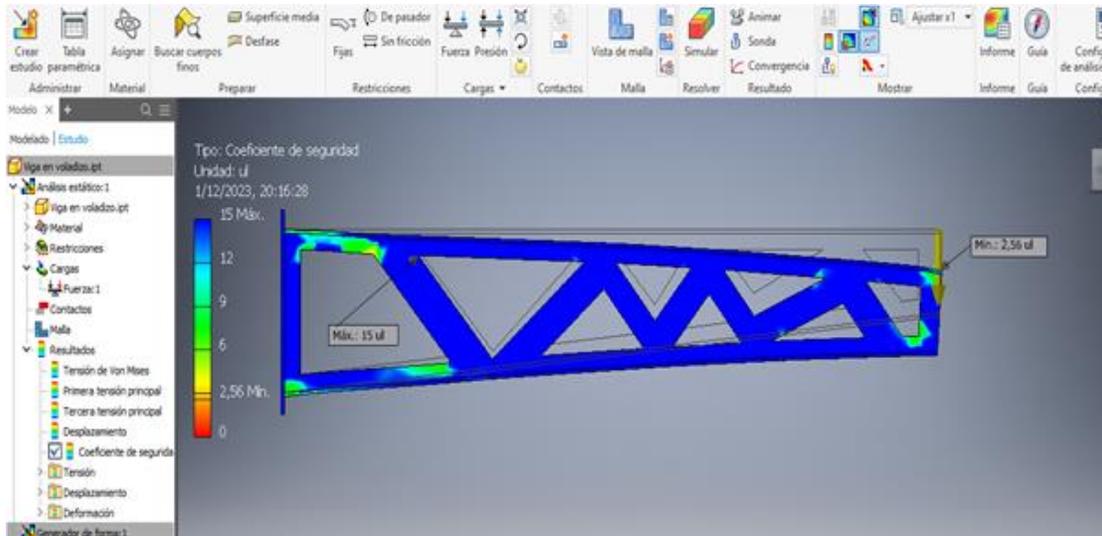
Figura 14. Asignación de carga y restricciones a la estructura



Fuente: Elaboración propia

Afinando el diseño de la nueva estructura mecánica se procede a su comprobación de la resistencia mecánica. Utilizando el software de diseño se obtiene lo siguiente, ver figura 15.

Figura 15. Verificación de la resistencia mecánica a la estructura tipo viga



Fuente: Elaboración propia

En la figura 15, se evidencia que la estructura mecánica tipo viga en voladizo posee una excelente resistencia mecánica con un F.S.=2,56, señalando que en la misma no ocurrirá la llamada falla mecánica.

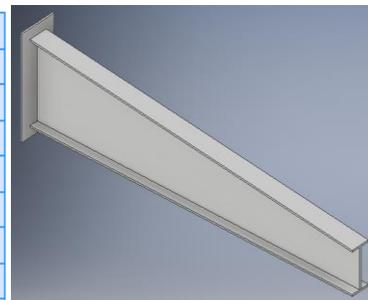
3. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En las figuras 16 y 17 se evidencian los resultados del proceso de optimización topológica de una viga tipo voladizo, en la cual, se observa que el material fue reducido en 24.1 % de 78 kg a 59,2 kg, la misma que proporciona una estructura mecánica más liviana sin afectar la seguridad de la misma.

Figura 16. Análisis de resultados de la viga sólida

Resumen de resultados

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	9934180 mm ³	
Masa	77,9833 kg	
Tensión de Von Mises	0,000467516 MPa	70,1911 MPa
Primera tensión principal	-11,4607 MPa	67,6004 MPa
Tercera tensión principal	-61,0692 MPa	16,3226 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,816731 mm
Coefficiente de seguridad	2,94909 su	15 su

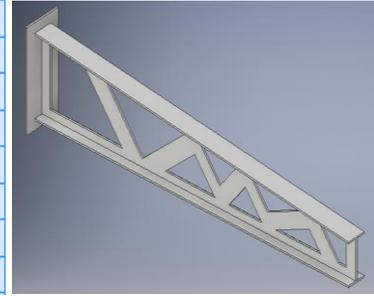


Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Análisis de resultados de la viga optimizada

☐ Resumen de resultados

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	7545800 mm ³	
Masa	59,2345 kg	
Tensión de Von Mises	0,00136375 MPa	80,9391 MPa
Primera tensión principal	-18,2121 MPa	88,7158 MPa
Tercera tensión principal	-68,7288 MPa	8,88524 MPa
Desplazamiento	0 mm	1,08391 mm
Coefficiente de seguridad	2,55748 su	15 su



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la seguridad de la estructura se evidencia que se tiene un descenso del factor de seguridad F.S. del 13,22 %, de 2,95 a 2,56, lo que señala una disminución en la resistencia mecánica. Se debe recordar que la seguridad o factor de seguridad debe ser mayor a 1.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos evidencian que el uso de un software para la optimización topológica de una viga tipo voladizo, permiten un mejor manejo en los recursos de una empresa, generando disminución de costos en material, menor capacidad en equipos de izaje, menor tiempo de ensamble, estética y otros.

