

03-049

### **Methodological approach to multiobjective optimization of 3D printing pieces**

Amabel García Domínguez; Juan Claver Gil; Miguel Ángel Sebastián Pérez

UNED;

This work exposes the main aspects considered during the development of the proposed methodology for the optimization of pieces by 3D printing. From the initial stage of software selection to the final results obtained by simulation and 3D printing of experimental models.

By using different solvers for the selected software, Rhinoceros, and embedded in Grasshopper, two workflows were defined. One with only one optimization solver, and another with several hierarchized solvers. Both approaches were applied to a case of study and then compared from different points of view. Topological and multiobjective optimization were integrated in a same process, with a continuous workflow that, in addition, offers great design flexibility.

**Keywords:** methodology; optimization; additive manufacturing; 3D printing

### **Aproximación metodológica a la optimización multiobjetivo de piezas obtenidas por impresión 3d**

Este trabajo propone una metodología para la optimización del proceso de impresión 3D de piezas y expone los aspectos principales considerados durante su diseño. Desde la fase inicial orientada a la selección del software de trabajo hasta los resultados obtenidos mediante simulación e impresión 3D de modelos experimentales.

Empleando Rhinoceros como software de trabajo y los solvers embebidos en Grasshopper, se definen dos flujos de trabajo, uno con un único solver de optimización y otro con un conjunto de solvers jerarquizados entre sí. Ambos planteamientos se aplicaron a un caso de estudio comparando los resultados obtenidos. La optimización topológica y la optimización multiobjetivo se integran en un mismo proceso, con un flujo de trabajo continuo y que no pierde flexibilidad de cara a la fase de diseño de la pieza.

**Palabras clave:** metodología; optimización; fabricación aditiva; impresión 3D

Correspondencia: Juan Claver (jclaver@ind.uned.es)



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

## **APROXIMACIÓN METODOLÓGICA A LA OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO DE PIEZAS OBTENIDAS POR IMPRESIÓN 3D**

### **1. Introducción**

El desarrollo de nuevas tecnologías modifica de manera constante los paradigmas de los distintos ámbitos de cualquier área de conocimiento. En el caso de los procesos productivos las nuevas tecnologías de fabricación aditiva abren un amplio abanico de nuevas posibilidades (García-Domínguez et al., 2016). Frente a los procesos de formado por arranque de material, por deformación plástica o por colada, la fabricación aditiva permite, entre otras cosas, geometrías imposibles hasta ahora, en especial en lo relativo geometrías interiores.

Por otro lado, el desarrollo de nuevos software de diseño y simulación, permite incorporar al proceso de diseño mayor número de criterios de análisis y valoración, al mismo tiempo que se incrementa significativamente su potencial.

Todo ello conforma un contexto en el que la optimización de los diseños adquiere una nueva dimensión. Los procesos de optimización pueden orientarse a un único objetivo o a varios simultáneamente. Pudiendo hablar así de optimización monobjetivo y multiobjetivo. La optimización topológica de estructuras de distinta naturaleza y escala es probablemente una de las aplicaciones más conocidas, basada en el Método de los Elementos Finitos (FEM) (Victoria Nicolás, 2006).

De forma general se puede distinguir entre procesos de optimización basados en modelos paramétricos y basados en modelos discretizados en un número finito de elementos de malla. Los primeros considerarán simultáneamente diferentes variables, posibilitando la optimización de varios aspectos en un mismo proceso. Los segundos se basan en una única variable referida a todos los elementos de la malla. La optimización topológica sería un ejemplo de este tipo de modelos.

La conexión entre ambos tipos de modelos es de interés de cara a conseguir procesos de optimización que consideren la optimización topológica junto a otras variables (Olason & Tidman, 2010). Sin embargo esto es difícil en la práctica dada la independencia de ambos tipos de modelos. Diversos autores vienen desarrollando trabajos de investigación de cara a solventar estas dificultades (Blattman, 2008; Sheffer & Ungor, 2001).

La selección de la impresión 3D como tecnología de fabricación aditiva en este estudio, hace que la capacidad de exportación directa del modelo optimizado a formatos compatibles para impresión 3D sea otro criterio a tener en cuenta. En caso contrario el flujo de trabajo quedaría igualmente interrumpido, siendo necesario el remodelado de la pieza optimizada para su fabricación.

