

# Optimización de Geometrías para Impresión 3D

Leonard David Vivas Dallos  
Mariana Valencia Cubillos  
Tomás Escobar Rivera

March 6, 2025

## Abstract

El presente documento presenta el desarrollo de un software de optimización topológica para impresión 3D basado en el análisis de cargas y en la eficiencia de materiales. Se abordan problemáticas clave en diseño estructural y fabricación aditiva, proponiendo un modelo optimizado que mejora la resistencia y reduce el uso de material.

## Contents

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>3</b>
2.1	Objetivo General . . . . .	3
2.2	Objetivos Específicos . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Fundamentación Teórica</b>	<b>4</b>
3.1	Optimización Topológica . . . . .	4
3.2	Método de Material Sólido Isotrópico con Penalización (SIMP) . . . . .	4
3.2.1	Interpolación de la Rigidez . . . . .	4
3.2.2	Regularización con Filtros . . . . .	5
3.3	Análisis de Elementos Finitos (FEA) . . . . .	5
3.3.1	Ecuación de Equilibrio . . . . .	5
3.3.2	Interpolación de la Matriz de Rigidez . . . . .	6
3.4	Formulación del Problema de Optimización . . . . .	6
3.5	Análisis de Sensibilidad . . . . .	6
3.5.1	Regularización del Gradiente . . . . .	7
3.6	Proceso Iterativo de Optimización . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Etapas de Desarrollo</b>	<b>8</b>
4.1	Modelo de Referencia y Validación . . . . .	8
4.2	Caso de Estudio . . . . .	9
4.3	Interfaz y Adaptabilidad . . . . .	12
<b>5</b>	<b>Modelo Computacional y Arquitectura</b>	<b>13</b>

<b>6</b>	<b>Evaluación Experimental de la Optimización</b>	<b>14</b>
6.1	Impresión en 3D . . . . .	14
6.1.1	Modelos STL Generados . . . . .	14
6.1.2	Detalles de la Impresión . . . . .	15
6.2	Resultados de Impresión . . . . .	15
6.2.1	Geometría Inicial . . . . .	16
6.2.2	Modelo Optimizado 1 . . . . .	16
6.2.3	Modelo Optimizado 2 . . . . .	16
6.2.4	Análisis de Resultados . . . . .	16
<b>7</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>17</b>

# 1 Introducción

La impresión 3D ha revolucionado la manera en que se diseñan y fabrican objetos, ofreciendo una gran flexibilidad en el diseño y reduciendo los costos de producción en comparación con los métodos tradicionales de manufactura. Esta tecnología permite la fabricación de geometrías complejas sin la necesidad de moldes o herramientas especializadas, lo que facilita la producción personalizada y en lotes pequeños. Además, se ha convertido en una alternativa sostenible al minimizar el desperdicio de material en contraste con procesos sustractivos como el fresado o torneado.

A pesar de sus numerosas ventajas, la impresión 3D enfrenta varios desafíos técnicos. Uno de los principales es la optimización del diseño estructural para lograr piezas resistentes con el menor consumo de material posible. En muchos casos, los diseños generados carecen de eficiencia mecánica o requieren un uso excesivo de material para garantizar su estabilidad. Este problema se agrava en aplicaciones que demandan alta resistencia mecánica, como la industria aeroespacial, automotriz y biomédica, donde el peso y la durabilidad de las piezas son factores críticos.

En este contexto, el presente proyecto busca desarrollar un software de optimización topológica que permita mejorar la resistencia de las piezas impresas en 3D mientras se minimiza el uso de material. La optimización topológica es una herramienta clave para redefinir la forma y distribución de material en un diseño, asegurando que solo se mantenga la cantidad estrictamente necesaria para soportar las cargas aplicadas. Esto no solo resulta en una mayor eficiencia estructural, sino que también contribuye a la sostenibilidad de la manufactura aditiva.

El impacto potencial de este desarrollo es significativo en diversas industrias. En el sector aeroespacial, podría permitir la fabricación de componentes más ligeros sin comprometer su resistencia, reduciendo el consumo de combustible y mejorando la eficiencia operativa. En la industria automotriz, podría optimizar la producción de piezas funcionales que reduzcan el peso total de los vehículos. En el ámbito biomédico, podría aplicarse a la creación de implantes y prótesis personalizadas que maximicen su durabilidad y adaptabilidad a las necesidades de cada paciente. Sin embargo, cabe destacar que esta es una implementación netamente académica, que está sujeta a bastantes optimizados en tiempos de cómputo y desempeño, además de algunas generalizaciones posibles para poder aplicar esta implementación en otros ámbitos.