El uso de softwares como ser Solid Works, Autodesk Inventor y otros, permite con suficiente exactitud determinar los esfuerzos máximos producidos por cargas externa, deformaciones y el factor de seguridad en un elemento mecánico. Los resultados de una simulación por medio de estos softwares permiten obtener soluciones rápidas y de manera sencilla, donde los estudiantes en ingeniería pueden simular y analizar diferentes procesos de diseño de prototipos, manufactura, optimización del rendimiento, reducción de costos de fabricación y sobre todo una optimización de su tiempo.

Esta poderosa herramienta de diseño ha mejorado en gran forma, el estándar de diseños en ingeniería y la metodología de proceso de producción en muchas aplicaciones industriales. Los beneficios van más allá de solo una alta precisión, un diseño mejorado, una mejor percepción de los parámetros críticos de diseño,

generación de prototipos virtuales, menores costos en el desarrollo de productos, ciclo de diseño más rápido y económico, alza en la productividad y otros.

5. BIBLIOGRAFÍA

Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2017). Ciencia e ingeniería de materiales. Cengage learning.

Chandrupatla, T. (1999). Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería (Segunda ed.). Prentice Hall.

Durgun, I., & Yildiz, A. R. (2012). Structural design optimization of vehicle components using cuckoo search algorithm. *Materials Testing*, 54(3), 185-188.

Meza Valencia Carlos Alberto (2012). Optimización topológica en el diseño de elementos estructurales mecánicos, Santiago de Calí, Colombia, Universidad Autónoma de Occidente.

Molina P. Jaime G. (2010). Fundamentos del Método de Elemento Finito, Bolivia, U.M.S.A.

Mott, R. L., Salas, R. N., Flores, M. A. R., & Martínez, E. B. (2009). Resistencia de materiales (Vol. 5). Pearson Educación.

Nápoles, E., Gonzáles, R., & Olivares, E. (2015). Una Introducción al análisis por Elementos finitos: Aplicaciones y ejemplos. *ResearchGate*, September, 109.

Niesbet, J., & Budynas, R. (2008). Diseño en Ingeniería mecánica de Shigley. México: McGrawHill.

Rodríguez, E. A. (2005). *Metodología de la investigación* (Primera ed.). Tabasco, Mexico: Independiente.

Soba Toquero, Mario. (2016). "Diseño Del Mecanismo de Un Retrovisor de Automóvil Con Autodesk Inventor Professional".

6. ANEXOS

RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE LA VIGA ORIGINAL

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	9934180 mm ³	
Masa	77,9833 kg	
Tensión de Von Mises	0,000467516 MPa	70,1911 MPa
Primera tensión principal	-11,4607 MPa	67,6004 MPa
Tercera tensión principal	-61,0692 MPa	16,3226 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,816731 mm
Coeficiente de seguridad	2,94909 su	15 su
Deformación equivalente	0,00000000214677 su	0,000280483 su
Primera deformación principal	-0,00000000263369 su	0,000296201 su
Tercera deformación principal	-0,000260451 su	0,0000267124 su

RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE LA VIGA OPTIMIZADA

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	7545800 mm ³	
Masa	59,2345 kg	
Tensión de Von Mises	0,00136375 MPa	80,9391 MPa
Primera tensión principal	-18,2121 MPa	88,7158 MPa
Tercera tensión principal	-68,7288 MPa	8,88524 MPa
Desplazamiento	0 mm	1,08391 mm
Coeficiente de seguridad	2,55748 su	15 su
Deformación equivalente	0,00000000553076 su	0,000331909 su
Primera deformación principal	-0,00000145667 su	0,000369964 su
Tercera deformación principal	-0,000296172 su	0,00000000869954 su



Todos los Derechos Reservados
Carrea de Ingeniería Industrial, Noviembre - 2023
La Paz - Bolivia

Carrera de Ingeniería Industrial
Acreditada al Sistema ARCU-SUR, del MERCOSUR Educativo

Carrera de Ingeniería Industrial
Unidad Académica Acreditada
Comite Ejecutivo de la Universidad Boliviana

Av. Mcal. Santa Cruz N° 1175
Plaza del Obelisco
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingenieria
Tel. 2205000 - 2205067 Int. 1402

Campus Universitario - Cota Cota, calle 30

Web: industrial.umsa.bo
Email: ingindustrial@umsa.bo
revistaindustrial4.0@umsa.bo

industrial.umsa.bo / iiifi.umsa.bo / inuisiso.umsa.bo / iniam.umsa.bo



*Carrera de Ingeniería Industrial
85 Años Formando
Profesionales Exitosos*

Bodas de Marmol

85

Años