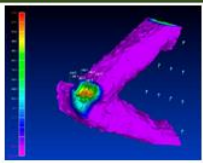
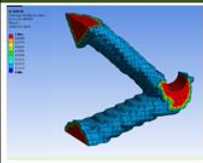
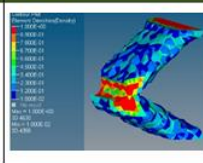
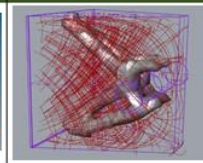
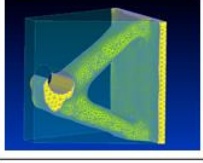
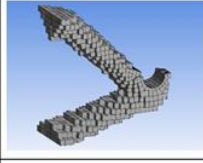
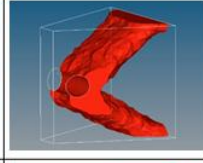
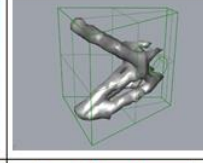
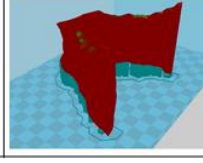
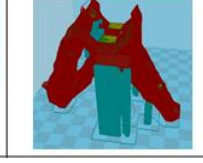
En este trabajo se propone una metodología que permita establecer un flujo de trabajo continuo en el proceso de optimización multiobjetivo de piezas para su fabricación por impresión 3D, salvando de este modo los dos puntos críticos señalados (García-Domínguez, 2015). Para ello, en primer lugar se hace una identificación de software de optimización y se desarrolla un estudio de caso para la selección del más adecuado de cara a estos objetivos según varios criterios. Posteriormente, y apoyándose en el uso de la herramienta seleccionada, se describe la metodología de optimización propuesta.

## 2. Selección de software

Primeramente se realizó una búsqueda de software de optimización, tanto multiobjetivo como optimización topológica. De este modo, inicialmente se identificaron y consideraron 54 software de optimización multiobjetivo y 42 de optimización topológica. Para todos ellos se indicaron los principales aspectos a tener en cuenta de cara a la posterior selección. La disponibilidad de licencias gratuitas y de documentación de apoyo de cara a su incorporación en experiencias docentes (García-Domínguez et al., 2016), la integración entre ambos tipos de optimización y la posibilidad de exportar los diseños a formatos imprimibles en equipos de impresión 3D fueron los principales aspectos valorados.

Se plantea entonces un caso de estudio para su optimización topológica, a partir de la cual se incluiría la posterior optimización de otras variables. Como pieza a optimizar se propone un gancho cuya geometría inicial se simplifica al máximo para eliminar condicionantes de partida para el proceso de optimización. La pieza se considera fijada a una superficie vertical restringiendo los desplazamientos y rotaciones en los ejes X, Y y Z. La carga que debe soportar es de 15 kilogramos y se centra en la pieza. El soporte optimizado será fabricado por FDM (Fused Deposition Modeling) de ABS en una impresora modelo Maker Replicator 2X. El proceso se realiza para los cuatro software finalmente seleccionados. En cada caso se analizaron las particularidades ocurridas con cada herramienta durante las distintas fases del proceso. La Figura 1 muestra la geometría inicial y los resultados después del proceso de optimización obtenidos en los distintos softwares.

**Figura 1: Resumen de los resultados en los softwares considerados durante el proceso de optimización**

	SOFTWARE	FEMAP/NX NASTRAN (SIEMENS)	GTAM-ANSYS MECHANICAL (ANSYS)	OPTISTRUCT-HYPERMESH (ALTARI)	MILLPEDE-GRASSHOPPER
CONDICIONES DE PARTIDA	SOLVER DE OPTIMIZACIÓN				
	RESULTADOS				
	EXPORTACIÓN A IMPRESIÓN 3D				

Como se observa en la Figura 1 sólo dos de los softwares considerados permitían exportar directamente los modelos optimizados a formatos directamente imprimibles. Se emplea el software Cura 15.04 para la conversión de la geometría de la pieza a g-code y su posterior impresión. Para estos casos se comparan los resultados obtenidos. Se consideran aspectos previamente identificados como de especial interés (García-Domínguez, 2015), tales como la reducción de volumen, el tiempo de fabricación, el coste en material, o la definición de la malla al inicio y al final del proceso, en lo relativo al número de nodos. En todos los casos la solución alcanzada empleando como software de optimización Millpede, plugin de

Grasshopper embebido en el software de Rhinoceros, se identifica como la de mayor interés.