## 2 Objetivos

### 2.1 Objetivo General

Desarrollar un software en Python que permita optimizar diseños para impresión 3D, reduciendo el uso de material sin comprometer la resistencia estructural.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Implementar un sistema de entrada de datos para definir la geometría inicial y las condiciones de carga.

- Desarrollar un módulo de análisis estructural basado en métodos de elementos finitos.
- Aplicar algoritmos de optimización topológica para mejorar la resistencia con menor material.
- Generar modelos exportables en formatos compatibles con software de impresión 3D.

## 3 Fundamentación Teórica

### 3.1 Optimización Topológica

La optimización topológica es un método computacional que optimiza la distribución del material dentro de un dominio de diseño para mejorar el rendimiento estructural y reducir el peso. Puede ser definido como un problema de programación binaria, donde su objetivo es identificar dónde se requiere material para soportar cargas y dónde puede eliminarse sin comprometer la funcionalidad.

Este método maximiza la eficiencia estructural (por ejemplo, maximizando la rigidez o minimizando el cumplimiento, que mide la flexibilidad) mientras reduce la cantidad de material. Se basa en una función objetivo—comúnmente la minimización del cumplimiento estructural—sujeta a restricciones como un límite de volumen de material y condiciones de contorno (cargas y soportes).

Los diseños producidos mediante este método normalmente incluyen formas libres y detalladas que resultan complicadas o imposibles de fabricar con los métodos de producción tradicionales. Sin embargo, los diseños de optimización topológica son perfectos para los procesos de fabricación aditiva que tienen reglas de diseño menos estrictas y que pueden reproducir fácilmente formas complejas sin costes adicionales.

### 3.2 Método de Material Sólido Isotrópico con Penalización (SIMP)

El método de material sólido isotrópico con penalización (por sus siglas en inglés, *método SIMP*) es una técnica ampliamente usada en el contexto de optimización topológica. Este método consiste en parametrizar la distribución del material a través de una función de densidad continua  $\rho(x)$ , en la cual cada elemento finito del dominio de diseño tiene un valor de densidad que varía entre 0 (vacío) y 1 (material sólido).

El objetivo principal del método SIMP es minimizar la *compliance* (flexibilidad estructural), lo que equivale a maximizar la rigidez de la estructura bajo ciertas restricciones de volumen, esto se hace penalizando valores de densidad intermedios guiando la figura a una especie de configuración blanco-negro.

#### 3.2.1 Interpolación de la Rigidez

El método SIMP está basado en una relación heurística entre la densidad (relativa) de elementos  $x_i$  y el módulo de Young del elemento  $E_i$ . De esta manera, la rigidez del material se expresa mediante la ley de potencia:

$$E_i = E_0 x_i^p, \quad 0 < x_i \leq 1$$

donde:

- $E_i$  es el módulo de elasticidad interpolado del elemento  $i$ ,
- $E_0$  es el módulo de elasticidad (módulo de Young) del material sólido,
- $p > 1$  es un parámetro de penalización que evita valores intermedios de densidad

Una versión mejorada de este método introduce un término para evitar singularidades en la matriz de rigidez:

$$E_i = E_{min} + x_i^p(E_0 - E_{min})$$

donde  $E_{min}$  es un valor pequeño para evitar problemas numéricos ( $E_{min} \approx 10^{-9}E_0$ ).

### 3.2.2 Regularización con Filtros

El método SIMP puede generar problemas numéricos como *checkerboarding* (patrones de tablero de ajedrez) y dependencia de la malla. Para mitigar estos efectos, se aplican filtros de densidad que suavizan la variación de la densidad en la estructura:

$$\tilde{x}_i = \frac{\sum_{j \in N_i} H_{ij} V_j x_j}{\sum_{j \in N_i} H_{ij} V_j}$$

donde  $N_i$  es la vecindad del elemento  $i$  y  $H_{ij}$  es un peso basado en la distancia.

## 3.3 Análisis de Elementos Finitos (FEA)

El análisis de elementos finitos (por sus siglas en inglés, *FEA* es una técnica numérica que permite resolver problemas de mecánica estructural (predecir cómo responden las estructuras a fuerzas externas) al discretizar el dominio en pequeños elementos conectados por nodos.

