



HAL
open science

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA ESTRUCTURAL APLICADA EN INGENIERÍA MECÁNICA

Jersson Xavier Leon-Medina, Leydi Julieta Cardenas-Flechas

► **To cite this version:**

Jersson Xavier Leon-Medina, Leydi Julieta Cardenas-Flechas. OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA ESTRUCTURAL APLICADA EN INGENIERÍA MECÁNICA. II Congreso Internacional y V Nacional de Ingeniería Electromecánica, Oct 2017, Paipa, Colombia. hal-01715677

HAL Id: hal-01715677

<https://hal.science/hal-01715677v1>

Submitted on 22 Feb 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA ESTRUCTURAL APLICADA EN INGENIERÍA MECÁNICA

Jersson X. Leon-Medina ^{a,b} y Leydi J. Cardenas-Flechas ^{c,d}

^a Facultad de Ingeniería Mecánica, Grupo de Investigación y Desarrollo de Ingeniería en Nuevas Tecnologías (GIDINT), Universidad Santo Tomás Seccional Tunja,
jersson.leon@usantoto.edu.co

^b Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Estudiante de Doctorado en Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá,
jxleonm@unal.edu.co

^c Escuela de Ingeniería Electromecánica, Joven Investigador UPTC, Grupo de Investigación en Energías y Nuevas Tecnologías GENTE, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
julicf-08@hotmail.com

^d Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Estudiante de Maestría en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá,
ljcardenasf@unal.edu.co

Resumen— La enseñanza del diseño en ingeniería mecánica, ha sido trascendida desde el uso de la simulación computacional, para verificar diseños realizados sin necesidad de fabricarlos. La optimización topológica estructural usa el métodos de los elementos finitos y programación matemática para buscar la mejor distribución de material en un dominio de trabajo, de acuerdo a una función objetivo como puede ser la de maximizar la rigidez o minimizar la masa de un componente teniendo en cuenta los esfuerzos que soporta; este trabajo busca exponer y comparar diferentes herramientas que se encuentran en la literatura para realizar optimización topológica y con ello brindar una ayuda al estudiante de ingeniería mecánica, con la cual apoyarse mediante la simulación computacional y realizar mejores diseños, el desarrollo del presente trabajo comienza con la descripción del proceso de optimización topológica, sus partes y métodos de solución, además se contrastan diferentes códigos existentes en la literatura que realizan optimización topológica, para utilizar en el proceso de enseñanza aprendizaje, en donde el estudiante modifique líneas de código y comprenda mejor el comportamiento del proceso de optimización. Finalmente, aprovechando algunos métodos de fabricación avanzada como el prototipado rápido se construirán modelos de geometría compleja, como los obtenidos por optimización topológica.

Palabras clave— Mecánica computacional, optimización topológica, método de los elementos finitos, reducción de peso

Abstract— *The teaching of design in mechanical engineering has been transcended from the use of computer simulation, to verify designs made without the need to manufacture them. Structural topology optimization uses finite element methods and mathematical programming to find the best distribution of material in a working domain, according to an objective function such as maximizing stiffness or minimizing the mass of a component; This work seeks to expose and compare different tools found in the literature to perform topology optimization and also seeks to provide mechanical engineering students with a tool to make better designs of their parts. The development of the present work begins with the description of the topology optimization process, its parts and methods of solution, in addition to contrasting different codes in the literature that perform topology optimization, to be used in the teaching-learning process, where the student modifies lines of code and better understand the behavior of the optimization process. Finally, taking advantage of some advanced manufacturing methods such as rapid prototyping will be built models of complex geometry, such as those obtained by topology optimization.*

Keywords— Computational mechanics, topology optimization, finite element method, weight reduction.