### 3. Metodología y resultados

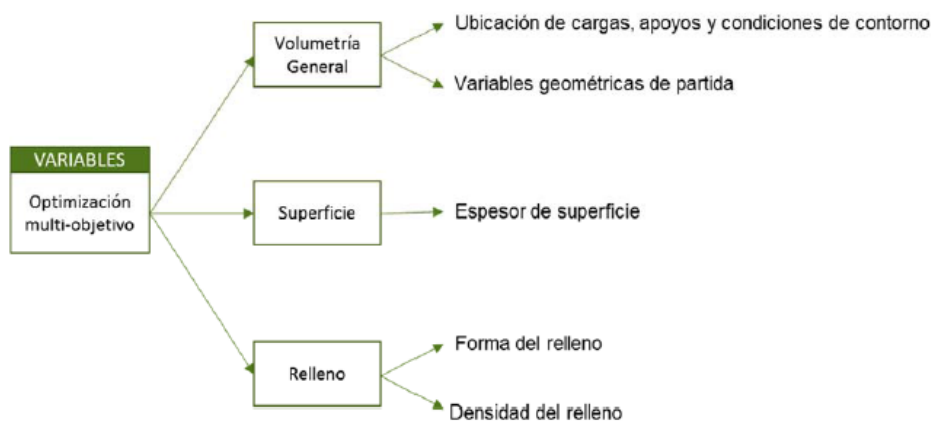
Una vez seleccionada la herramienta de trabajo se aborda la definición de una metodología de optimización que permita un flujo de trabajo continuo a lo largo de todo el proceso, incluyendo la exportación para la impresión final de la pieza.

Se identifican características de especial interés analizadas en trabajos previos (García-Domínguez, 2015) y que se quieren tener en cuenta como variables a optimizar; la volumetría inicial de la pieza, el espesor de la envolvente y la estructura de relleno. Para cada uno de estos aspectos se definen los objetivos de la optimización, las variables asociadas y las restricciones. Las figuras 2, 3 y 4 resumen dichos aspectos.

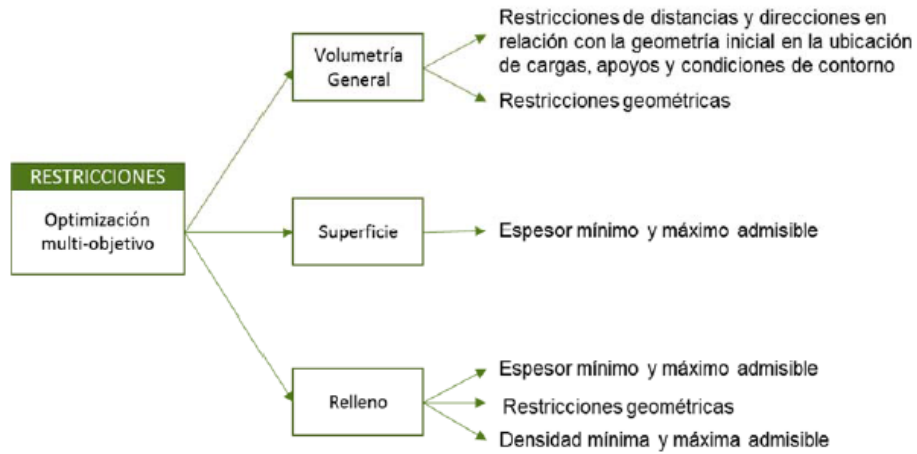
**Figura 2. Objetivos básicos del problema de optimización multiobjetivo en la metodología propuesta**



