

# Parámetros de Cálculo y Optimización Topológica para el Diseño del Pie de Horquilla de una Motocicleta de Competición Orientado a un Método de Fabricación

Abraham Vadillo Morillas<sup>1</sup>, Cristina Castejón Sisamón<sup>2</sup>, Jesús Meneses Alonso<sup>3</sup>, Alejandro Bustos Caballero<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Grupo MAQLAB, Dpto. Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, España. Email: abvadill@ing.uc3m.es

<sup>2</sup>Grupo MAQLAB, Dpto. Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, España. Email: castejon@ing.uc3m.es

<sup>3</sup>Grupo MAQLAB, Dpto. Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, España. Email: meneses@ing.uc3m.es

<sup>4</sup>Grupo MAQLAB, Dpto. de Mecánica, UNED, España. Email: albusters@ind.uned.es

## Resumen

El presente artículo estudia el proceso de diseño de un elemento mecánico, el pie de horquilla de una motocicleta, y los parámetros que afectan a dicho diseño y su proceso. Se abarcará desde las condiciones de contorno hasta la pieza final, pasando por la optimización de diseño y la metodología seguida para el mismo. Se presentará un estudio previo de sensibilidad ante dos parámetros clave en el proceso de optimización topológica: la penalización y el factor de vecindario; y cómo encajan en la metodología. Como resultado, se mostrará la pieza funcional y los datos recabados para la interpretación del proceso de optimización.

**Palabras clave:** optimización, metodología, penalización, vecindario, pie de horquilla, interpretación.

## Abstract

This article studies the design process of a mechanical element, the fork foot of a motorcycle, and the parameters that affect said design and its process. It will cover from the boundary conditions to the final piece, through design optimization and the methodology followed for it. A preliminary study of sensitivity to two key parameters in the topological optimization process will be presented: the penalty and the neighborhood factor; and how they fit into the methodology. As a result, the functional part and the data collected for the interpretation of the optimization process will be shown.

**Keywords:** optimization, methodology, penalty, neighborhood, fork foot, interpretation.

## 1. Introducción

Los algoritmos de optimización topológica conforman una de las herramientas más populares de diseño en la actualidad pese a que su desarrollo no sea tan moderno [1]. Esto es debido a que las nuevas posibilidades de computación y fabricación desarrolladas en la conocida como “Industria 4.0” han hecho más viable la utilización de este tipo de metodologías de diseño; pues los resultados arrojados ofrecen geometrías orgánicas difícilmente fabricables mediante métodos como mecanizado. La fabricación aditiva ofrece una solución para la fabricación de este

tipo de diseños [2], pero éste no siempre es un método factible para la fabricación de determinadas piezas. Es por ello que, en el presente trabajo se realiza un estudio de diferentes parámetros dentro del algoritmo de optimización topológica a través del diseño completo de un pie de horquilla de motocicleta de competición (desde extracción de casos de carga hasta el diseño final y validación), con el objetivo de obtener un resultado arrojado por el algoritmo altamente interpretable para fabricar mediante métodos subtractivos. Se ofrecerá durante el desarrollo una comparativa de resultados con la

variación de diferentes parámetros para ejemplificar el problema y posibles soluciones.

El principal problema en los métodos de optimización topológica es que se requiere de una interpretación de los resultados obtenidos para adaptar el diseño óptimo arrojado por el algoritmo al método de fabricación que se utilizará. Para reducir dicha interpretación, se identificarán los parámetros del algoritmo que afectan al diseño [3], se analizarán y se modificarán para obtener un resultado interpretable a un método de fabricación de forma fidedigna.

A través del ejemplo del diseño de una pieza real se pretende realizar una aproximación de estos parámetros que pueden hacer del resultado algo más utilizable para métodos de fabricación sustractiva [4]. La identificación y utilización de estos parámetros resulta altamente interesante para realizar una posterior adaptación del algoritmo de optimización y reducir así la interpretación de resultados, o parte subjetiva, en el diseño mediante este tipo de metodologías.

## 2. Métodos

Como elemento de un conjunto mecánico, un pie de horquilla supone un ejemplo práctico de aplicación de la metodología de diseño propuesta a continuación y que es aplicable a cualquier otra pieza. Esta metodología está basada en la sustitución de la forma clásica de utilizar las simulaciones (CAE) para validar el diseño, por un método de optimización topológica.

Pese a que, como metodología se podrá observar un diagrama de flujo más complejo que el clásico diagrama de diseño-comprobación-rediseño; el resultado será de un ahorro de tiempo significativo [5] y se tendrá la seguridad parcial de que el resultado obtenido es el óptimo para las entradas programadas.

### 2.1. Descripción de la Pieza

El pie de horquilla de una motocicleta es un elemento que se ubica en la parte inferior del sistema de suspensión delantero del vehículo, siempre y cuando dicho sistema de suspensión sea de tipo telescópico [6]. La función de la pieza es tanto dar soporte y estanqueidad a los elementos internos de la botella de

suspensión, como unir y dar soporte a la(s) pinza(s) de freno delantera(s).