I. INTRODUCCIÓN

En la optimización topológica (OT) estructural se busca que la distribución de material en un componente sea óptima respecto a algún criterio como minimizar la energía interna de deformación lo que significa maximizar la rigidez, minimizar los esfuerzos dentro de la estructura, minimizar la deformación debido a vibraciones, entre otros (Groenwold y Etman, 2009). La optimización topológica fundamenta sus bases en conceptos de mecánica del medio continuo, cálculo de variaciones y programación matemática (Bendsøe y Sigmund, 2003). Los principios de la optimización topológica fueron dados por Michell A. en 1904 (Michell, 1904), quien desarrolló un método para minimizar el peso de estructuras compuestas por barras delgadas. Con los avances en computación desarrollados en el siglo XX la OT ha tenido una evolución tal, que en la actualidad se usa como una herramienta computacional de diseño de componentes mecánicos y puede ser aplicada para resolver diversos problemas en ingeniería (Deaton y Grandhi, 2014). La técnica de OT no fue explotada totalmente sino hasta la década de los ochenta cuando se implementó el método de los elementos finitos para apoyarse en herramientas computacionales ya que la complejidad de los problemas de OT involucra un gran número de variables (Leon-Medina, 2016). En 1988 el trabajo de Bendsøe M. y Kikuchi N. fue pionero en el desarrollo de métodos numéricos para optimización topológica, dicho trabajo relaciona el método de homogeneización en el cual se asigna una microestructura a cada elemento del dominio de diseño, dicha microestructura está conformada por cavidades distribuidas en el material base (Bendsøe y Kikuchi, 1988). El problema de optimización topológica se plantea como la búsqueda de la distribución óptima de estas cavidades, en el que las variables de diseño a nivel macroestructural son las densidades de cada elemento.

El diseño estructural por optimización topológica se puede dividir en dos tipos de estructuras: las discretas y las continuas, en este trabajo se seleccionaron las estructuras continuas, en las cuales se parte de un dominio completo inicial y se busca la mejor distribución de material, sin que el resultado final este compuesto por barras con un perfil específico determinado.

En 2014, Deaton y Grandhi explican los nuevos desarrollos de la OT basada en elementos finitos, describiendo los avances en algunos métodos para resolver problemas acoplados de diversos campos de la ingeniería como problemas fluido-estructura o termomecánicos. En particular, el artículo describe cuatro grupos de métodos de optimización topológica: a) métodos basados en densidades SIMP, b) métodos denominados hard-kill como el ESO, c) métodos de variación de contornos como el de nivel fijo o el de campo de fase (level set y phase field en inglés) y d) métodos bio-inspirados en división celular (Deaton y Grandhi, 2014).

A continuación se ilustra el proceso de optimización topológica y se comparan diferentes códigos disponibles en la literatura, para con ello identificar las ventajas que brinda cada uno y sugerir una metodología sobre como enseñar este conocimiento en ingeniería mecánica.

II. MATERIALES Y MÉTODOS.

La mecánica computacional ha sido un área de la ingeniería mecánica que ha evolucionado en los últimos 70 años, con la aparición de los computadores, el método de los elementos finitos y la implementación de los métodos numéricos para resolverlos (Bendsøe y Sigmund, 2003). A finales de los años 80, la comunidad científica relacionada con optimización estructural quería encontrar los mejores diseños de estructuras continuas y para ello unieron algoritmos de programación matemática con el método de los elementos finitos para encontrar el mínimo de una función objetivo, como puede ser la energía de deformación interna en una estructura o lo que es lo mismo, maximizar la rigidez de la misma (Bendsøe, 1989).

Uno de los software que utiliza un lenguaje de programación de alto nivel utilizado en la academia para simular métodos numéricos es Matlab, con bastantes herramientas matemáticas que facilitan la implementación y comprensión al estudiante de algoritmos que él mismo puede realizar (Torres-Barahona et al., 2017), con el fin interiorizar mejor los conocimientos adquiridos, al comprender el modelamiento matemático del problema a resolver, las ecuaciones de gobierno, sus variables y métodos de solución.

Las habilidades de creación de software que puede interiorizar y perfeccionar un estudiante, se pueden mejorar con el desarrollo de proyectos, ya que estos requieren escribir todas las partes de un algoritmo e inclusive crear funciones que realicen actividades específicas, que podrá utilizar nuevamente en el futuro. El análisis numérico y las habilidades computacionales son utilizados en asignaturas de simulación en ingeniería mecánica, como el análisis estructural por elementos finitos y la dinámica computacional de fluidos, es por esto que el uso de software en el aula debe convertirse en una práctica cotidiana para apoyar y mejorar los procesos de enseñanza aprendizaje (Sorby et al., 1999).

Formulación del problema matemático de optimización topológica

Teniendo en cuenta la minimización de la energía de deformación como la función objetivo, la formulación del problema de optimización topológica se puede realizar de la siguiente manera (Leon-Medina, 2016):

$$\min : C(x) = U^T K U = \sum_{i=1}^N x_i u_i^T k_i u_i \quad (1)$$

$$\text{Sujeto a: } \begin{cases} \frac{V(x)}{V_0} = f \\ KU = F \\ x_i = x_{\min} \text{ or } 1 \end{cases}$$

Donde U y F son los vectores de desplazamiento y fuerza global, respectivamente, K es la matriz de rigidez global, V_x y V_0 son el volumen de material y el volumen de dominio de diseño, respectivamente, f es la fracción de volumen de material deseada, x_i es la variable de diseño, que toma el valor de 0 o 1, $x_i = 0$ representa un elemento vacío o de cavidad y $x_i = 1$ representa conservar el material del elemento y por lo tanto dejarlo sólido, y N es el número de elementos totales de una estructura.