**Figura 3. Variables básicas del problema de optimización multiobjetivo en la metodología propuesta.**



**Figura 4. Restricciones básicas del problema de optimización multiobjetivo en la metodología propuesta.**

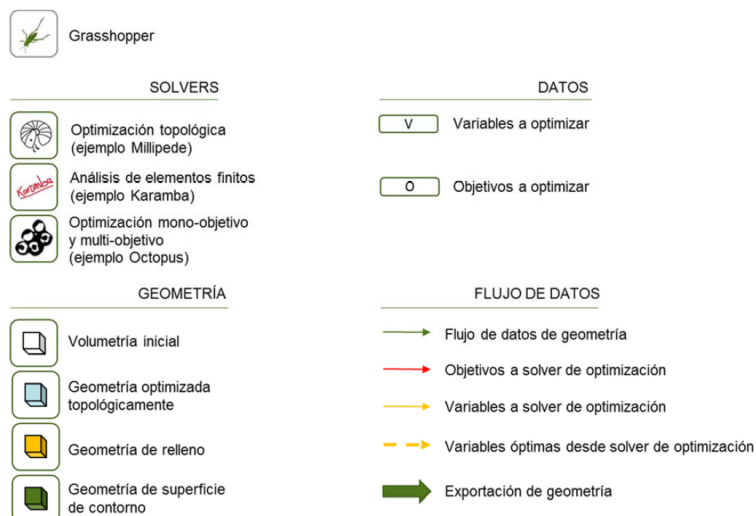


Existe un gran número de plug-ins de Rhinoceros embebidos en Grasshopper. Entre ellos algoritmos con funcionalidades específicas como son las de análisis estructural por el método de elementos finitos o solvers de optimización. Se analizaron sus funcionalidades y se seleccionaron los más adecuados para el desarrollo de la metodología propuesta (García-Domínguez. 2015).

Se plantea un procedimiento en el que una única acción central produce una variedad de resultados óptimos, u óptimos de Pareto entre los que elegir el diseño más óptimo, cuyos objetivos son un mínimo volumen y una máxima rigidez. La metodología propuesta integra la optimización topológica y optimización multiobjetivo a través de la programación gráfica y software de análisis y optimización de los “add-on” del plugin Grasshopper de Rhinoceros.

A partir de estas bases metodológicas se plantean dos posibilidades. Por un lado una metodología con un único solver de optimización y por otro lado una metodología jerarquizada con más de un solver de optimización. Se explican las metodologías propuestas a través de esquemas que representan el flujo de datos a través de los plugins. La Figura 5 muestra la leyenda de símbolos empleados.

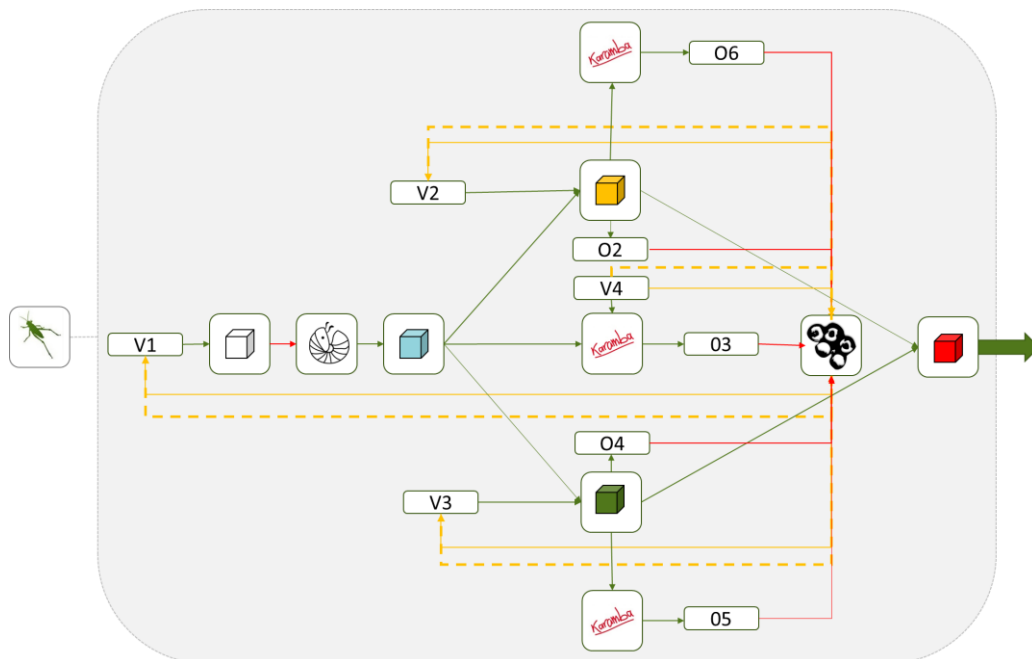
**Figura 5. Símbolos empleados en la representación de las metodologías propuestas.**