### 3.3.1 Ecuación de Equilibrio

El problema estructural se resuelve mediante la siguiente ecuación:

$$K(x)U = F$$

donde

- $K(x)$  es la matriz global de rigidez, ensamblada a partir de las matrices de rigidez elementales  $K_i$ ,
- $U$  es el vector de desplazamientos nodales,
- $F$  es el vector de fuerzas externas aplicadas.

Cada elemento  $i$  tiene una matriz de rigidez dada por:

$$K_i = E(x_i)K_0$$

donde  $K_0$  es la matriz de rigidez de referencia de un elemento con  $E_0 = 1$

### 3.3.2 Interpolación de la Matriz de Rigidez

Usando la formulación obtenida del método SIMP, la matriz de rigidez global se expresa como:

$$K(\tilde{x}) = \sum_{i=1}^N [E_{\min} + \tilde{x}_i^p (E_0 - E_{\min})] K_0$$

donde  $\tilde{x}_i$  es la densidad filtrada del elemento.

## 3.4 Formulación del Problema de Optimización

La optimización topológica con SIMP, para nuestro caso de estudio, busca minimizar la flexibilidad estructural (*minimum compliance*) sujeta a una restricción de volumen:

$$\min_x C(x) = F^T U$$

sueto a:

$$\begin{aligned} K(\rho)U &= F \\ \sum_{i=1}^N V_i x_i &\leq V_{\max} \\ 0 &\leq x_i \leq 1, \quad \forall i \end{aligned}$$

donde:

- $C(x)$  es la *compliance* (trabajo realizado por las fuerzas externas),
- $V_{\max}$  es el volumen máximo permitido,
- $N$  es el número total de elementos.

## 3.5 Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad es usado para calcular cómo cambia la función objetivo  $C(x)$  con respecto a la densidad de cada elemento  $x$ .

$$\frac{\partial c}{\partial x_i} = -p x_i^{p-1} (E_0 - E_{\min}) u_i^T k_0 u_i$$

donde  $u_i$  es el vector de desplazamientos nodales del elemento. Este gradiente es usado para actualizar las densidades en cada iteración del algoritmo.

### 3.5.1 Regularización del Gradiente

Para evitar oscilaciones y asegurar una transición suave entre regiones con material y sin material, se aplica un filtro de sensibilidad:

$$\frac{\partial C}{\partial \tilde{x}_i} = \frac{\sum_{j \in N_i} H_{ij} V_j \frac{\partial C}{\partial x_j}}{\sum_{j \in N_i} H_{ij} V_j}$$

donde  $N_i$  es la vecindad del elemento  $i$ .

## 3.6 Proceso Iterativo de Optimización

El proceso de optimización topológica cae en un esquema iterativo que busca resolver el problema formulado anteriormente. Este procedimiento sigue los siguientes pasos:

1. **Inicialización de la distribución de material  $x$ :** Se asigna un valor inicial de densidad a cada elemento del dominio, generalmente uniforme o basado en una distribución inicial definida por el usuario.
2. **Resolución de la ecuación de equilibrio estructural:** Se resuelve el problema de elementos finitos (FEA) para obtener el campo de desplazamientos  $U$ .
3. **Cálculo de la complacencia  $C(x)$ :** Se evalúa la función objetivo.
4. **Análisis de sensibilidad para actualizar  $x$ :** Se calcula el gradiente de la complacencia respecto a la densidad del material en cada elemento, lo que permite determinar la dirección óptima de cambio en la distribución del material.
5. **Repetición del proceso hasta la convergencia:** Se actualizan los valores de  $x$  utilizando un criterio de optimalidad u otro método de optimización iterativa. El proceso continúa hasta que se cumpla un criterio de convergencia.

Al finalizar, se obtiene una distribución optimizada de material, que maximiza la rigidez estructural minimizando el uso de material.

---

**Algorithm 1** Optimización Topológica con SIMP

---

```
1: Inicialización: Inicializar_densidades()
2: while no_convergencia do
3:   Resolver_FEA()                                ▷ Análisis de Elementos Finitos
4:   Calcular_Sensibilidad()
5:   Actualizar_densidades()
6:   Aplicar_filtro()                                ▷ Regularización para evitar checkerboarding
7:   if convergencia then
8:     break
9:   end if
10: end while
11: Exportar_Resultado()
```

---

## 4 Etapas de Desarrollo

El desarrollo del proyecto se llevó a cabo en múltiples etapas, cada una con objetivos específicos para garantizar la correcta implementación y aplicabilidad del algoritmo de optimización topológica.