III. DESARROLLO DEL TRABAJO

Apoyándose en software CAD-CAE de interfaz gráfica el proceso de optimización topológica con función objetivo minimizar masa, puede ser mejor ejemplificado en la Fig.1, que ilustra el proceso de optimización topológica completo, comenzado desde la pieza CAD original hasta

terminar con el modelo final optimizado de menor peso (Johnsen, 2013). En este proceso se puede ver cómo hay que verificar al obtener el diseño final, el comportamiento con respecto a esfuerzos y deformaciones para asegurarse que el componente final tenga un adecuado rendimiento al contar con un correcto factor de seguridad definido por el diseñador.

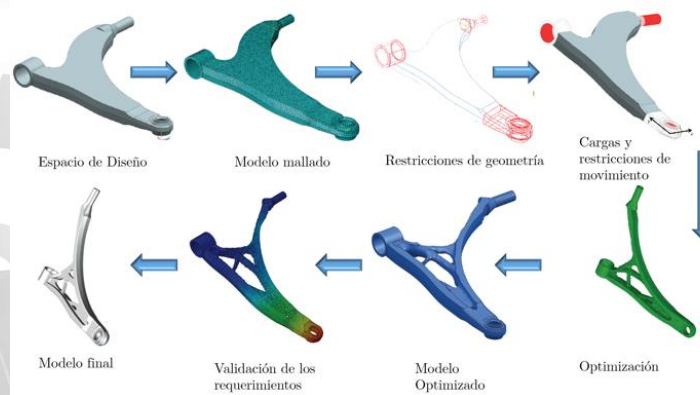


Fig. 1. Etapas del Proceso de Optimización Topológica. Fuente: (Johnsen, 2013).

El grupo de investigación TopOpt de la universidad técnica de Dinamarca, es reconocido a nivel mundial por sus avances en el campo de la optimización topológica y uno de sus esfuerzos se ha concentrado en el de la pedagogía del proceso a través de la creación de diferentes applets y software entre los que se encuentra una aplicación para tablets y celulares, códigos en matlab, códigos en python, códigos en la librería Petsc para problemas de gran escala y un programa para computadores de escritorio llamado TopOpt 3D (TopOpt Research Group, 2017) ilustrado en la Fig.2, la cual muestra el resultado de optimización para una viga en voladizo para cuatro diferentes porcentajes de volumen.

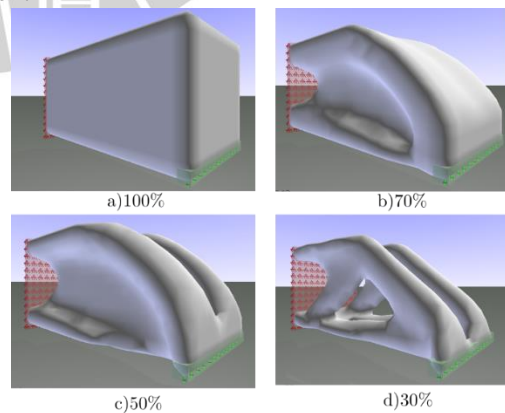


Fig. 2. Resultado de optimización topológica para viga en voladizo en el software TopOpt 3D. Fuente: (TopOpt Research Group, 2017)

VIGILADA MINEDUCACIÓN

IV. RESULTADOS

En la literatura se encuentran algunos códigos escritos en matlab para resolver problemas de optimización topológica entre los que se encuentran: el método BESO (Huang y Xie, 2010), método SIMP (Andreassen et al., 2011), TOP3D- SIMP (Liu y Tovar, 2014) y BCBTOA-Quimiotaxis de Bacterias (Leon-Medina et al., 2017). Este último, el método BCBTOA (Bacterial Chemotaxis Based Topology Optimization Algorithm) se ha convertido en un acercamiento que optimiza los diseños entregando modelos de densidad absoluta sin variables intermedias (Leon et al., 2014) y que ha sido probado en vigas bidimensionales logrando la eliminación de checkerboards e independencia de malla, además funciona adecuadamente para problemas de alta y baja fracción de volumen (Leon et al., 2016), así como se compone de pocos parámetros a configurar, dentro de los que se encuentra el radio de comunicación entre bacterias R , que representa un esquema de regularización para controlar el tamaño de los miembros en la estructura (Leon-Medina et al., 2017).