### 3.1 Metodología con un único solver de optimización

El esquema de la Figura 6 representa de manera simplificada la metodología de optimización con un único solver de optimización. La geometría se genera desde unas variables iniciales. Se realiza una optimización topológica y a partir de la geometría resultante, mediante una sucesión de algoritmos, se genera por un lado la geometría del relleno y por otro lado la geometría de la superficie. El resultado de la optimización multiobjetivo con Millipede permite al diseñador escoger el óptimo de Pareto que más le satisface y redefinir las variables desde la que se generó la geometría inicial y las del relleno y la superficie. De este modo, automáticamente se genera el resultado óptimo preparado para su exportación.

Figura 6. Metodología con un único solver de optimización.



### 3.2 Metodología jerarquizada con más de un solver de optimización

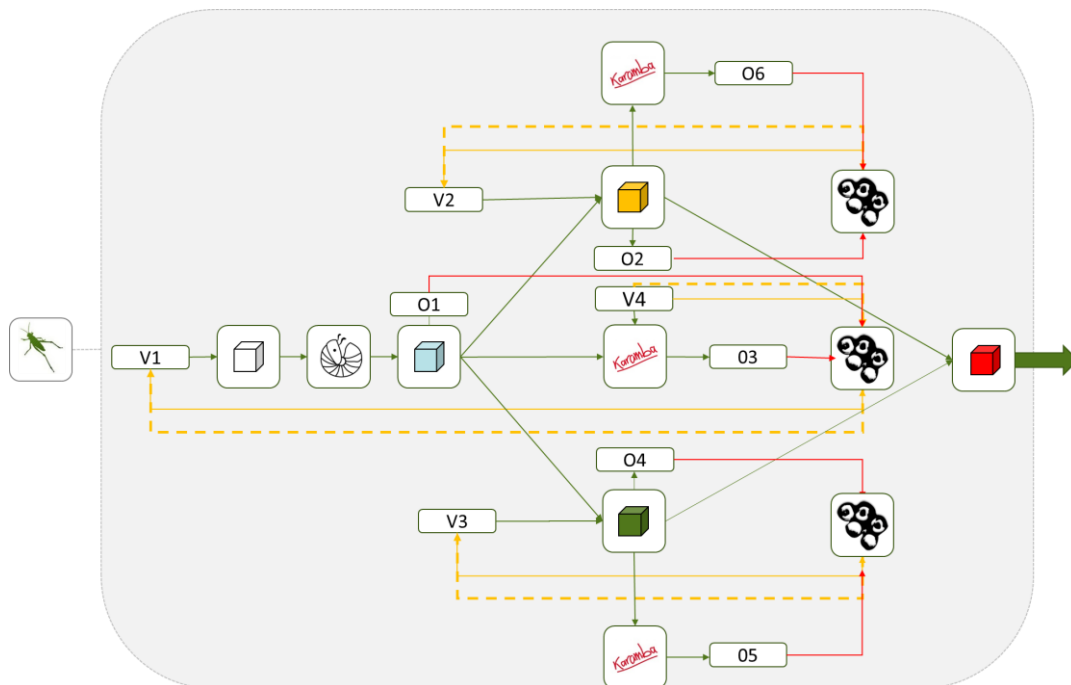
Millipede usa algoritmos de optimización genéticos que van produciendo soluciones desde la búsqueda aleatoria de las variables. Cuantas más variables y objetivos se introduzcan más difícil será seleccionar el mejor genoma o solución.