En una primera fase, se buscó verificar la validez de nuestras implementaciones a través de la comparación con un modelo de referencia, del cual se disponían resultados previos de optimización. Esta comparación permitió evaluar la precisión del método empleado y ajustar los parámetros clave del algoritmo.

Posteriormente, en la segunda etapa, se realizaron las modificaciones necesarias para adaptar la metodología a nuestro caso de estudio particular. En esta fase, se ajustaron las condiciones de carga, restricciones, configuraciones de dominio y de características propias del material para garantizar que la optimización respondiera a los requerimientos específicos del problema analizado.

Finalmente, en la tercera etapa, se trabajó en la generalización del algoritmo, desarrollando una interfaz que permitiera su uso en distintos casos de estudio sin requerir modificaciones significativas en el código. Esta interfaz proporciona flexibilidad y accesibilidad, facilitando la aplicación del método a una amplia gama de problemas de optimización topológica en impresión 3D.

### 4.1 Modelo de Referencia y Validación

Para verificar la correcta implementación del algoritmo de optimización topológica, se tomó como modelo de referencia el problema clásico de mínima complacencia en una viga en voladizo. Este modelo, ampliamente utilizado en la literatura, permite evaluar la precisión y estabilidad del método comparando los resultados obtenidos con soluciones previamente documentadas.

El dominio de diseño consiste en una viga prismática, completamente restringida en un extremo y sometida a una carga distribuida vertical descendente en el otro extremo.

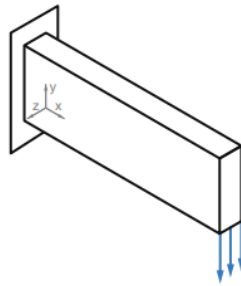


Figure 1: Modelo de Referencia

Este modelo de referencia, brindaba algunos parámetros que vamos a omitir para efectos de práctica, sin embargo, permitió ajustar detalles de la implementación del código obteniendo como resultado una validación de la misma. Siendo así, para este modelo se obtuvieron los siguientes resultados:



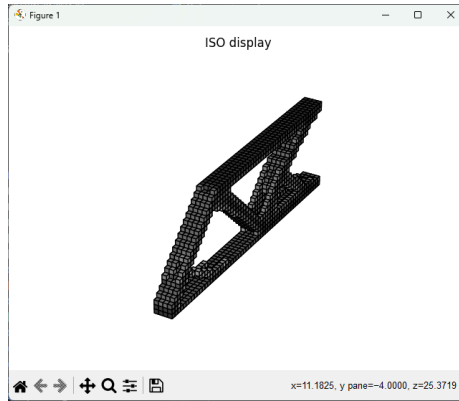


Figure 2: Resultados Modelo Experimental

Además, como resultados adicionales del proceso iterativo, se obtuvieron 139 iteraciones, con un valor de función objetivo inicial de 2728753.4300 y un valor objetivo final de 232685.4106

## 4.2 Caso de Estudio

Luego de validar los resultados obtenidos por nuestro código y asegurarnos de que los resultados que este brinda son correctos, se procede a realizar la modificación de nuestros parámetros con el fin de centrarnos en nuestro caso de estudio, nuestro problema de interés. Además de esto, se agregan ciertas funcionalidades al código con el fin de poder ver la imagen obtenida de manera suavizada y, más aún, se realiza la función que permite obtener los archivos .STL, los cuales permitirán realizar la impresión de ambos modelos obtenidos.

El caso de estudio consiste en una figura rectangular, representando una estructura sujeta a condiciones de carga y restricciones específicas. En este modelo, los cuatro extremos de la figura están anclados, lo que significa que no pueden desplazarse ni rotar, imponiendo restricciones en los grados de libertad de estos nodos. Adicionalmente, se aplica una fuerza en la parte superior de la geometría, generando una distribución de esfuerzos que influye directamente en la optimización del material dentro del dominio de diseño. A continuación se muestra la imagen del diseño:

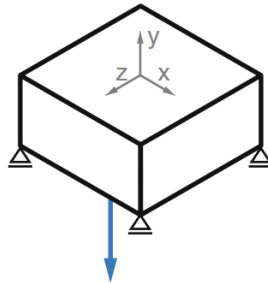


Figure 3: Caso de Estudio

Para este caso, la optimización se enfoca en encontrar una distribución de material que maximice la rigidez estructural, asegurando una adecuada resistencia a la carga aplicada mientras se minimiza la cantidad de material utilizado. Se ajustaron los parámetros de densidad, penalización y filtro de sensibilidad para garantizar una convergencia estable y obtener una solución viable para la impresión 3D, además de ajustar los parámetros del material con el que vamos a trabajar, el PLA. Siendo así, los parámetros usados en el modelo son:

- Propiedades del Material
  - $E_0 = 3.5$  (Módulo de Young)
  - $E_{min} = 1e - 9$
  - $\nu = 0.36$  (Coeficiente de Poisson)
- Propiedades de la Figura
  - Dimensiones ( $mm$ ):  $40 \times 40 \times 20$
- Configuración de la Optimización
  - Volumen: 0.3
  - Penalización: 3.0
  - Rmin: 1.5
  - Máximo Iteraciones: 200

Así pues, con estas configuraciones se obtuvo el siguiente resultado.

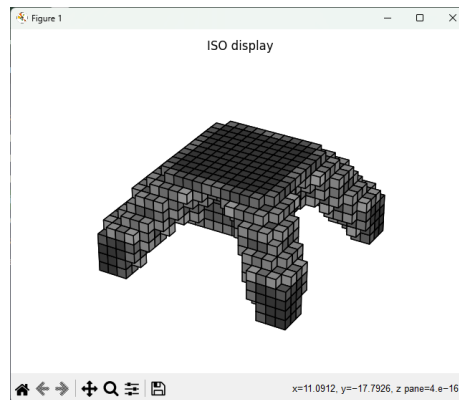


Figure 4: Resultado Optimización

Cabe destacar que se realizó una prueba para verificar la importancia de algunos de los parámetros, notando una relevancia grande de la penalización y del rmin. En nuestro caso de estudio, una modificación del rmin de 1.5 a 1.0 cambio significativamente los resultados obtenidos, obteniendo:

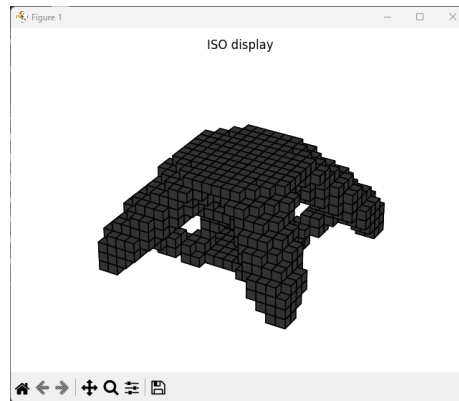


Figure 5: Resultado Optimización 2

Siendo así, usaremos ambos casos para realizar su respectivo análisis. Finalmente, con el modelo optimizado, se generaron las representaciones gráficas de estas, un modelo suavizado de los mismos, obteniendo para ambos casos:

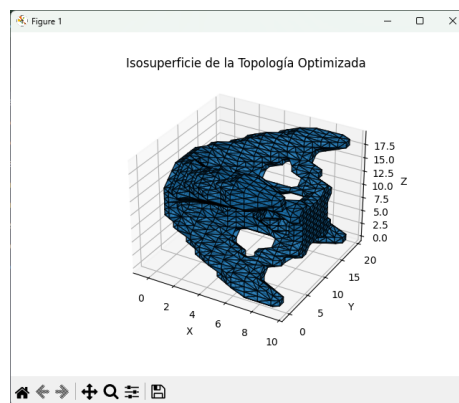


Figure 6: Optimización 1 Suavizada

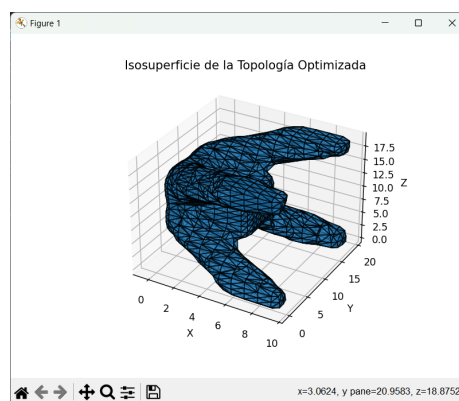


Figure 7: Optimización 2 Suavizada

De la misma manera, se generan los archivos .STL, lo que permite evaluar visualmente la solución obtenida y proceder con la fabricación mediante impresión 3D, facilitando la validación experimental del diseño optimizado, el producto de estos archivos se verá más adelante.

### 4.3 Interfaz y Adaptabilidad

Para lograr una generalización efectiva del proyecto y facilitar su uso en distintos casos de estudio, se consideró necesario el desarrollo de una interfaz básica que permitiera a los usuarios ingresar los parámetros de optimización de manera intuitiva y visualizar los resultados obtenidos en cada iteración del proceso.

Esta interfaz fue diseñada con el objetivo de proporcionar flexibilidad y accesibilidad, permitiendo modificar los parámetros clave del algoritmo, tales como la resolución de la malla, el factor de penalización, las restricciones de volumen y las condiciones de carga. Con ello, se garantiza que el código pueda adaptarse a diferentes configuraciones sin necesidad de modificar directamente el código fuente.

Además, la interfaz incluye un módulo de visualización, en el cual se pueden observar los resultados obtenidos en cada iteración del proceso de optimización. Esto permite un análisis progresivo de la evolución del diseño y facilita la toma de decisiones respecto a la convergencia del algoritmo.

Finalmente, se incorporó una funcionalidad que permite generar automáticamente los archivos .STL a partir del modelo optimizado. Estos archivos son esenciales para la fabricación mediante impresión 3D, permitiendo llevar el diseño optimizado desde el entorno digital hasta su validación experimental mediante la manufactura aditiva.

Con esta implementación, se logra que el software desarrollado sea más accesible, versátil y adaptable a una amplia gama de problemas de optimización topológica, asegurando su aplicabilidad en distintos escenarios de ingeniería estructural y fabricación aditiva. Veamos un poco las generalidades de la interfaz mediante una imagen.

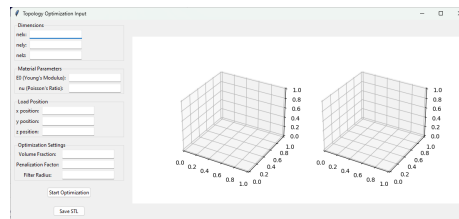


Figure 8: Gui Básica

Una vez visto el diseño de la interfaz, podemos ver la interfaz en ejecución, en donde la primer imagen muestra uno de las iteraciones y la segunda muestra el proceso finalizado, se mostrará solo el primer diseño,

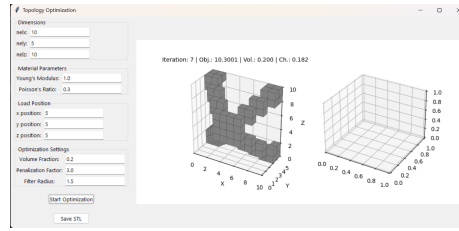


Figure 9: GUI en Proceso Iterativo

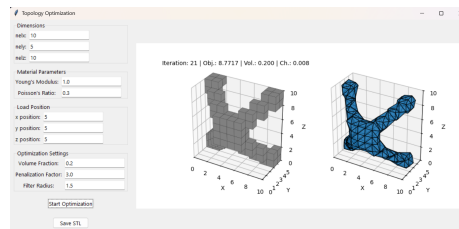


Figure 10: GUI con Optimización Finalizada

## 5 Modelo Computacional y Arquitectura

La estructura del proyecto `Optimization-Gui` está organizada en un solo archivo de Python, segmentado mediante funciones para encapsular el código, de la siguiente manera:

```
optimization_gui.py/
|-- lk_H8
|-- get_load_and_fixed_dofs
|-- setup_FE
|-- generate_edofMat
|-- get_global_stiffness_indices
|-- create_filter
|-- optimize_topology
|-- display_3D
|-- display_solid_3D_1
|-- export_optimized_stl
|-- display_iso_surface_3D
|-- export_iso_stl
|-- start_optimization
|-- def update_plots
|-- display_solid_3D
|-- display_solid_cube
|-- display_iso_surface_3D
|-- save_stl
```

- **lk\_H8**: Calcula la matriz de rigidez de un elemento hexaédrico (H8) considerando la relación de Poisson.

- **get\_load\_and\_fixed\_dofs:** Determina los grados de libertad donde se aplican cargas y las condiciones de frontera fijas.
- **setup\_FE:** Configura el análisis de elementos finitos (FEA), incluyendo la generación del vector de fuerzas y desplazamientos.
- **generate\_edofMat:** Genera la matriz de conectividad de los elementos, necesaria para ensamblar la matriz de rigidez global.
- **get\_global\_stiffness\_indices:** Precalcula los índices globales de filas y columnas para ensamblar la matriz de rigidez.
- **create\_filter:** Crea un filtro de sensibilidad para suavizar los resultados y evitar patrones irregulares en la distribución del material.
- **optimize\_topology:** Ejecuta el proceso iterativo de optimización usando el método SIMP.

Para ver más a detalle que contiene cada documento puede revisar el código fuente. Allí cada función está bien comentada y es más que suficiente para entender que se está haciendo.

## 6 Evaluación Experimental de la Optimización

Llegamos a la etapa esperada del proyecto: la impresión y validación de nuestros resultados. Tras la implementación del algoritmo de optimización topológica y la generación de los modelos optimizados, procedemos a su fabricación mediante impresión 3D. Esta fase es crucial, ya que nos permite evaluar físicamente la efectividad del diseño optimizado y compararlo con la estructura original. A través de la manufactura aditiva, obtenemos prototipos que pueden ser sometidos a pruebas mecánicas para validar su resistencia, rigidez y eficiencia en el uso del material, asegurando así la coherencia entre los resultados teóricos y su aplicación en el mundo real.

### 6.1 Impresión en 3D

Para validar experimentalmente los resultados obtenidos en la optimización topológica, se procedió a la impresión 3D de los modelos generados. En esta sección, se presentan los archivos .STL utilizados, junto con los parámetros de impresión y una imagen de los resultados obtenidos.

#### 6.1.1 Modelos STL Generados

Cada una de los testeos genera dos modelos STL, uno con la optimización y otro con la optimización suavizada, tomando en cuenta las imágenes previamente mostradas. Estos archivos STL fueron cargados a un proyecto en la interfaz Cura, junto con nuestro modelo inicial, para obtener lo siguiente:

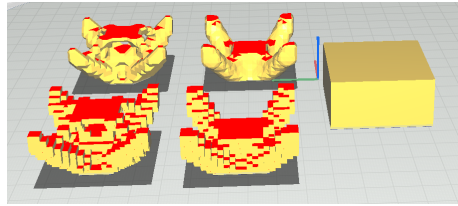


Figure 11: Modelos STL a Imprimir

### 6.1.2 Detalles de la Impresión

La fabricación de los modelos se realizó utilizando una AnyCubic Predator. Los parámetros de impresión fueron los siguientes:

- Material: PLA
- Altura de capa: 0.2
- Densidad de relleno: 20%
- Temperatura de extrusión: 190 °C
- Temperatura de cama: 55 °C
- Velocidad de Impresión: 70 mm/s
- Soportes: Si, en árbol
- Adherencia a la placa: Falda

El tiempo total de impresión para nuestros modelos fue de 5 horas 11 minutos, con un material utilizado de aproximadamente 42 gramos.

## 6.2 Resultados de Impresión

Luego de completar la impresión 3D, se llevó a cabo el posprocesamiento de los modelos, el cual incluyó la eliminación de los soportes de impresión y el lijado ligero de ciertas áreas para mejorar el acabado superficial. Tras este proceso, se obtuvieron los modelos finales, listos para su evaluación.

A continuación, se muestra una imagen de los modelos optimizados impresos en 3D, donde se puede apreciar la distribución del material y la geometría obtenida después del posprocesamiento:

### 6.2.1 Geometría Inicial

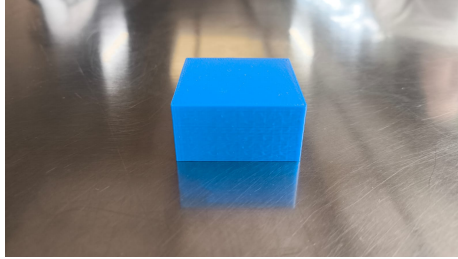


Figure 12: Cubo Inicial

### 6.2.2 Modelo Optimizado 1

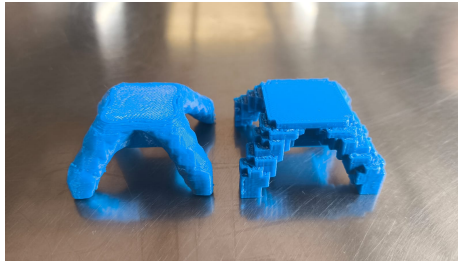


Figure 13: Modelo Optimizado 1

### 6.2.3 Modelo Optimizado 2

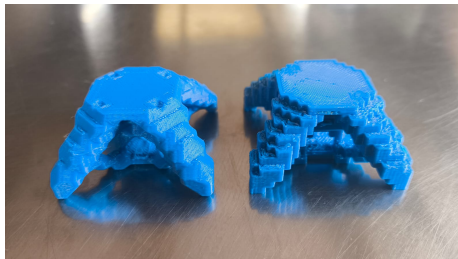


Figure 14: Modelo Optimizado 2

### 6.2.4 Análisis de Resultados

Este resultado permite evaluar la fidelidad de la impresión con respecto al modelo digital y analizar las diferencias entre la geometría optimizada y el diseño original, asegurando que la fabricación aditiva pueda replicar con precisión los diseños generados mediante optimización topológica.

Además de esto, pudimos evaluar la resistencia y funcionalidad del modelo, mediante algunas pruebas de compresión realizadas a los prototipos, obteniendo resultados favorables en cada una de estas.



## 7 Conclusiones

El desarrollo de este proyecto permitió implementar y validar un método de optimización topológica aplicado a la impresión 3D, demostrando su capacidad para diseñar estructuras eficientes en el uso de material sin comprometer su resistencia. Mediante el método SIMP y el análisis de elementos finitos (FEA), se generaron modelos optimizados que, tras ser fabricados mediante impresión 3D, evidenciaron una correspondencia entre los resultados teóricos y experimentales, confirmando la efectividad del procedimiento.

Este enfoque presenta ventajas significativas, como la reducción del uso de material y el diseño de estructuras más rígidas y ligeras, lo que conlleva beneficios tanto en costos como en desempeño estructural. Además, la automatización del proceso permite generar soluciones eficientes sin intervención manual intensiva, haciéndolo aplicable a distintos problemas de ingeniería. Sin embargo, se encontraron ciertas dificultades a lo largo del desarrollo, principalmente relacionadas con el alto costo computacional para modelos detallados, la necesidad de ajustar parámetros para garantizar la convergencia del algoritmo y los desafíos en la impresión 3D de geometrías optimizadas, que en algunos casos requirieron soportes adicionales y un posprocesamiento cuidadoso.

Como oportunidades de mejora, se plantea la posibilidad de optimizar los algoritmos para acelerar la convergencia, explorar el uso de GPUs o cómputo distribuido para procesar modelos más complejos y mejorar la integración con herramientas de simulación para predecir el comportamiento estructural antes de la fabricación. Además, la automatización del posprocesamiento y la optimización de la generación de soportes en la impresión 3D podrían mejorar la fidelidad entre el modelo digital y el impreso. En conclusión, este proyecto demostró el potencial de la optimización topológica en la fabricación aditiva, abriendo el camino para futuras mejoras que hagan el proceso más eficiente y accesible para diversas aplicaciones en ingeniería estructural y manufactura avanzada.

## References

- [1] K. Liu and A. Tovar, *An efficient 3D topology optimization code written in Matlab*, Structural and Multidisciplinary Optimization, vol. 50, no. 6, pp. 1175–1196, 2014. doi: 10.1007/s00158-014-1107-x.
- [2] *Propiedades del PLA*. Disponible en: <https://sites.google.com/view/poliacidolactico-coma/policido-lctico/propiedades-del-pla>. Último acceso: 6 de marzo de 2025.
- [3] ScienceDirect. *Topology optimization*. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com>. Consultado el 6 de marzo de 2025.
- [4] Xian, Y., et al. *Integration of additive manufacturing process-induced material characteristics into topology optimization*. Nombre del Journal, Vol. XX, No. XX, pp. XX–XX, 2024.
- [5] Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing* (3rd ed.). Springer, 2021.

- [6] Bendsøe, M. P., & Sigmund, O. *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*. Springer, 2004.

## Anexos

### Repositorios del Proyecto

- **Optimizacion-de-Geometrias-para-Impresion-3D** : Optimización de Geometrías para Impresión 3D  
<https://github.com/mval23/Optimizacion-de-Geometrias-para-Impresion-3D>