Figura 1. Ubicación del pie de horquilla (señalado en rojo) en prototipo KTM Moto3

Como se puede apreciar en la Figura 1, este elemento mecánico puede, además, ser soporte de carrocería (guardabarros delantero generalmente) y albergar sensores de temperatura de discos de freno. Todos estos puntos de anclaje de elementos de soporte o elementos satélite a la pieza describen los *keypoints* del elemento. Estos son puntos que tienen una geometría concreta, en una ubicación definida (tanto total como relativa con respecto al vehículo), y no pueden variar. A esto se le conocerá de ahora en adelante como “zona de no diseño”, ya que son puntos invariables y, por tanto, no optimizables. El resto de la pieza será conocida como “zona de diseño”, que será la sometida al proceso de optimización.

### 2.2. Metodología de Diseño

La metodología propuesta para el diseño de la pieza se muestra en la Figura 2 resumida en un diagrama de flujo donde se destacan dos posibles puntos de partida: partir de una pieza previa a mejorar, o realizar un nuevo diseño (que es el caso del presente artículo); y cuatro estaciones, las cuales se describirán más adelante en el presente documento.

Como se ha mencionado con anterioridad, este diagrama es aplicable al diseño de cualquier elemento mecánico, por lo que se le puede considerar como una metodología universal de diseño.

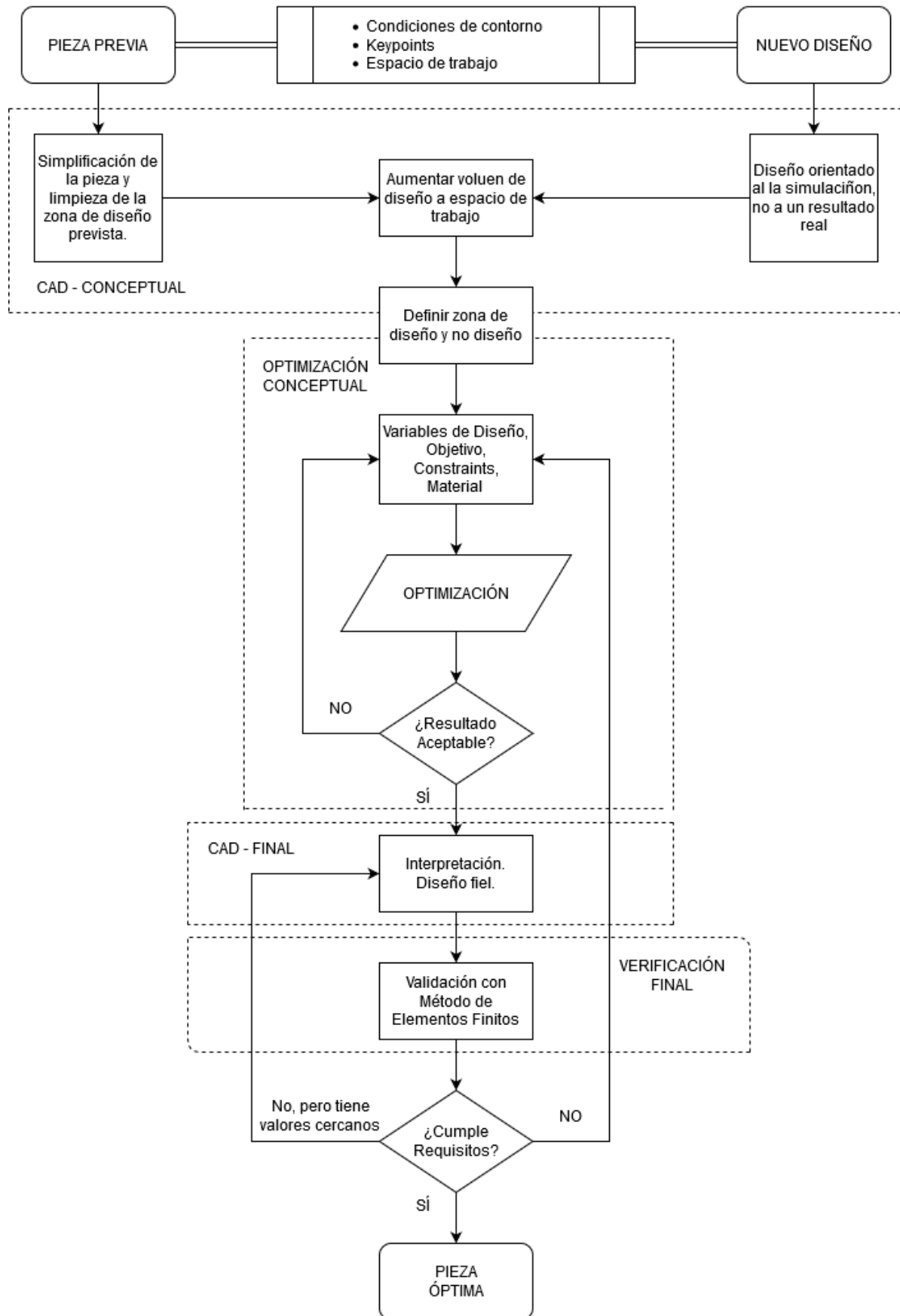


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología de diseño.

### 2.3. Etapas de la metodología

Tras identificar el punto de partida, en este caso un nuevo diseño, se han de tener identificados ciertos datos previos a comenzar el proceso. Estos datos son los *keypoints* ya mencionados, las condiciones de contorno de la pieza (que serán introducidas posteriormente en el modelo analítico a optimizar) y el espacio de trabajo. El espacio de trabajo supone el volumen máximo que puede abarcar la zona de diseño sin interferir con los *keypoints* o cualquier otro elemento del conjunto mecánico durante todas las etapas de su funcionamiento.

Posteriormente, se pueden identificar las cuatro etapas como:

- **CAD-Conceptual:** En el caso de un nuevo diseño, se realizará el elemento CAD orientado a la simulación (y el proceso de optimización). Esto implica que la pieza estará simplificada, eliminando todos los elementos no relevantes; y que el espacio de trabajo y por tanto la zona de diseño ocupen el volumen máximo, ya que un espacio mayor supone una mayor posibilidad de obtener un resultado satisfactorio. Tras ello, se define la zona de diseño y de no diseño, dividiendo el elemento 3D con particiones en esas dos zonas. A continuación, en la Figura 3 se muestra lo descrito aplicado a la pieza de estudio.

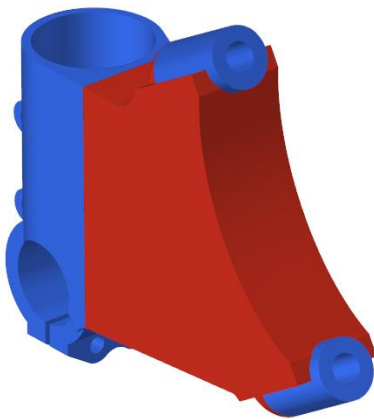


Figura 3. CAD Conceptual del pie de horquilla. En azul se muestra la zona de no diseño y en rojo la zona de diseño.

- **Optimización Conceptual:** Supone el proceso de optimización de la pieza, el cual se desarrollará en siguientes apartados. Como en cualquier proceso de optimización, se requerirá de unas variables de diseño (modelo analítico, material, propiedades,

etc.), un objetivo y unas restricciones. Se realizará un proceso iterativo hasta obtener un resultado.

- **CAD. Final:** Supone otra etapa de diseño en la cual se ha de interpretar el resultado de la optimización adaptándola al método de fabricación que se pretende utilizar. Este proceso es el que se pretende simplificar mediante la elección de los parámetros adecuados en la etapa anterior, pudiendo obtener resultados con una interpretación más sencilla en función del método de fabricación.
- **Verificación final:** Se realiza un análisis del diseño ya interpretado para corroborar que durante dicho proceso no se han violado las condiciones de diseño iniciales y se asegura la integridad y funcionamiento de la pieza final. Si supera esta verificación, se habrá obtenido el diseño óptimo; pero si no se supera, en función del resultado obtenido, se volverá a la segunda o la tercera etapa.

En sucesivos apartados se desarrollarán más en profundidad cada una de las etapas particularizando para el caso de estudio.

### 3. CAD-Conceptual

Según lo descrito en el apartado 2.3, esta etapa de diseño se basa únicamente en adaptar y simplificar el diseño CAD a un modelo sencillo de elementos finitos para optimizar, definiendo las zonas de diseño y no diseño, maximizando el volumen de trabajo y definiendo las condiciones de contorno de la pieza.

En este caso, las condiciones de contorno destacables son los casos de carga a aplicar, las restricciones y la simplificación de elementos periféricos.

#### 3.1. Casos de Carga

Se destacan tres casos de carga principales: i) la fuerza de frenado, que se deriva de la pinza de freno delantera, ii) la presión interna resultante del montaje por interferencia de la botella de la suspensión, y iii) la restricción en cierto rango de frecuencias ante la aparición de vibraciones.

##### 3.1.1. Fuerza de Frenado

Aplicando la segunda ley de Newton, un modelo de cálculo de la resistencia a la rodadura y equilibrio en el conjunto; suponiendo que el freno proporciona una fuerza de frenado máxima igual a la fuerza que puede absorber el neumático sin perder adherencia, se llega a la fórmula (1) para calcular la fuerza de frenado:

$$F_d = \frac{PL_2}{L} \cos\theta + \frac{hP}{L} \left( \mu + \left( 0.0085 + \frac{0.018}{P_i} + \frac{1.59 \cdot 10^{-6}}{P_i} v^2 \right) \cos\theta \right) \quad (1)$$

Donde  $P$  es el peso de la moto (incluyendo piloto),  $L$  es la distancia entre ejes,  $L_2$  es la distancia horizontal desde el centro de gravedad hasta el eje trasero,  $h$  es la altura del centro de gravedad,  $\mu$  es el coeficiente de rozamiento neumático-asfalto,  $P_i$  es la presión de inflado del neumático,  $v$  es la velocidad instantánea de la moto, y  $\theta$  el ángulo de la pendiente.

La dirección de aplicación de la fuerza será tangente a la circunferencia descrita por el disco de freno, con punto de aplicación en el centro geométrico de las pastillas de freno.

### 3.1.2. Montaje de la botella

El fabricante de la botella indica una tolerancia H7, que implica una interferencia de  $25 \mu m$ . Las maneras más intuitivas de introducir esta interferencia son mediante un pretensado (que añadirá una componente no lineal a la simulación); o como desplazamiento forzado, que podría llevar a resultados erróneos debido a que no todos los puntos del pie de horquillase desplazarán una misma distancia por su construcción.

En este caso, se hizo uso de las fórmulas analíticas de Hooke para elasticidad plana en coordenadas polares (Figura 4), simplificando como un tubo el acople de la horquilla (de esta forma, se sigue dando uso a fórmulas analíticas, como se expuso anteriormente). Conociendo que:

$$\sigma_\theta = \frac{1}{r_2^2 - r_1^2} \left( r_1^2 p_1 - r_2^2 p_2 - \frac{r_1^2 r_2^2}{r^2} (p_2 - p_1) \right) \quad (2)$$

$$\sigma = \varepsilon E; \text{ y } \varepsilon = \frac{\Delta\phi}{\phi_0} \quad (3)$$

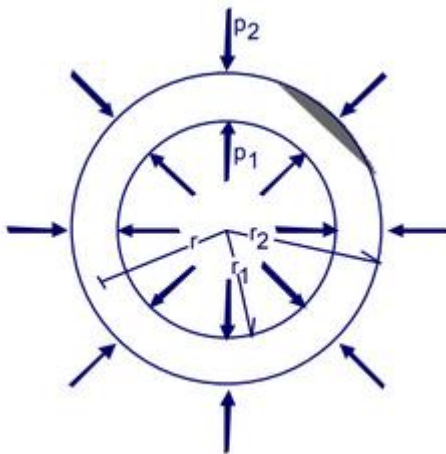


Figura 4. Modelo de elasticidad plana en coordenadas polares.

De esta forma se obtiene la presión interna necesaria para obtener la interferencia mencionada. Esta presión interna se colocará como caso de carga, quedando una relación lineal que no supondrá ciclos extra de iteración.

### 3.1.3. Vibraciones

Se incorporará un análisis modal para comprobar que, por geometría y puntos de anclaje, la pieza final no tendrá ningún modo de vibración en el rango de 18 a 25 Hz. En ese arco es donde se suelen encontrar las frecuencias de *chattering*, *wobble* y *waving*, las inestabilidades más destacables en motocicletas modernas [7].

### 3.2. Restricciones

En este caso las restricciones aplicables describen el montaje de la pieza, y se pueden simplificar en las siguientes:

- Mantener distancia entre puntos de anclaje de la pinza de freno, ya que se toma dicha pinza como elemento rígido.
- Bloqueo de los grados de libertad correspondientes en botella y eje de rueda, quedado la pieza anclada mediante estos dos elementos.
- movimiento limitado de los nodos en tornillería, ya que se simplifican los tornillos como elementos rígidos.

Estas simplificaciones de podrán apreciar de forma más visual en el apartado 3.3.

### 3.3. Simplificaciones

En el punto teórico de aplicación de la fuerza de frenado, se introduce un elemento rígido 1D (de tipo RBE2 [8], ya que aporta la rigidez de la pinza de freno), con el elemento independiente en ese punto, y los dependientes en el anclaje de la pinza freno al pie de horquilla (en color rosa, Figura 5).

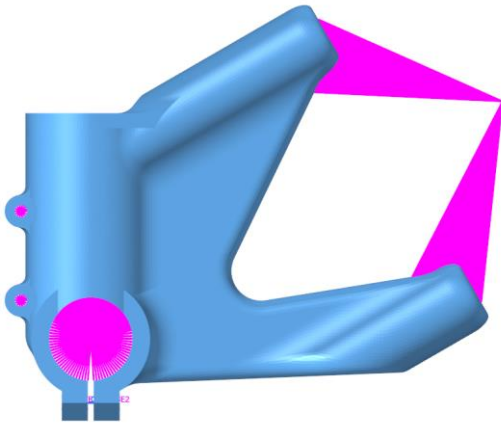


Figura 5. Modelo analítico simplificado.

Dicha simplificación se aplica también a la ubicación de tornillos y ejes, con la particularidad de utilizar elementos 1D tipo BEAM para simular dichos ejes, pudiendo obtener un modelo de elementos finitos más sencillo.

#### 4. Optimización Conceptual

Los procesos de optimización se caracterizan usualmente por definir como funciones tanto el objetivo de dicha optimización como las restricciones. El propósito del proceso es el de encontrar un mínimo global a la función objetivo que se encuentra acotada entre los límites impuestos por las restricciones.

El diagrama de flujo típico de una optimización topológica es el mostrado en la Figura 6.

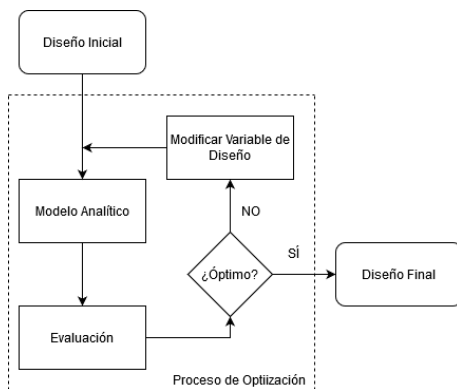


Figura 6. Diagrama de flujo de optimización topológica.

No obstante, la parte interesante para este trabajo se encuentra en el proceso de evaluación, que se puede dividir de forma simplificada en dos etapas: un análisis de sensibilidad y un método de evaluación (generalmente basado en gradientes).

El propósito del análisis de sensibilidad es asignar un valor de densidad a cada elemento de la malla en

función de cuán importante es para el modelo. Esto se realiza a través del conocido como análisis SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalty*). La formulación de dicho análisis es la que sigue:

$$E_i = E_{min} + \rho^p (E_0 - E_{min}) \quad (4)$$

Siendo  $E_i$  el Módulo de Young aparente de cada elemento,  $E_{min}$  un número suficientemente pequeño como para evitar divisiones entre cero,  $E_0$  el módulo de Young del material,  $\rho$  la densidad del elemento y  $p$  la penalización aplicada. Como ecuación exponencial, se puede apreciar que a mayor valor de  $p$ , se presentan unas condiciones más restrictivas de densidad de elementos. Es por ello que este factor es uno de los puntos de estudio del presente trabajo, ya que en función de la elección de dicho parámetro, el resultado de la optimización es variable.

Realizando este método a toda la malla de la zona de diseño, una densidad queda asignada a cada elemento. Estas densidades serán el *input* para el siguiente proceso. No obstante, antes de realizar el siguiente paso, será necesario aplicar un filtro ya que, en zonas donde hay poca tensión, pero hay suficiente como para obtener resultados, se producen microestructuras que, pese a ser óptimas, dificultan posteriores procesos de interpretación y no son adaptables a prácticamente ningún método de fabricación. Mediante el uso del filtro, se tenderá más a tener agrupaciones de elementos continuas y evitar esas zonas de pequeñas microestructuras:



Figura 7. Optimización sin filtro (izquierda) y con filtro (derecha) [10]

El filtro funciona modificando la sensibilidad de los elementos con respecto a la función objetivo, con ecuaciones como la representada en la ecuación 5:

$$\frac{\partial f^{nueva}}{\partial \rho_k} = \frac{1}{\rho_k \sum_{i=1}^n \tilde{H}_i} \sum_{i=1}^n \tilde{H}_i \rho_i \frac{\partial f}{\partial \rho_i} \quad (5)$$

Donde  $\tilde{H}_i$  es el factor de peso de cada elemento, que se pondera mediante la distancia a elementos vecinos  $\tilde{H}_i = r_{min} = dist(k, i)$ , siendo  $k$  el centro del elemento considerado, e  $i$  el centro de los elementos vecinos. Como se puede apreciar, el filtro aporta prioridad a elementos con más elementos adyacentes.

Es este valor de  $r_{min}$  el conocido como factor de vecindario, y es el otro parámetro de interés para modificar los resultados de la optimización en función del método de fabricación.

El método de evaluación es simplemente un método de resolución de optimizaciones, como pueden ser el de Newton-Raphson, el Optimally Criteria o el más utilizado para optimización topológica, el Método de Asíntotas Móviles (MMA) [9].

Finalmente, el diagrama de flujo de una optimización topológica queda expandido de la siguiente forma (Figura 8).

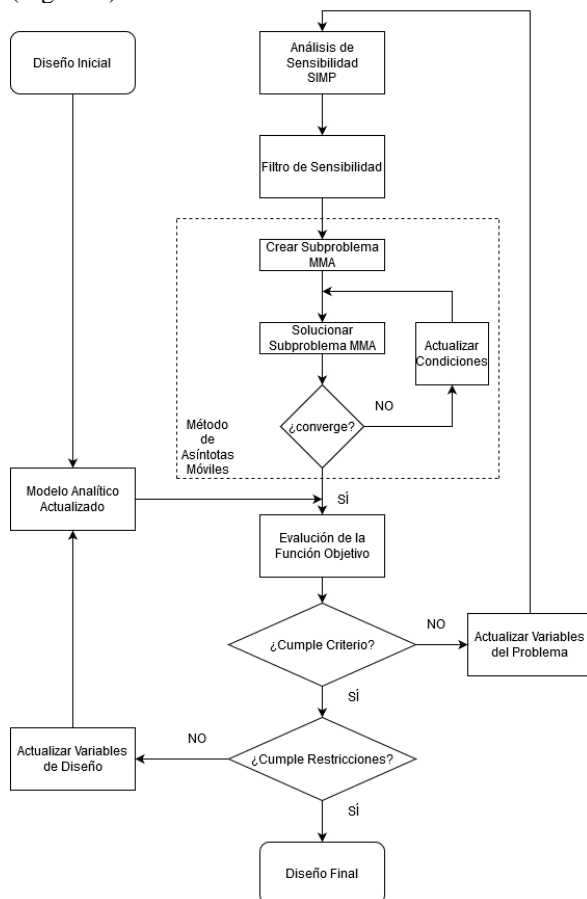


Figura 8. Diagrama de flujo de optimización topológica expandido.

#### 4.1. Estudio de Sensibilidad de Penalización y Factor de Vecindario

Los valores de partida se obtienen de la literatura científica [5][8][9], posteriormente, se analiza el comportamiento de dichos valores en un caso sencillo que permita obtener conclusiones de forma rápida y fiable (ya que, al tratarse de elementos finitos, los resultados son extrapolables de forma similar al análisis de sensibilidad de malla).

##### 4.1.1. Penalización

En la bibliografía disponible [11], el desarrollador del software de elementos finitos que se utilizará para realizar la optimización, Altair Hyperworks, se

encuentran las siguientes recomendaciones para la elección de penalización con método SIMP y búsqueda mediante gradientes.

De la Tabla 1 se puede obtener de conclusión que, para el tipo de modelo analítico (sólido), las penalizaciones recomendadas oscilan entre 2 y 4 en función de la fase de optimización y las restricciones utilizadas, es por ello que se probarán valores en dicho rango en el estudio de sensibilidad.

Tabla 1: Tipo de modelo analítico con sus factores de penalización recomendados

MODELO FEM	PENALIZACIÓN
Tipo Shell	2
Tipo Shell + Dimensión Máxima/Mínima	1ª Fase → 2 2ª Fase → 3 3ª Fase → 3
Tipo Shell + Otras Restricciones de Fabricación	1ª Fase → 2 2ª Fase → 3 3ª Fase → 4
Tipo Solid	2
Tipo Solid + Dimensión Máxima/Mínima	1ª Fase → 3 2ª Fase → 4 3ª Fase → 4
Tipo Solid + Otras Restricciones de Fabricación	1ª Fase → 2 2ª Fase → 3 3ª Fase → 4

##### 4.1.2. Factor de Vecindario

Como el factor de vecindario define el número de elementos a tener en cuenta por el análisis individual de cada elemento, no hay unos valores que restrinjan la optimización. Es por ello que se adimensionalizará este parámetro como el cociente del número de elementos en una de las direcciones principales de la pieza (la más estrecha) entre el factor  $r_{min}$  escogido.

##### 4.1.3. Modelo de Estudio

Se realizará el estudio en una pieza de tipo prismática, con un área de 150x50 elementos y un espesor de 7 elementos (los suficientes para obtener resultados relevantes sin suponer un gran coste computacional). Se empotrará la pieza en uno de sus extremos, quedando una viga en voladizo, y se aplicará una carga vertical y hacia abajo en la punta, como se muestra en la Figura 9.

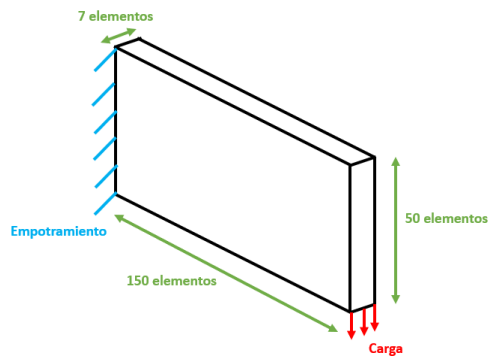


Figura 9. Esquema del modelo analítico

Se partirá de un código de optimización propio realizado en MatLab para el análisis de modelo analítico, ya que es la mejor forma de poder manejar a placer cada uno de los parámetros implicados en la optimización.

El objetivo de la optimización será el de maximizar la rigidez de la pieza con la restricción de mantener el volumen final de la misma siempre por debajo del 30% respecto al modelo analítico inicial.

#### 4.2. Resultados del Análisis de Sensibilidad

A continuación, se describirán los valores obtenidos para tres métodos de fabricación diferentes (fabricación aditiva, fabricación sustractiva y corte de chapa), siendo el de mayor interés para el presente trabajo el de fabricación sustractiva, ya que es el método de fabricación escogido para la pieza de estudio.

##### 4.2.1. Fabricación Aditiva

Los mejores resultados obtenidos en el rango descrito en los apartados 4.1.1 y 4.1.2 son para un factor de penalización 2 y un factor de vecindario de entre 0.2 y 0.3 el número de elementos en su espesor. El resultado se muestra en la Figura 10.

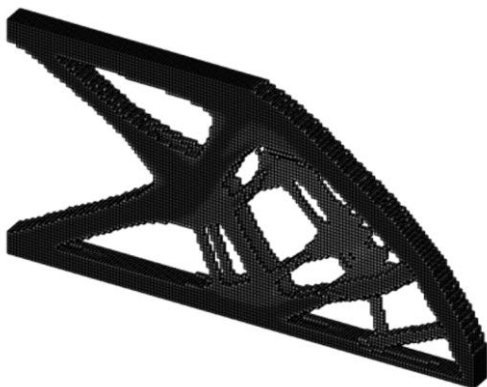


Figura 10. Optimización para fabricación aditiva

##### 4.2.2. Fabricación Sustractiva

Los mejores resultados obtenidos en el rango descrito en los apartados 4.1.1 y 4.1.2 son para un factor de penalización 2.5 y un factor de vecindario de entre 0.5 y 0.6 el número de elementos en su espesor. El resultado se muestra en la Figura 11.

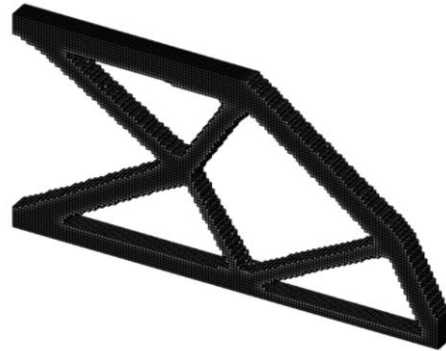


Figura 11. Optimización para fabricación sustractiva

##### 4.2.3. Corte de Chapa

Los mejores resultados obtenidos en el rango descrito en los apartados 4.1.1 y 4.1.2 son para un factor de penalización 3.5 y un factor de vecindario de entre 1 y 1.2 el número de elementos en su espesor. El resultado se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Optimización para corte de chapa

#### 4.3. Optimización de la Pieza de Estudio

Con los valores obtenidos en el análisis de sensibilidad realizado, e introduciéndolos en el software de elementos finitos, el resultado de la optimización del modelo mostrado en la Figura 3, y por tanto el modelo del que se realizará posteriormente la interpretación es el de la siguiente Figura 13:



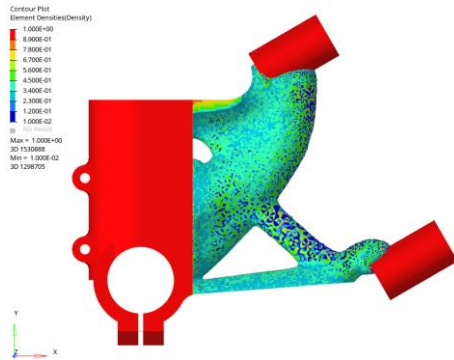


Figura 13. Resultado de la optimización en la pieza de estudio.

### 5. CAD Final

En este caso, para realizar el modelado final, se deberán tener en cuenta todos aquellos factores que restringen la fabricación de este tipo, como el número de grados de libertad de la herramienta, tipo y dimensiones de la misma, volumen útil de fabricación, etc.

Interpretar determinadas optimizaciones para mecanizar puede llegar a ser muy complejo dependiendo del resultado de la optimización, por eso se deberá ser especialmente estricto con el resultado del proceso en el paso anterior, no dando por aceptables resultados que disten mucho de una interpretación fabricable. Como se desarrolla en el apartado 4, en este caso la interpretación resultó sencilla debido a la correcta elección, modificación y personalización de los parámetros de optimización.

A continuación, en la Figura 14 se muestra en verde la interpretación geométrica realizada en el ejemplo del pie de horquilla:

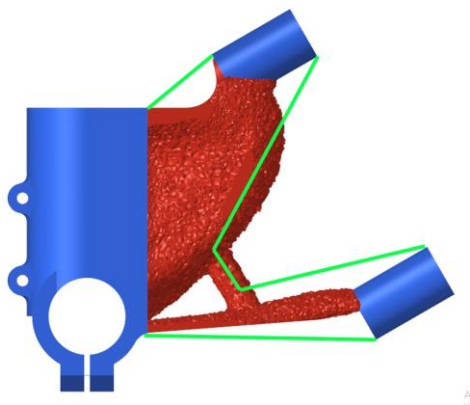


Figura 14. Interpretación del resultado de la optimización.

Se muestra una geometría mucho más sencilla para realizar en pocas posiciones de mecanizado, tratando de que el resultado se ponga siempre del lado de la

seguridad en cuanto a los casos de carga aplicados. El modelo 3D resultante sería el siguiente (Figura 15):

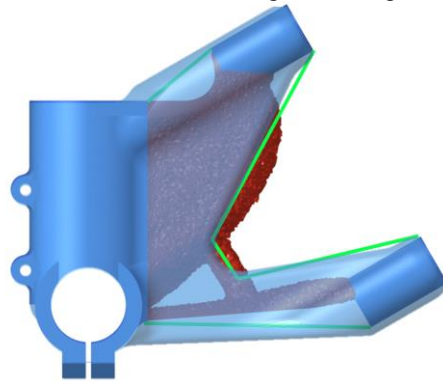


Figura 15. Comparación del CAD final con la interpretación del resultado de la optimización.

Por último, se muestra el modelo 3D (Figura 16) que pasará a ser interpretado en posteriores apartados:

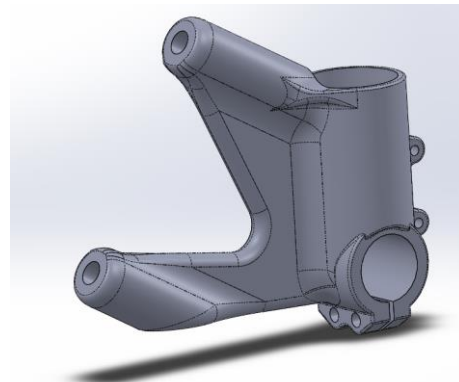


Figura 16. CAD final.

### 6. Verificación Final y Resultados

La verificación final consiste en realizar un análisis de elementos finitos del CAD final, con las condiciones de funcionamiento (condiciones de contorno). Las simplificaciones, malla y demás factores significativos corresponden a un análisis clásico de elementos finitos. Existen tres resultados posibles al realizar la verificación:

- Cumple con los requisitos de la pieza: En este caso, se habrá obtenido el diseño final optimizado.
- No cumple con los requisitos, pero se obtienen valores cercanos: puede ser el caso de tensiones puntuales elevadas, sobrepasar la tensión de fluencia o el factor de seguridad en una zona concreta, o cualquier condición solucionable de forma intuitiva realizando cambios sencillos en el CAD final. En este caso simplemente se realiza una nueva

interpretación de la optimización teniendo en cuenta los resultados del análisis.

- No cumple con los requisitos: En caso de que no se satisfagan las condiciones de diseño de tal forma que no sea fácilmente solucionable en la etapa de CAD final (tensiones inaceptables múltiples, modos de vibración, rigidez demasiado baja, etc.) se deberá volver a la etapa de optimización, actualizando las variables de diseño, restricciones u objetivo en función de los requisitos violados en el resultado del análisis

En este caso, el resultado obtenido fue satisfactorio, manteniendo las tensiones bajo el límite de fluencia y no obteniendo ningún modo de vibración en el rango descrito en el apartado 3.1.3, por lo que se considera el diseño como óptimo.

## 7. Conclusiones

Del presente trabajo se pueden extraer las siguientes conclusiones obtenidas a lo largo del desarrollo del mismo:

- Se ha propuesto una metodología universal para el diseño de componentes mecánicos utilizando la optimización topológica. Esta metodología puede tanto mejorar los resultados de los diseños, siendo éstos más cercanos a lo óptimo; así como conseguir una disminución del tiempo de diseño a través de la simulación.
- Existen varios factores que afectan al resultado de la optimización topológica, y en función de cómo varían el resultado cambia sustancialmente.
- A través de un análisis de sensibilidad de estos factores se pueden cuantificar para obtener un resultado de optimización orientado a un método de fabricación.
- La adaptación del resultado de optimización sigue siendo limitada variando únicamente el factor de vecindario y la penalización, por lo que será interesante realizar futuros análisis y personalizaciones introduciendo otros parámetros, como factores de vecindario dinámicos, elección de diferentes ecuaciones de densidad de elementos o utilización de diferentes filtros.

## 8. Referencias

- [1] Bendsøe, M. P., & Sigmund, O. (2003). "Topology Optimization: Theory, Methods and Applications", Retrieved from [www.scopus.com](http://www.scopus.com).
- [2] Prathyusha, A. L. R., & Raghu Babu, G. (2022). "A review on additive manufacturing and topology optimization process." *Materials Today: Proceedings*, doi:10.1016/j.matpr.2022.02.604.
- [3] Lee, H. Y., Zhu, M., & Guest, J. K. (2022). "Topology optimization considering multi-axis machining constraints using projection methods." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 390 doi:10.1016/j.cma.2021.114464. 2
- [4] Amir M. Mirzendehtdel, Morad Behandish, Saigopal Nelaturi. (2020) "Topology optimization with accessibility constraint for multi-axis machining." *Computer-Aided Design*, Volume 122, 102825, ISSN 0010-4485, <https://doi.org/10.1016/j.cad.2020.102825>.
- [5] The HyperWorks University Team "Practical Aspects of Structural Optimization." Finding an Optimum,. 2020.
- [6] Foale, Anthony Ernest. "Motorcycle Handling and Chassis Desing". Tony Foale, 2002. ISBN 10: 8493328618
- [7] Cossalter, Vittore. "Motorcycle Dynamics." 2006. Ed:Lulu.com, ISBN-13: 978-1430308614
- [8] Altair Engineering. "Practical Aspects of Finite Elements Simulation." Altair University, 2021.
- [9] Svanberg, K. "Optimization of Large Structural Systems." Stockholm : Kluwer Academic Publishers, 1993. 555-566.
- [10] 13. Larsson, Robin. Chalmers University of Technoogy. [En línea] 2016. [Citado el: 5 de Mayo de 2020.][https://www.chalmers.se/SiteCollectionDocuments/Produkt%20och%20produktionsutveckling/Nationell%20kompetensarena%20kring%20produktoptimizering/Methodology\\_for\\_Topology\\_and\\_Shape\\_Optimization\\_report.pdf](https://www.chalmers.se/SiteCollectionDocuments/Produkt%20och%20produktionsutveckling/Nationell%20kompetensarena%20kring%20produktoptimizering/Methodology_for_Topology_and_Shape_Optimization_report.pdf).
- [11] Altair Engineering. "Design Variables." Disponible en el foro de ayuda de Altair Hyperworks. 2019.