Las cargas, apoyos, y condiciones de contorno que determinan la optimización topológica de la pieza son las mismas en todo el proceso de optimización. Por este motivo los objetivos O6 (respuesta mecánica del relleno), O3 (respuesta mecánica del sólido optimizado topológicamente) y O5 (respuesta mecánica de la superficie de contorno) son proporcionales por lo que no aporta información al incorporarlo al proceso de optimización multi-objetivo. Sin embargo se quiere determinar el comportamiento mecánico específico de cada uno de los elementos para ser capaces de diseñar sus componentes eficazmente. Por estas razones se plantea una metodología con más de un solver de optimización. Se descompone el problema de optimización en subproblemas para un mayor control sobre la optimización de la geometría en cada uno de sus componentes.

A partir de la optimización topológica, se separa el problema de optimización en 3 subproblemas de optimización multi-objetivo. La Figura 7 permite observar esta situación. El primer problema retroalimenta en su solución a los otros dos mediante la definición de las variables más óptimas para generar tanto la volumetría inicial desde las condiciones de cargas, apoyos y de contorno, como la optimización topológica. A partir de esta optimización se realizan las otras dos optimizaciones para afinar el diseño y optimizar cada uno de sus componentes.

Esta segunda metodología propuesta en la que se descompone el problema en subproblemas, permite descomponer el problema todo lo que sea necesario mientras exista un flujo de datos a lo largo del problema.

**Figura 7. Metodología con más de un solver de optimización.**



De este modo, la metodología con más de un solver será de especial interés cuando el grado de detalle que se quiere alcanzar es elevado sin que ello condicione las condiciones establecidas al inicio del proceso y con ello el resultado final. En el esquema de la Figura 7 sólo se han incluido dos grados de detalle, sin embargo la metodología permite afinar más y definir más el diseño desde sus componentes o seguir descomponiendo el problema. Se pueden además incorporar en cualquier punto del proceso de optimización otros solvers o algoritmos e incluirlos en nuestra optimización (García-Domínguez, 2015).

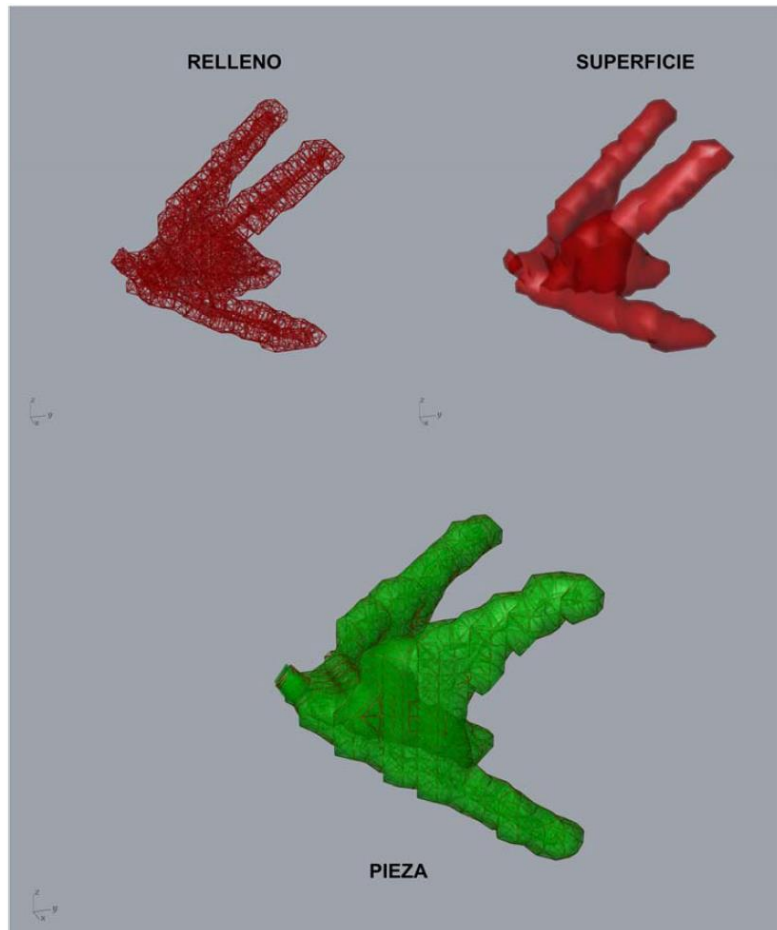
También resulta de interés cuando se quieren valorar diferentes alternativas de diseño para elegir la más eficaz. Una vez definido el problema es fácil ramificar cualquier subproblema en tantas ramas como alternativas al diseño se quieran desarrollar en cualquier punto del proceso (García-Domínguez, 2015).