La viga en voladizo con carga centrada en el extremo inferior derecho mostrada en la Fig. 3 fue tomada como problema de prueba para utilizar el método BCBTOA en su solución, se discretizó el dominio en 640 (32 x 20) elementos finitos cuadrilaterales rectangulares. En la Fig. 3 se aprecia en la parte derecha arriba la viga optimizada al 50 % de volumen a través del método SIMP, esto para referenciar la topología obtenida y ver su similitud con el método BCBTOA.



Fig. 3. Resultados de optimización topológica para viga en voladizo comparación método SIMP Y BCBTOA para diferentes porcentajes de volumen a)50% b) 60% c) 70% y d) 80% Fuente: (Leon-Medina, 2016).

En 2014 Liu y Tovar desarrollaron un código en matlab para resolver problemas de optimización topológica en 3D, este puede ser aplicado para problemas de minimización de compliance, mecanismos flexible o transferencia de calor, además, incluye el desarrollo de una GUI de interfaz gráfica y la opción de exportar los diseños en formato STL para impresión 3D (Liu y Tovar, 2014). En la Fig. 4 se muestra un diseño de viga en voladizo obtenida por el código de (Liu y Tovar, 2014), discretizada en 60x20x4 elementos cúbicos y su correspondiente archivo en formato STL para ser usado en impresión 3D.

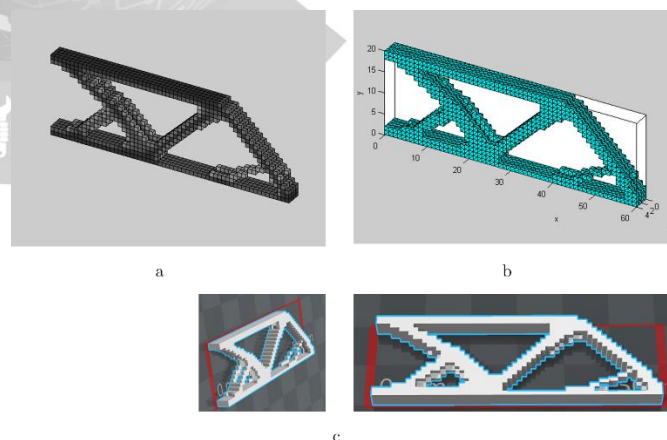


Fig. 4. Resultados de optimización topológica para viga en voladizo obtenidos con el código de 169 líneas TOP3D para 30% de porcentaje de volumen a)Diseño inicial con filtro de densidades b) Discretización STL c) Modelo STL. Fuente: (Liu y Tovar, 2014),

Como último ejemplo a continuación se muestran los resultados de optimización topológica utilizando el software NX comparando los valores de desplazamiento y esfuerzo de una pieza no optimizada versus una optimizada. En la Fig. 5 se muestra el análisis estático lineal para un modelo inicial de prisma de acero de tamaño 100*50*15mm peso original de 587.1 gr. El estado de carga es voladizo y se refiere a una restricción fija en la cara posterior y una fuerza de 1000 N en dirección $-x$ en la cara anterior (hacia abajo como lo muestra la flecha roja). Para este caso inicial, los resultados de desplazamiento y esfuerzo Von-Mises máximo fueron 0.0127mm y 17.98 Mpa respectivamente.

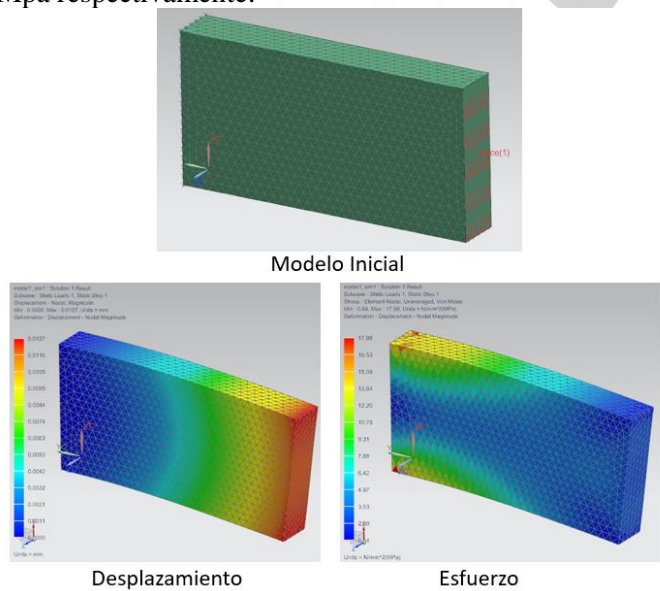


Fig. 5. Análisis estático lineal para un modelo inicial de prisma de acero. Resultados de Desplazamiento y Esfuerzo Von-Mises

Después de realizar el proceso de optimización topológica en el software NX. Se realiza un análisis estático lineal para el modelo CAD optimizado al 63% de volumen de prisma de acero, el cual posee ahora un peso de 370 gr. El estado de carga es voladizo y se refiere a una restricción completa en los elementos posteriores y una fuerza de 1000 N en dirección $-x$ en la cara anterior (hacia abajo como lo muestra la flecha roja). Se conserva el mismo tamaño de malla. Para este caso, los resultados de desplazamiento y esfuerzo Von-Mises máximo fueron 0.032mm y 122.91 Mpa respectivamente, lo anterior se puede observar en la Fig. 6.

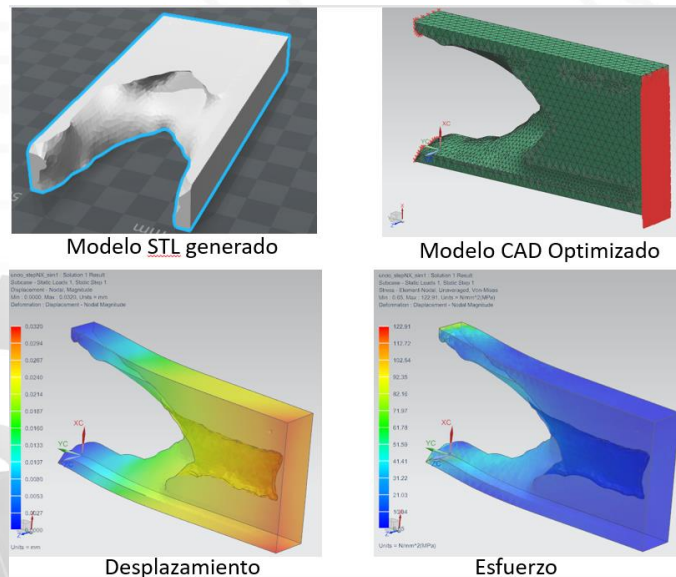


Fig. 6. Análisis estático lineal para el modelo CAD optimizado al 63% de volumen de prisma de acero, Resultados de Desplazamiento y Esfuerzo Von-Mises.

Al realizar un contraste entre el resultado optimizado al 63% de volumen, se puede evidenciar el beneficio que genera el proceso de optimización topológica ya que se redujo el peso de del componente inicial en un 37% a costa de un aumento en el esfuerzo de Von-Mises máximo hasta 122.91 Mpa, el cual es menor a la resistencia a la fluencia del acero utilizado igual a $S_y = 137.8$ MPa.

V. DISCUSIÓN

En este trabajo se expuso la optimización topológica estructural como proceso de apoyo para el diseño de componentes mecánicos, con el objetivo de reducir peso, se contrasta diversos acercamientos encontrados en la literatura, sin embargo se entra a debatir acerca de cuál sería el mejor a usar en el aula debido a que varían en el lenguaje de programación en el cual están escritos, difieren en que algunos tienen una interfaz gráfica y otros se manejan solo por scripts y línea de código, de acuerdo a lo anterior se puede establecer un horizonte que de luces sobre cómo integrar este conocimiento en el currículo del ingeniero mecánico. Por ejemplo, se podría tener una materia de pregrado y otra de posgrado, en donde inicialmente el estudiante a partir del uso del método de los elementos finitos, vea la aplicación de estos en el diseño por optimización topológica de un componente mecánico, esto, mediante el uso de un software con una interfaz

gráfica (como NX o Solid Thinking Inspire), ya que el estudiante genere dudas acerca de cómo funciona el proceso y con el ánimo de migrar a usar software libre, tenga la motivación para desarrollar y leer código en lenguajes de alto nivel (como matlab, python o fortran); además, con la ayuda de artículos científicos y códigos disponibles en la web, finalmente en la asignatura de posgrado el estudiante pueda unir diferentes software y solucionar problemas reales inclusive llegando a publicar artículos de investigación en revistas científicas.

VI. CONCLUSIONES

Las posibilidades que genera dominar el proceso de optimización topológica son muy amplias, ya que puede ser usado para resolver problemas multifísica relacionados con mecánica de sólidos, transferencia de calor, fluidos o electromagnetismo por nombrar algunos, a partir de lo anterior la herramienta de diseño es latente a utilizar por parte del estudiante de ingeniería mecánica.

La diferencia entre utilizar un software comercial y un software libre radica en el costo que el profesional tendría que asumir, sin embargo los software comerciales tienen una interfaz gráfica, que facilita el aprendizaje y reduce tiempo en el proceso de diseño, sin embargo ya se están haciendo acercamientos para unificar el proceso utilizando software libre con interfaz gráfica a través de la unión de software como FreeCAD, Calculix y Elmer (Denk, 2016), lo que se convierte en una excelente herramienta de diseño de componentes mecánicos de bajo peso.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las instituciones propias que aparecen en la afiliación del presente trabajo, por su colaboración en el apoyo de proyectos de investigación, así como las mejoras del aprendizaje en el aula de clase al implementar la metodología descrita.

REFERENCIAS

Andreassen, E., Clausen, A., Schevenels, M., Lazarov, B. S., & Sigmund, O. (2011). Efficient topology optimization

in MATLAB using 88 lines of code. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 43(1), 1-16.

Bendsøe, M. P., & Sigmund, O. (2003). *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*. Springer Science & Business Media.

Bendsøe, M. P., & Kikuchi, N. (1988). Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 71(2), 197-224.

Bendsøe, M. P. (1989). Optimal shape design as a material distribution problem. *Structural optimization*, 1(4), 193-202.

Deaton, J. D., & Grandhi, R. V. (2014). A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 49(1), 1-38.

Denk, M. (2016) Development of an application for automated multi physical topology optimization and geometry returning. Tesis de Maestría. Hochschule für angewandte Wissenschaften München, Alemania.

Groenwold, A. A., & Etman, L. F. P. (2009). A simple heuristic for gray-scale suppression in optimality criterion-based topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 39(2), 217-225.

Huang, X., & Xie, M. (2010). *Evolutionary topology optimization of continuum structures: methods and applications*. John Wiley & Sons.

Johnen, S. (2013). *Structural topology optimization: Basic theory, methods and applications*. Tesis de Maestría. Norwegian University of Science and Technology, Noruega.

Leon-Medina, J. X., Giraldo-Avila J.F., & Guzman, M.A. (2017), Regularization scheme for controlling length scale in topology optimization based on bacterial chemotaxis., *Proceedings of the Twelfth World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimisation- WCSMO-12*. Braunschweig, Alemania

Leon-Medina J. X. (2016) Método de optimización topológica de estructuras continuas basado en quimiotaxis

de baterías, Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Leon, J. X., Giraldo J.F., & Guzman, M.A. (2016) Solving low volume fraction problems of topology optimization based on bacterial chemotaxis. Proceedings of the 5th International Conference on Engineering Optimization ENGOPT 2016, Foz do Iguazu, Brasil., p.102., ISBN 978-85-7650-522-8

Leon, J. X., & Guzman, M.A. (2014). Tuning parameters using bio-inspired multiobjective optimization algorithm for topology optimization based on bacterial chemotaxis. Proceedings of the 4th International Conference on Engineering Optimization. ENGOPT 2014. Lisboa-Portugal, ISBN 978-1-138-02325-1

Liu, K., & Tovar, A. (2014). An efficient 3D topology optimization code written in Matlab. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 50(6), 1175-1196.

Michell, A. (1904), The limits of economy of materials in frame-structures. *Philos. Mag.* 8, 587–597

Sorby, S. A., Walker, G., Yano, M., Glozman, V., Kochersberger, K., Mathers, J., ... & Young, M. (1999). Modernization of the mechanical engineering curriculum and guidelines for computer-aided engineering instruction. *Computer Applications in Engineering Education*, 7(4), 252-260.

TopOpt Research Group, (2017). Interactive 3D TopOpt App | www.TopOpt.dtu.dk. [online] Recuperado de : <http://www.topopt.dtu.dk/?q=node/903> [Consultado 10 Jul. 2017].

Torres-Barahona E. A., Leon-Medina J. X. y Pinto-Salamanca M. L. (2017), Metodología De Análisis De Mecanismos y Uso De Software Para Su Implementación, XI Congreso Colombiano De Métodos Numéricos XI-CCMN 2017 , UIS Bucaramanga, Colombia