Ambas metodologías fueron aplicadas a un caso de estudio. En la Figura 8, a modo de ejemplo, se muestran los resultados obtenidos para el caso estudiado del soporte ya



expuesto en la selección del software, durante la aplicación de la metodología con un único solver de optimización. Se muestran los resultados para los tres subproblemas considerados en la optimización. Esto es la geometría general de la pieza, su envolvente y la estructura de relleno.

**Figura 8. Resultado de la optimización de la pieza con la metodología de optimización de diseños para impresión 3D con un único solver de optimización**



En el caso de un problema sencillo con pocas variables y objetivos, como el estudio de caso estudiado, es recomendable la utilización de la metodología de optimización con un solo solver, donde con una única acción se realiza simultáneamente la optimización topológica y multiobjetivo de todos los elementos de la pieza. Como se puede ver en la tabla se consiguen mejores resultados, aunque al no independizar el relleno de la superficie, no se tiene demasiado control sobre los desplazamientos máximos. Al utilizar métodos aleatorios de búsqueda de variables, en el caso de tener muchas variables, es necesario mucho tiempo de computación para alcanzar la combinación de todas las variables y ser capaz de seleccionar la mejor opción. Por otro lado, la interfaz de visualización de los resultados de la función objetivo, permite distinguir objetivos en tres ejes, por color y por escala. De este modo a partir de 3 objetivos se dificulta la visibilidad de la optimización de los resultados y a partir de 5 no es posible ver de manera directa los objetivos a optimizar.

Por este motivo, es recomendable la utilización de la metodología de optimización jerarquizada con más de un solver en el caso de querer un mayor control sobre cada uno de



los elementos de diseño o de las variables y objetivos del problema de optimización o en el caso de tener un problema de optimización complejo. En este último caso, si se variables y objetivos a optimizar, se reduce el tiempo de computación y se selecciona de una manera más intuitiva el resultado más idóneo.

#### 4. Conclusiones

Se ha conseguido una metodología que integra el diseño asistido por ordenador, con la optimización topológica y la optimización mono-objetivo o multiobjetivo en un único proceso gracias a la programación visual de Grasshopper y al diseño paramétrico a partir de algoritmos.

La metodología elaborada permite toda la flexibilidad que requiera el diseño y permite descomponer el problema en subproblemas de optimización jerarquizados para un mayor control por parte del diseñador, sin que exista ninguna barrera en el flujo de datos y por lo tanto en el proceso de diseño.

La metodología se ha aplicado a un caso sencillo en el que se ha descompuesto el problema en dos; por un lado el contorno de la pieza y por otro lado el relleno, y se han optimizado eficazmente cada una de sus partes para comprobar la eficacia de la metodología.

#### 5. Referencias

- Blattman, W. Generating CAD parametric features based on topology optimization results. Thesis. Department of Mechanical Engineering, Birgham Young University. 2008.
- Clarich, A., Russo, R. y Carriglo, M. Multi-objective optimization with modeFRONTIER interfaces for ANSA and metaPOST. 4th ANSA &  $\mu$ ETA International Conference.
- García-Domínguez, A. *Metodología para la optimización del diseño de piezas para la fabricación con impresión 3D*. Tesina Fin de Máster. UNED. 2015.
- García-Domínguez, A., Camacho, A.M., Claver, J. y Sebastián, M.A. Valoración de la incorporación de experiencias aplicativas de impresión 3D en la docencia de materias vinculadas a distintos escenarios productivos. *Proc. XXIV CUIEET*. Cádiz (Spain), 2016.
- Olason, Anton y Tidman, Daniel. (2010). *Methodology for Topology and Shape Optimization in the Design Process*. Tesina Fin de Máster. Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweeden.
- Park, Hyunpung and Lee, Kwan H. A new parametric control method for freeform mesh models, *Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2005, 248-257.
- Sheffer, A. and Unger, A. Efficient Adaptive Meshing of Parametric Models, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 1(4), 366- 375, 2001.
- Victoria Nicolás, Mariano. (2006). *Optimización de forma y topología con malla fija y algoritmos genéticos*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena.