



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIERÍA  
INDUSTRIAL VALENCIA

**TRABAJO FIN DE MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

# **OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA COMO MEDIO DE GENERACIÓN DE IDEAS PARA EL DISEÑO DE PRODUCTO.**

AUTOR: Héctor Giménez Marín

TUTOR: Jorge Alcaide Marzal

**Curso Académico: 2020-21**



# RESUMEN

El diseño generativo está ganando importancia en todas las áreas del diseño, pero dentro de la ingeniería la rama más extendida es la optimización topológica. Mediante ésta se pueden obtener resultados óptimos, donde las formas resultantes normalmente responden a un problema de resistencia mecánica. Las limitaciones a las que se enfrenta el diseñador a la hora de generar alternativas, que a su vez le sirvan como inspiración para un futuro diseño son evidentes.

Por lo tanto, en este Trabajo Final de Máster, se aborda la idea de utilizar la optimización topológica como herramienta para obtener distintos diseños y formas, que no limiten al diseñador a la hora de obtener ideas nuevas para la creación del producto.

En este trabajo se recogerán los resultados obtenidos para distintos productos, analizados en distintas herramientas de optimización topológica. Para acabar con un análisis y conclusiones sobre la viabilidad de utilizar esta herramienta para el fin anteriormente descrito.

**Palabras Clave:** Diseño Generativo; Optimización Topológica; Diseño Estético



# ABSTRACT

Generative design is gaining importance in all areas of design, but within engineering the most widespread branch is topological optimization. By means of this, optimal results can be obtained, where the resulting shapes normally respond to a mechanical resistance problem. The limitations that the designer faces when generating alternatives, which in turn serve as inspiration for a future design, are evident.

Therefore, in this Final Master's Thesis, the idea of using topological optimization as a tool to obtain different designs and shapes is addressed, which does not limit the designer when it comes to obtaining new ideas for the creation of the product.

In this Final Master's Thesis, the results obtained for different products will be collected, analyzed in different topological optimization tools. To finish with an analysis and conclusions about the feasibility of using this tool for the purpose described above.

**Keywords:** Generative Design; Topological Optimization; Aesthetic Design.



# ÍNDICE DE LOS DOCUMENTOS

**DOCUMENTO DE LA MEMORIA** 1

**DOCUMENTO DEL PROSUPUESTO** 51



## DOCUMENTO I

# MEMORIA



# ÍNDICE DE LA MEMORIA

<b>1</b>	<b>DISEÑO GENERATIVO Y OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>DISEÑO GENERATIVO</b>	<b>1</b>
1.1.1	TÉCNICAS PREVIAS	1
1.1.2	APLICACIÓN AL DISEÑO DE PRODUCTO	3
<b>1.2</b>	<b>OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA</b>	<b>6</b>
1.2.1	APLICACIÓN AL DISEÑO DE PRODUCTO	6
<b>1.3</b>	<b>DIFERENCIAS ENTRE DISEÑO GENERATIVO Y OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>HERRAMIENTAS DE DISEÑO</b>	<b>8</b>
<b>2.1</b>	<b>FUSION 360</b>	<b>8</b>
2.1.1	INTERFAZ	9
2.1.2	HERRAMIENTA DE OPTIMIZACIÓN	11
<b>2.2</b>	<b>RHINOCEROS</b>	<b>12</b>
2.2.1	GRASSHOPPER	13
2.2.2	TOPOS	15
<b>3</b>	<b>PRODUCTOS ESCOGIDOS.</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>GENERACIÓN DE SOLUCIONES.</b>	<b>22</b>
<b>4.1</b>	<b>LLANTA DE COCHE</b>	<b>22</b>
4.1.1	FUSION 360	24
4.1.2	GRASSHOPPER	24
<b>4.2</b>	<b>PÉRGOLA</b>	<b>25</b>
4.2.1	FUSION 360	26
4.2.2	GRASSHOPPER	26
<b>4.3</b>	<b>CUADRO DE BICI</b>	<b>27</b>
4.3.1	FUSION 360	27
<b>4.4</b>	<b>SOPORTE FAROLA</b>	<b>28</b>
4.4.1	FUSION 360	28

<b>5</b>	<b>RESULTADOS.</b>	<b>29</b>
<b>5.1</b>	<b>LLANTA DE COCHE</b>	<b>29</b>
5.1.1	FUSION 360	29
5.1.2	GRASSHOPPER	31
<b>5.2</b>	<b>PÉRGOLA</b>	<b>37</b>
5.2.1	FUSION 360	38
5.2.2	GRASSHOPPER	41
<b>5.3</b>	<b>CUADRO DE BICI</b>	<b>44</b>
<b>5.4</b>	<b>SOPORTE FAROLA</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>47</b>
<b>6.1</b>	<b>FUSION 360</b>	<b>47</b>
<b>6.2</b>	<b>GRASSHOPPER</b>	<b>47</b>
<b>6.3</b>	<b>ESTRATEGIAS SEGUIDAS</b>	<b>48</b>
6.3.1	VARIAR LA DIRECCIÓN DE LAS FUERZAS APLICADAS	48
6.3.2	HACER CAMBIOS EN LA GEOMETRÍA	48
6.3.3	VARIAR LOS PARÁMETROS DE LA OPTIMIZACIÓN	49
<b>6.4</b>	<b>VALORACIONES FINALES</b>	<b>49</b>
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>50</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Ejemplo de modelador paramétrico</i>	2
<i>Figura 2 Ejemplo de modelador topológico (TopMod)</i>	2
<i>Figura 3 Aplicación de diseño mediante fractales en lámparas impresas en 3D</i>	3
<i>Figura 4 Ejemplo de morphing aplicado a varios productos</i>	3
<i>Figura 5 Metodología para la aplicación del diseño generativo al diseño de una silla (3)</i>	4
<i>Figura 6 Aplicación del diseño generativo al diseño del bastidor de un monoplaza (3)</i>	5
<i>Figura 7 Aplicación del diseño generativo a la distribución en planta (3)</i>	5
<i>Figura 8 Aplicación del diseño generativo al diseño de un panel separador de la cabina de un Airbus (3)</i>	5
<i>Figura 9 Ejemplo de reducción del número de elementos de un ensamblaje</i>	6
<i>Figura 10 Ejemplo de optimización topológica de una componente mecánico</i>	7
<i>Figura 11 Interfaz principal de Autodesk Fusion 360</i>	9
<i>Figura 12 Detalle del panel de datos de Fusion 360</i>	10
<i>Figura 13 Detalle de la barra de herramientas de Fusion 360</i>	10
<i>Figura 14 Detalle de la interfaz del Fusion 360</i>	11
<i>Figura 15 Detalle de elementos de la interfaz para la optimización del diseño en Fusion 360</i>	11
<i>Figura 16 Detalle de la barra de herramientas de optimización en Fusion 360</i>	12
<i>Figura 17 Detalle de la interfaz de Rhino</i>	13
<i>Figura 18 Detalle de la interfaz principal de Grasshopper</i>	14
<i>Figura 19 Operación suma mediante bloques en Grasshopper</i>	14
<i>Figura 20 Operación suma de varios valores mediante bloques en Grasshopper</i>	14
<i>Figura 21 Componentes de TopOs agrupados por pestañas en Grasshopper</i>	15
<i>Figura 22 Componente de TopOs encargado de generar el modelo</i>	15
<i>Figura 23 Componente de TopOs encargado de generar los datos de la malla del modelo</i>	16
<i>Figura 24 Componente de TopOs encargado de generar las condiciones de contorno del modelo</i>	16
<i>Figura 25 Componente de TopOs encargado de asignar el tamaño de elemento de la malla</i>	17
<i>Figura 26 Detalle de los componentes de TopOs necesarios para generar el modelo</i>	17
<i>Figura 27 Componente de TopOs encargado de realizar la optimización topológica</i>	17
<i>Figura 28 Componente de TopOs encargado de controlar los parámetros que controlan el proceso</i>	18
<i>Figura 29 Detalle general de los componentes de TopOs necesarios para la optimización del modelo</i>	18
<i>Figura 30 Distintos diseños de llantas de coche</i>	19
<i>Figura 31 Zapatilla con el talón diseñado mediante diseño generativo</i>	19
<i>Figura 32 Ejemplo de muebles generados mediante diseño generativo</i>	20
<i>Figura 33 Ejemplo de disipadores térmicos diseñados mediante diseño generativo</i>	20
<i>Figura 34 Medidas de llanta y rueda para un Ford Focus del 2006</i>	22
<i>Figura 35 Sección y medidas de una llanta de coche</i>	23
<i>Figura 36 Diseño de la llanta de coche en Fusion 360</i>	23
<i>Figura 37 Modelo de la llanta preparado para optimizar en Fusion 360</i>	24
<i>Figura 38 Modelo de la llanta preparado para optimizar en Grasshopper</i>	25
<i>Figura 39 Modelo de la pérgola preparado para optimizar en fusión 360</i>	26

<i>Figura 40 Modelo de la pérgola preparado para optimizar en Grasshopper</i>	26
<i>Figura 41 Medidas utilizadas para el diseño del cuadro de la bicicleta</i>	27
<i>Figura 42 Modelo del cuadro de la bicicleta preparado para optimizar en Fusion 360</i>	27
<i>Figura 43 Soporte de una farola utilizado como inspiración</i>	28
<i>Figura 44 Modelo del soporte de la farola preparado para optimizar en Fusion 360</i>	28
<i>Figura 45 Detalle del cambio de geometría de la llanta</i>	30
<i>Figura 46 Resultados de la optimización de la llanta en Fusion 360 para distintas direcciones de las fuerzas aplicadas</i>	30
<i>Figura 47 Resultados de la optimización de la llanta en Fusion 360 tras el cambio de geometría para distintas fuerzas aplicadas</i>	31
<i>Figura 48 Resultados de la optimización de la llanta en Grasshopper para distintos tamaños de elemento y V, fuerzas aplicadas en eje z negativo</i>	32
<i>Figura 49 Resultados de la optimización de la llanta en Grasshopper para distintos Sr en dos tipos de filtro, fuerzas aplicadas en eje x</i>	33
<i>Figura 50 Resultados de la optimización de la llanta en Grasshopper para distintos Sr en dos tipos de filtro, fuerzas aplicadas en eje y</i>	34
<i>Figura 51 Resultados de la optimización de la llanta en Grasshopper para distintos Sr en dos tipos de filtro, fuerzas aplicadas en eje z negativo</i>	35
<i>Figura 52 Resultados de la optimización de la llanta en Grasshopper para distintos tamaños de elemento y V, fuerzas aplicadas en eje z negativo</i>	36
<i>Figura 53 Resultados de la optimización de la llanta en Grasshopper para distintos V, fuerzas aplicadas en eje x e y</i>	37
<i>Figura 54 Resultados de la optimización de la pérgola en Fusion 360 para distintas geometrías</i>	38
<i>Figura 55 Resultados de la optimización de la pérgola en Fusion 360 para distintas geometrías</i>	39
<i>Figura 56 Resultados de la optimización de la pérgola en Fusion 360 para distintas geometrías</i>	40
<i>Figura 57 Resultados de la optimización de la pérgola en Grasshopper para distintas geometrías, tamaños de elemento y V</i>	41
<i>Figura 58 Resultados de la optimización de la pérgola en Grasshopper para distintas geometrías, tamaños de elemento y V</i>	42
<i>Figura 59 Resultados de la optimización de la pérgola en Grasshopper para distintas geometrías, tamaños de elemento y V</i>	43
<i>Figura 60 Resultados de la optimización del cuadro de la bici en Fusion 360 variando la dirección de las fuerzas aplicadas</i>	44
<i>Figura 61 Resultados de la optimización del soporte de la farola en Fusion 360 variando la dirección de las fuerzas aplicadas</i>	45
<i>Figura 62 Resultados de la optimización del soporte de la farola en Fusion 360 variando la geometría</i>	46

# 1 Diseño generativo y optimización topológica

La inclusión de los ordenadores durante toda la vida útil del producto ha generado multitud de herramientas informáticas, que han provocado que el tiempo desde la concepción de un producto hasta que se lanza al mercado, sea muy pequeño en comparación a épocas anteriores donde no existía esa implementación.

Por lo tanto, existen herramientas informáticas que ayudan al diseñador durante todo el proceso de plasmar un diseño desde una idea inicial, hasta un producto acabado. Pero este proceso de creación de ideas desde cero cotidianamente siempre ha tenido la parte humana como protagonista.

Pero gracias a esta inclusión de los ordenadores de la que se ha hablado, ha sido posible durante los últimos años crear toda una familia de herramientas que hacen que el papel de diseñador tradicional haya cambiado.

En este primer punto del Trabajo Final de Máster (TFM en adelante) se dará una visión general sobre dos herramientas de diseño como son el diseño generativo y la optimización topológica, sobre las diferencias entre ambas y la motivación de desarrollar este TFM.

## 1.1 Diseño generativo

El diseño generativo es una disciplina emergente dentro del campo del diseño que permite explorar, generar y seleccionar formas y soluciones de diseño y presenta un cambio de paradigma en el proceso de diseño.

No se basa en que el diseñador sea el que cree el producto directamente, sino que el diseñador crea unas reglas algorítmicas que, mediante el uso de un ordenador son capaces de generar esas formas y soluciones de diseño.

Generalmente estas reglas algorítmicas se basan en la variación de unos parámetros concretos que permiten producir soluciones en un contexto determinado, y al ser este proceso de producción algorítmico, puede ser manejado eficientemente por un ordenador.

Se podría entender por ello que el diseño generativo es una herramienta que fomenta la creatividad, ya que el diseñador no produce las soluciones, sino que diseña el proceso para generar multitud de ellas.

### 1.1.1 Técnicas previas

Ahora se van a nombrar algunas técnicas que han desembocado en las herramientas utilizadas actualmente en los softwares generativos. Estas técnicas pretenden explorar formas no intencionadas con el objetivo de obtener nuevas ideas. Algunas técnicas son (1):

- **Modeladores paramétricos:** Se trata de software que genera formas dando valores a determinados parámetros que controlan estas formas. Como ejemplo de estos modeladores se tienen los que se basan en una fórmula matemática que describe una enorme cantidad de formas vistas en la naturaleza, desarrollada por el botánico belga Johan Gielis, llamada superfórmula.

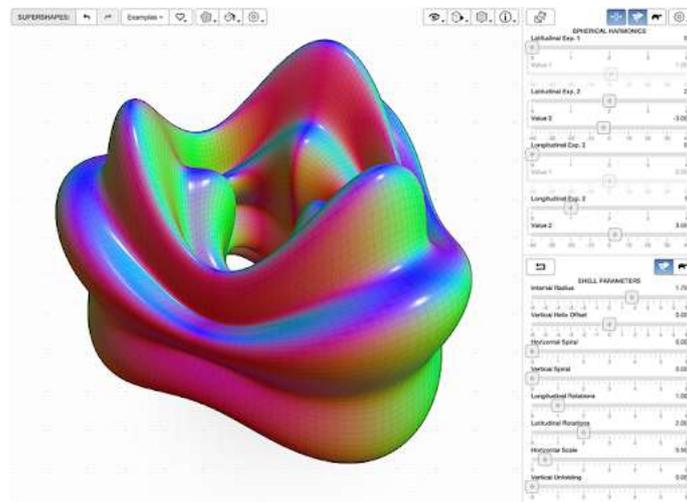


Figura 1 Ejemplo de modelador paramétrico

- **Modeladores topológicos:** Estos tipos de modeladores no varían estrictamente parámetros para generar formas, sino que alteran la topología de estas formas. Un ejemplo es TopMod, una aplicación desarrollada por el Dr. Akleman de la Texas A&M University, que se basa en cambiar dinámicamente la topología de mallas poligonales. Este cambio se efectúa de forma consistente con algoritmos de subdivisión, lo que permite trabajar posteriormente la malla en modeladores poligonales.

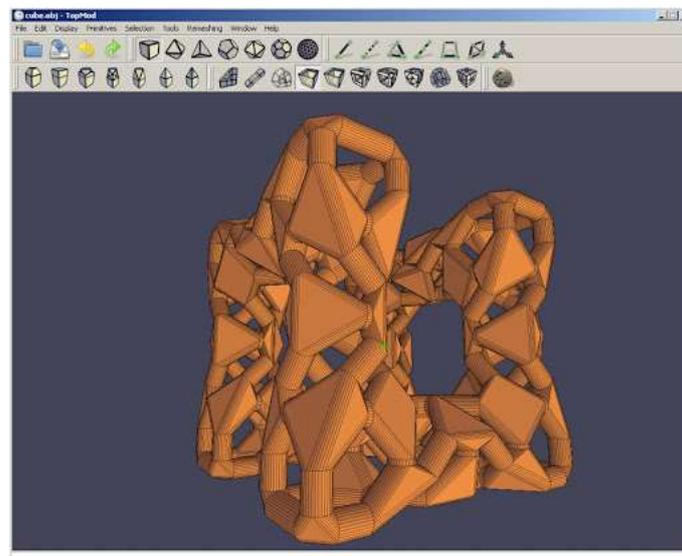


Figura 2 Ejemplo de modelador topológico (TopMod)

- **Fractales:** Los diseñadores siempre han tratado de solucionar los problemas de diseño inspirándose en la naturaleza, esta aplicación a los productos creados por los humanos se le llama biónica, En la naturaleza existen patrones matemáticos descritos por objetos matemáticos denominados fractales, objetos geométricos cuya estructura básica, fragmentada o aparentemente irregular se repite a diferentes escalas.



Figura 3 Aplicación de diseño mediante fractales en lámparas impresas en 3D

- **Morphing:** La combinación de formas es otro de los recursos que se emplean para fomentar la creatividad, ya que mediante procedimientos matemáticos es posible combinar dos o más formas originales, generando fases intermedias entre ambas formas. Existen limitaciones a la hora de realizar la transformación entre mallas poligonales por razones de semejanza e igualdad de parámetros que actualmente están en estudio, por lo que es una herramienta muy utilizada en 2D.

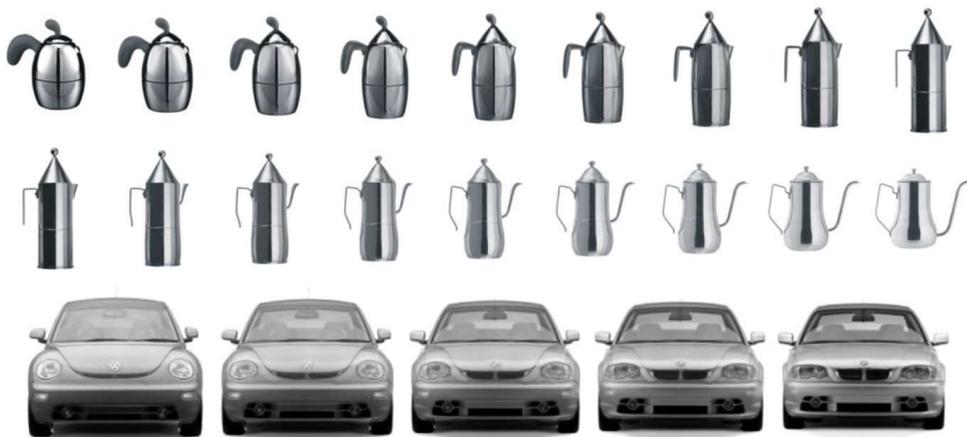


Figura 4 Ejemplo de morphing aplicado a varios productos

### 1.1.2 Aplicación al diseño de producto

Los diseñadores de producto suelen estar acostumbrados a utilizar el ordenador para modelar, no para diseñar. Es decir, no se crean formas mediante el ordenador, se construyen formas ya pensadas previamente.

El diseño generativo supone aprovechar las ventajas del ordenador para facilitar la exploración de soluciones, solo así se puede aprovechar el potencial “creativo” de estas

herramientas. Se debe emplear estas herramientas informáticas como un espacio de expresión y exploración, no como una manera de fabricar modelos.

El diseño generativo es empleado por numerosas empresas en distintos campos de la industria, para Laura Trautmann (2) el diseño generativo también genera un mayor impacto positivo el sobre la precepción de los clientes en el producto. Estudios de Deloitte muestran que uno de cada cinco clientes está dispuesto a pagar un 20% más por un producto único y/o personalizado.

Jeff Kowalski, jefe Tecnológico de Autodesk hasta 2018, explica el cambio de paradigma dentro del diseño de producto para los próximos años dando varios ejemplos (3). En el primero expone el caso de diseñar una silla, donde dando unos pocos datos al ordenador, este es capaz de generar miles, sino millones de diseños, que en base a los gustos del cliente se puede seleccionar el más adecuado

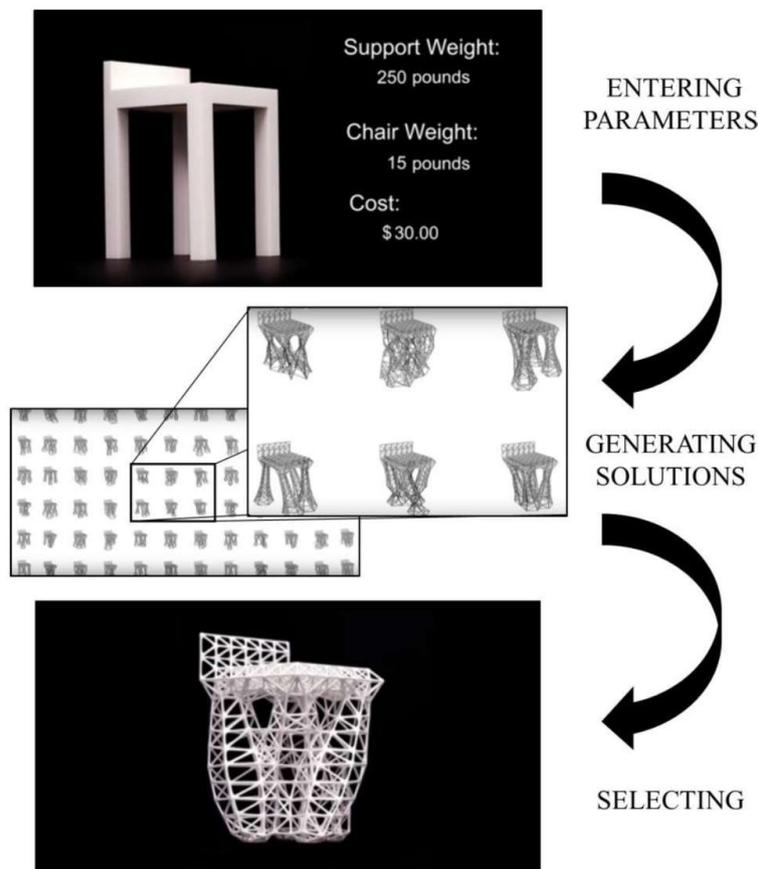


Figura 5 Metodología para la aplicación del diseño generativo al diseño de una silla (3)

También se nombran las ventajas en reducción de costes relacionados al diseño y fabricación de los productos generados mediante diseño generativo, entre estos ejemplos se nombran la generación del bastidor de un monoplaza, la distribución en planta y de espacios en arquitectura y el diseño entre Autodesk y Airbus del panel de separación de la cabina de un avión.

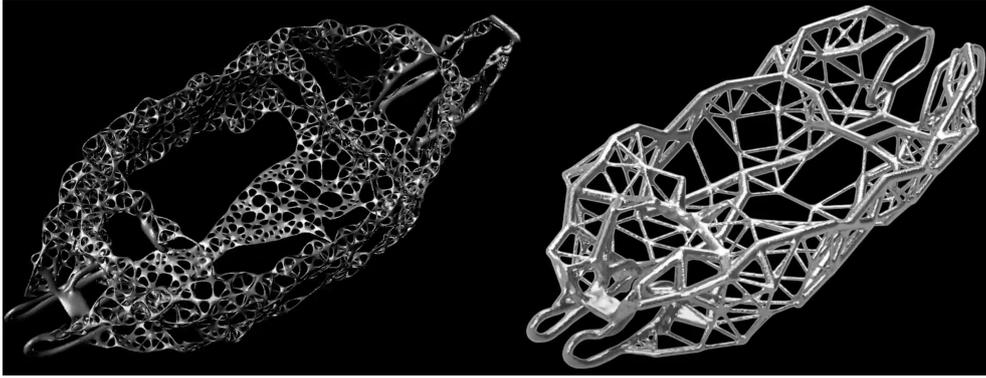


Figura 6 Aplicación del diseño generativo al diseño del bastidor de un monoplaza (3)

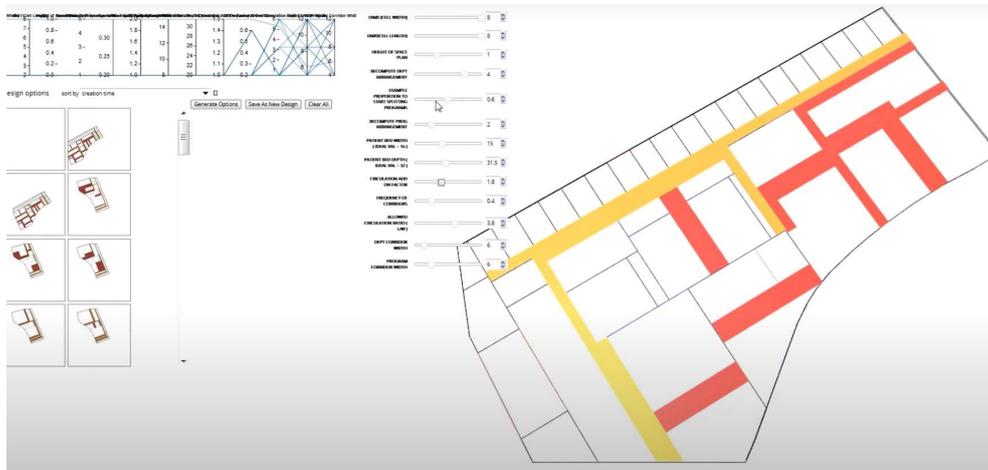


Figura 7 Aplicación del diseño generativo a la distribución en planta (3)

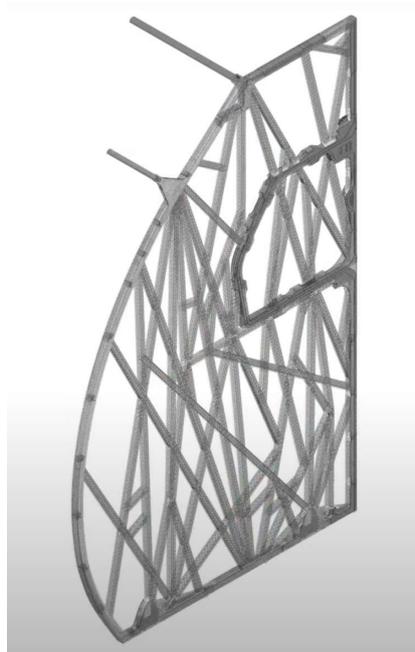


Figura 8 Aplicación del diseño generativo al diseño de un panel separador de la cabina de un Airbus (3)

## 1.2 Optimización topológica

La optimización topológica se basa en buscar la distribución óptima de material en una estructura. Se parte de una preforma inicial y mediante la definición de distintas condiciones de contorno (esfuerzos, apoyos...), se genera la mejor distribución de material que cumpla con las condiciones de contorno.

Muchas industrias que fabrican componentes mecánicos buscan reducir la cantidad de material a emplear en sus productos, ya que es una manera rápida reducir costes. Por eso buscan crear diseños con el menor uso de material posible, pero que a su vez sigan siendo mecánicamente funcionales.

La optimización topológica se remonta al principio del siglo XX, con la publicación de un artículo llamado *The limits of economy of material in framestructures* de A.G. Michell en 1904. En este artículo realizó un estudio sobre los criterios de optimización a aplicar en la reducción de peso en estructuras de barras articuladas.

No es hasta los años 70, con el avance de los ordenadores, cuando empiezan a publicarse nuevos artículos (autores como Mröz y Pragera) donde se muestran las grandes ventajas de la utilización de métodos numéricos en el proceso de optimización topológica.

El desarrollo pleno de la técnica de optimización topológica se da al final de los años 80, donde surgen nuevas técnicas como el método de homogeneización. Se basa en caracterizar la topología a través de la densidad, identificando los huecos creando regiones de densidad nula, redistribuyendo así el material inicial.

### 1.2.1 Aplicación al diseño de producto

Actualmente las aplicaciones de la optimización topológica en el diseño de producto se basan en dos estrategias:

- La reducción de material, ya que reduciendo el material utilizado directamente se reducen los costes de producción.
- La reducción del número de partes de un ensamblaje, ya que se reducen los costes de montaje y de fabricación al tener que fabricar y montar menos componentes.



Figura 9 Ejemplo de reducción del número de elementos de un ensamblaje



*Figura 10 Ejemplo de optimización topológica de una componente mecánico*

### **1.3 Diferencias entre Diseño Generativo y Optimización Topológica**

El diseño generativo y la optimización topológica tienen algunas características comunes. Esta ambigüedad surge porque las entradas en un proceso de diseño generativo son, en muchos casos, similares a las de las herramientas de optimización topológica.

Por tanto, hay dos diferencias fundamentales entre diseño generativo y optimización topológica:

- La optimización topológica se centra en mejorar un diseño preexistente, en rediseñar un componente que ya está concebido. En cambio, el diseño generativo crea nuevas posibilidades de diseño.
- La segunda diferencia es que el diseño generativo puede tener en cuenta muchos otros parámetros que están relacionados con fases posteriores a la de diseño, como podría ser la fabricación del mismo. Esto se traduce en una drástica reducción de la secuencia de probar los productos y volver a la fase de diseño. La optimización tradicional se centra en mejorar una solución conocida, que normalmente implica eliminar el exceso de material sin tener en cuenta cómo se va a fabricar o utilizar dicho elemento. Esto hace que, tras el proceso de optimización, se requiera modelado adicional, simulación y pruebas.

En el diseño generativo, la simulación viene implícita en el proceso de diseño. Se puede especificar el método de fabricación, como impresión 3D, CNC, fundición..., desde el principio. El software solo producirá diseños que se puedan fabricar mediante el método especificado.

## 2 Herramientas de diseño

Actualmente las compañías desarrolladoras y comercializadoras de software de diseño asistido por ordenador (tales como Autodesk, Dassault, Siemens...) han hecho hincapié en la parte de diseño generativo y optimización topológica, ofreciendo la posibilidad de utilizar estas potentes herramientas en sus programas.

Para la realización de este TFM se han utilizado dos herramientas de diseño asistido por ordenador. Por un lado, se tiene Fusion 360, un software diseñado por Autodesk basado en la nube y, por otro lado, está Grasshopper que es un complemento del programa Rhinoceros, que utiliza un lenguaje de programación visual para la generación de geometrías paramétricas.

En este apartado de la memoria se va a profundizar en estas dos herramientas anteriormente descritas, para enseñar las posibilidades que ambas pueden llegar a ofrecer y de qué modo pueden ayudar a la realización del TFM.

### 2.1 Fusion 360

Si se acude a la página web de Autodesk, en el apartado dedicado a Fusion 360 se puede encontrar rápidamente la siguiente información.

Fusion 360 es una plataforma de software de modelado 3D, CAD, CAM y PCB basada en la nube destinada al diseño y la fabricación de productos:

- Diseñe y cree productos de un modo que se garantice su estética, forma, ajuste y función.
- Reduzca el impacto de los cambios en diseño, ingeniería y PCB y garantice la viabilidad de la fabricación con herramientas de simulación y diseño generativo.
- Edite directamente los elementos o las instalaciones de modelos existentes con la única herramienta de software CAD/CAM realmente integrada.

Y en el apartado de diseño generativo se puede leer lo siguiente: solucione los complejos retos de ingeniería, explore las variaciones de los diseños y asegúrese de que los diseños 3D soporten condiciones reales.

- Aprendizaje automático e inteligencia artificial basados en la nube.
- Verificación, prueba y simulación de CEF.
- Optimización de formas y topología.

Por lo que se puede leer en la descripción del producto, Autodesk ofrece un programa de ingeniería centrado en gran parte del ciclo de vida del producto. Al estar basado en la nube, es de esperar que no sea necesario disponer de un ordenador potente para su utilización, comparado con otras versiones de este tipo de programas, donde el ordenador es el encargado de aportar la potencia de cálculo.

Además, Autodesk ofrece una versión educativa de estos programas que, mediante el registro en su plataforma con el correo de la Universidad Politécnica de Valencia, es posible utilizar gratuitamente la versión completa de este programa.

Por lo anteriormente descrito, la posibilidad de utilizar la versión completa del programa con una cuenta educativa y la facilidad para utilizar el programa debido al procesamiento en la nube, se decide utilizar Fusion 360 para el desarrollo del TFM.

### 2.1.1 Interfaz

El programa dispone de una interfaz sencilla e intuitiva, organizado en tres zonas resaltadas en colores distintos en la siguiente figura.

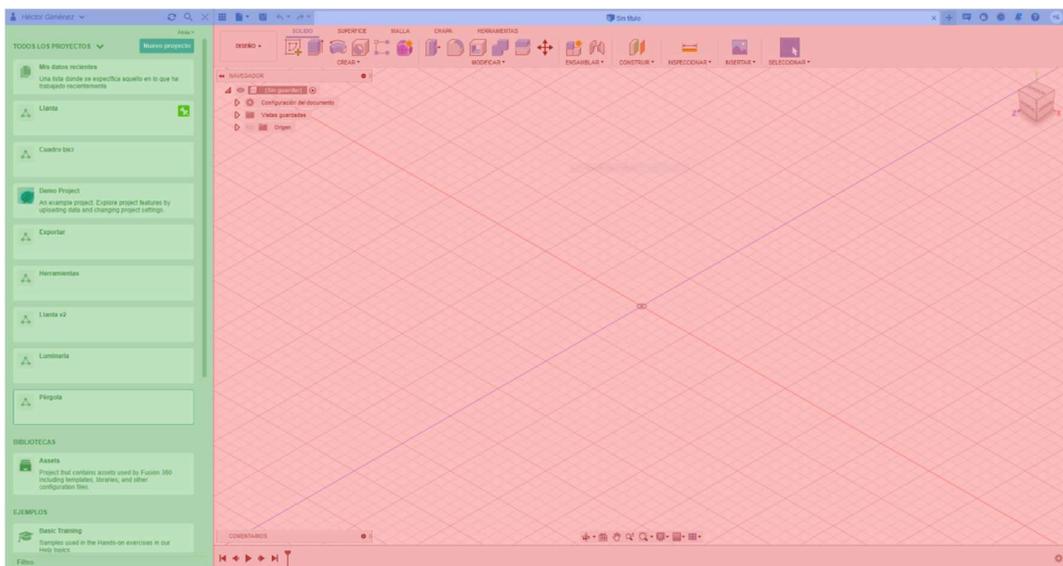


Figura 11 Interfaz principal de Autodesk Fusion 360

En la primera zona (verde), llamada panel de datos, se encuentra la gestión de cuentas y de los archivos guardados en la nube, organizados en proyectos. En esta pestaña se pueden organizar los archivos, además se pueden copiar, trasladar entre proyectos o eliminarlos.

También permite el filtrado y la búsqueda de los archivos al pulsar sobre la lupa. Por último, también se puede acceder a la biblioteca de archivos de Autodesk, además de todos los ejemplos explicativos donde poder familiarizarse con la herramienta.

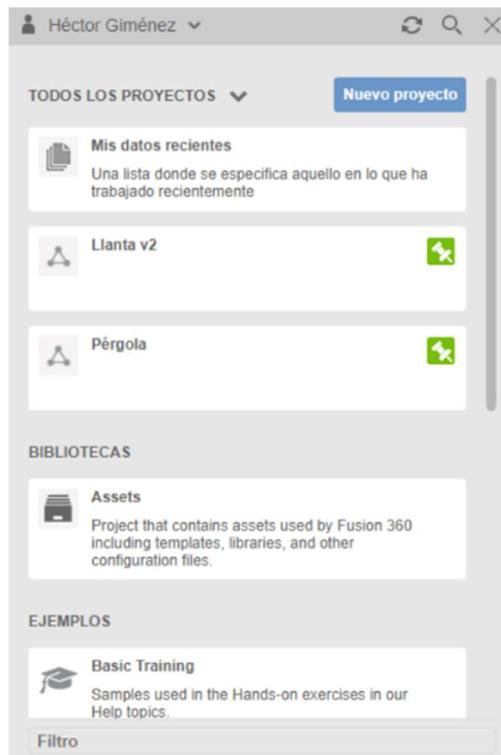


Figura 12 Detalle del panel de datos de Fusion 360

En la segunda zona (azul) encontramos la barra de herramientas con las siguientes opciones de izquierda a derecha: Desplegar/ocultar panel de datos, opciones de archivos, guardar, deshacer, rehacer, pestaña del diseño abierto, abrir nuevo diseño en otra pestaña, notificaciones, administrar extensiones, estado de las tareas en segundo plano, centro de notificaciones, ayuda y administrar la cuenta de Autodesk.



Figura 13 Detalle de la barra de herramientas de Fusion 360

En la última zona (rojo) se encuentra la interfaz principal del programa con una gran zona central reservada para la visualización del diseño. En la parte superior se encuentra la barra de comandos donde poder cambiar entre las distintas funciones del programa, además de las propias herramientas de cada función.

Existen seis funciones: diseño, diseño generativo, renderizar, animación, simulación, fabricación y dibujo.

Por último, en Fusion 360 las distintas operaciones se organizan de manera temporal en la barra inferior, donde es fácil poder visualizar rápidamente cuantas y que operaciones se han realizado sobre el diseño.

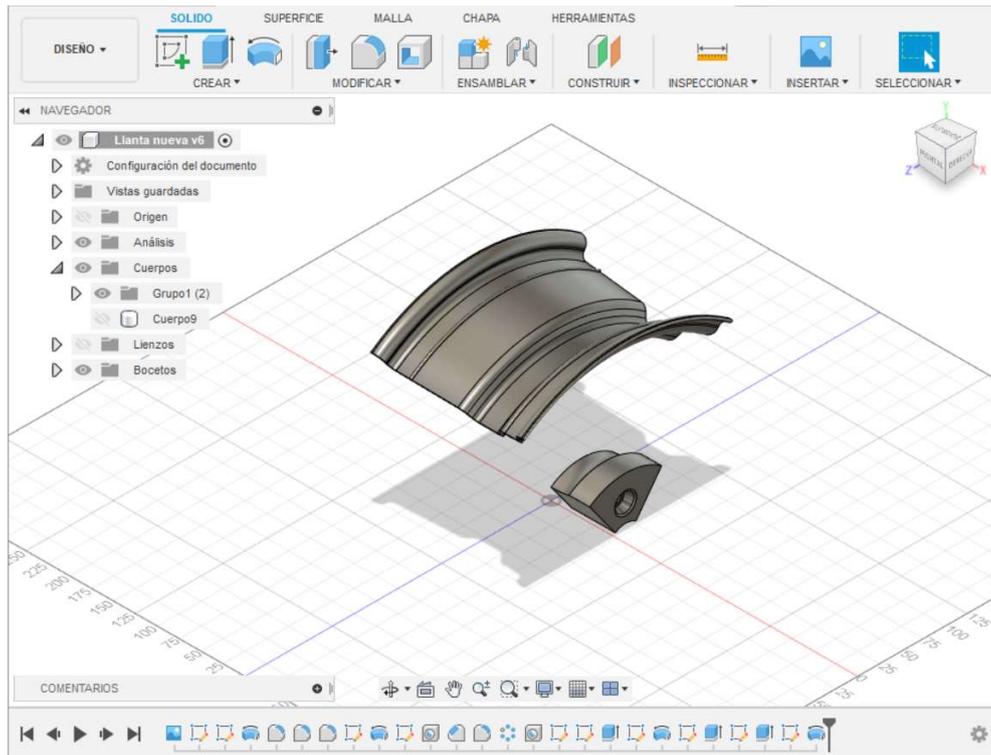


Figura 14 Detalle de la interfaz del Fusion 360

## 2.1.2 Herramienta de optimización

Para terminar por el repaso de las funciones de Fusion 360, se pasará a explicar la que se va a utilizar para realizar este TFM.

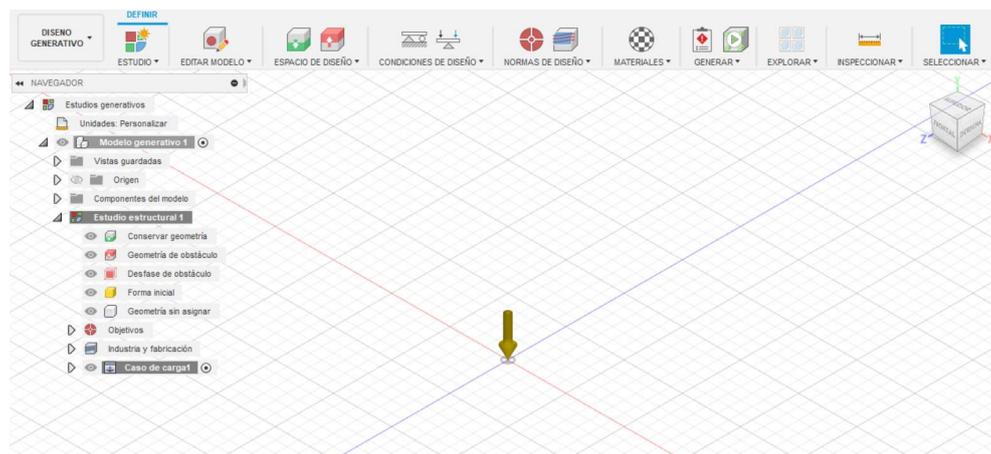


Figura 15 Detalle de elementos de la interfaz para la optimización del diseño en Fusion 360



Figura 16 Detalle de la barra de herramientas de optimización en Fusion 360

En esta herramienta el flujo de trabajo es lineal y es fácil seguir para poder obtener resultados, por lo tanto, el flujo de trabajo detallado en la figura 16 es el siguiente:

1. Aquí se pueden generar nuevos casos de estudios y editar el modelo sin necesidad de volver a la herramienta de diseño.
2. Aquí se marcarán en verde las partes que se desean mantener del diseño, de rojo las partes que van a hacer de barrera para que no se genere material en esa zona y en color amarillo las preformas iniciales para que el programa empiece a optimizar,
3. En esta opción se marcarán las restricciones estructurales y las cargas del modelo.
4. Aquí se pueden elegir alguno parámetro de la optimización como factor de seguridad mínimo resultante o proceso de fabricación.
5. Aquí se puede seleccionar los distintos materiales para la simulación.
6. De izquierda a derecha están los siguientes elementos: comprobador de errores, previsualización rápida de la solución, generador de soluciones y panel del estado de las tareas pendientes.
7. Por último, está el panel de visualización de las soluciones de los distintos casos de estudio.

## 2.2 Rhinoceros

Para empezar a hablar de Grasshopper primero se debe hablar de Rhinoceros, ya que Grasshopper en un complemento que utiliza Rhinoceros para funcionar.

Rhinoceros o Rhino es un software de diseño asistido por ordenador 3D basado en la manipulación de NURBS, superficies, sólidos, nubes de puntos y mallas poligonales. En su página web se pueden encontrar más detalles sobre su desempeño y complementos:

- **Renderizado y presentación:** capacidad de renderizado por trazado de rayos, previsualización en tiempo real y soporte de complementos.
- **Dibujo:** posibilidad de generar dibujos e ilustraciones en 2D de corte técnico.
- **Fabricación digital:** herramientas para crear modelos precisos para su posterior fabricación, además en Rhino 7 se añade mejoras en grabados CNC y herramientas para la creación de moldes.
- **Herramientas para mallas:** disponer de herramientas potentes de importación, exportación, creación y edición de mallas es fundamental en todas las fases del diseño.
- **Captura 3D:** compatibilidad directa con hardware de digitalización 3D y con datos de nubes de puntos escaneados en 3D.
- **Inspección y análisis:** incluye herramientas para garantizar que los modelos 3D utilizados en el proceso sean de la mayor calidad posible.

- **Herramientas para desarrolladores:** la plataforma de desarrollo 3D más sólida del mundo para herramientas especializadas de modelado, renderizado, análisis y fabricación en una gran variedad de disciplinas.
- **Grasshopper:** editor de algoritmos gráficos incluidos en Rhino

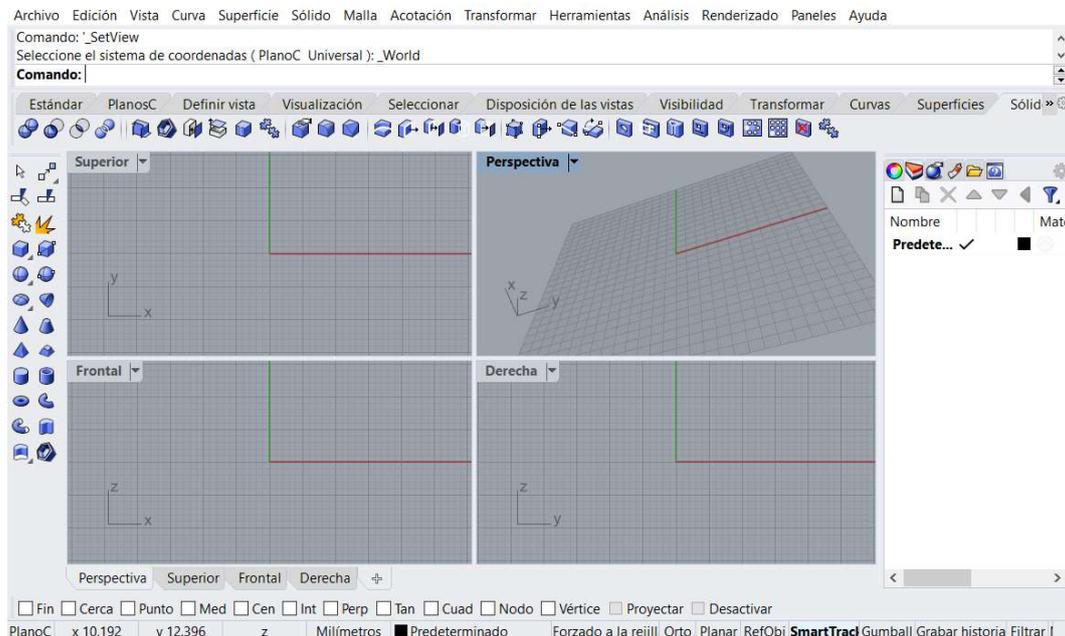


Figura 17 Detalle de la interfaz de Rhino

De la interfaz de Rhino, hay que destacar la posibilidad de poder usar comandos para poder realizar rápidamente operaciones, también organiza las distintas operaciones en pestañas para un rápido acceso a todas la relacionadas con esa área. Las comunes a cada área se colocan en una pestaña en el lateral izquierdo y las específicas se colocan encima del área de visualización.

Para este TFM no se va a profundizar en los comandos ya que no van a ser empleados para el desarrollo de este.

Una vez vistas las características más destacadas de Rhinoceros 3D, es necesario profundizar en Grasshopper, ya que es la herramienta que se va a utilizar en este TFM.

### 2.2.1 Grasshopper

Como se ha dicho anteriormente, Grasshopper es una herramienta de programación visual donde no es necesario tener conocimientos de programación. Los programas son creados arrastrando componentes en el área de trabajo y estos componentes poseen un número determinado de entradas y salidas, que se unen mediante cables para pasar la información de unos a otros.

En la interfaz de Grasshopper se distinguen dos zonas, en la parte superior se encuentra la barra de operaciones, donde mediante la organización por pestañas se agrupan todas las operaciones disponibles. Dentro de cada pestaña encontramos agrupadas los componentes por

distintos tipos que a su vez pueden ser desplegadas para mostrar componentes menos comunes en su categoría. Muy parecido a la organización que utiliza la suite de ofimática de Microsoft.

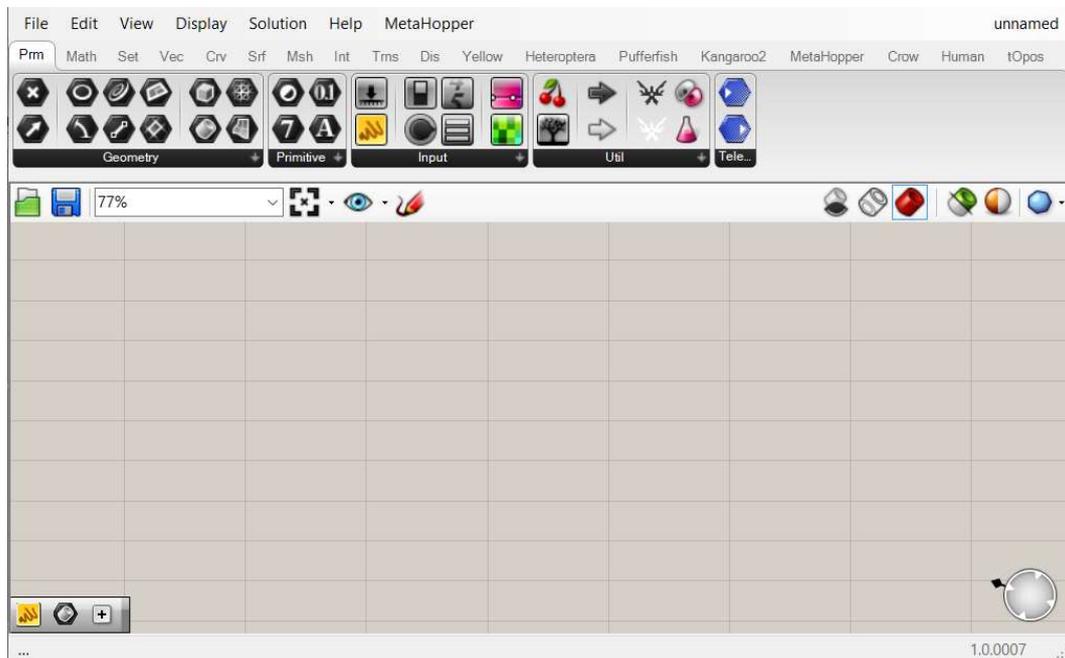


Figura 18 Detalle de la interfaz principal de Grasshopper

Para ejemplificar la sencillez a la hora de programar mediante Grasshopper, a continuación, se muestra una operación aritmética básica.

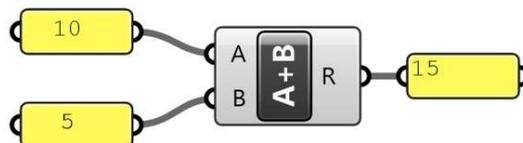


Figura 19 Operación suma mediante bloques en Grasshopper

En esta operación en el centro se tiene el componente que realiza la suma, en las entradas se tienen los números que se van a asignar a las variables A y B, y a la derecha tenemos la salida del componente con el resultado obtenido.

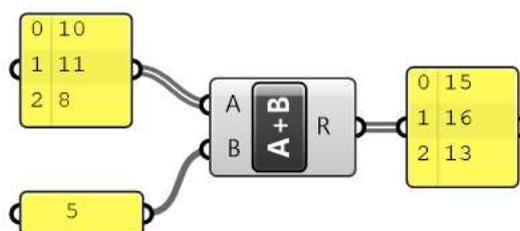


Figura 20 Operación suma de varios valores mediante bloques en Grasshopper

También es posible añadir varios valores en una entrada, nótese que el cable cambia de forma. Ahora el cable es más grueso, haciendo una referencia a como si transportara más información.

Grasshopper también permite añadir complementos desarrollados tanto por la propia compañía, por otras compañías o por usuarios de la plataforma. Estos complementos pueden añadirse al programa a través de un repositorio web (foodforrhino.com) pero para la descarga de estos es necesario estar registrado en la plataforma.

Para la realización de este TFM se tuvo que buscar un complemento para Grasshopper que utilizara la optimización topológica, tras la búsqueda en el repositorio de Food for Rhino se encontró uno llamado Top0s. Este complemento permite generar soluciones utilizando la optimización topológica pudiendo controlar una gran cantidad de variables.

### 2.2.2 Top0s

Este complemento posee varios componentes que se usan para la optimización topológica, todos ellos están agrupados en pestañas, que se muestran en la siguiente figura:

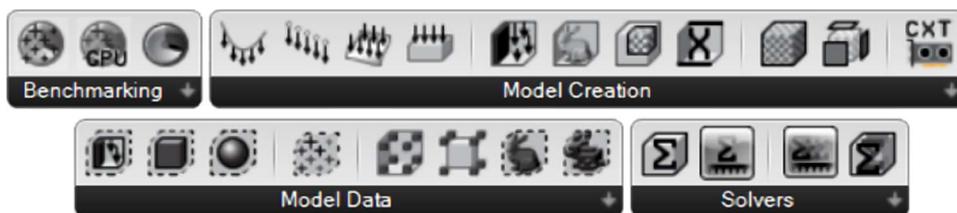


Figura 21 Componentes de Top0s agrupados por pestañas en Grasshopper

De todos ellos, los básicos son los necesarios para crear el modelo, ubicados dentro de Model Creation. Una vez creado el modelo, dentro de la pestaña Solver, se encuentra el componente encargado de la optimización topológica.

Ahora para terminar se van a mostrar y explicar todos los componentes necesarios hasta llegar a la solución. Para ello partiremos del componente que crea el modelo y se verán las entradas y salidas de este, hasta crear una imagen global de como se ve dentro de Grasshopper.

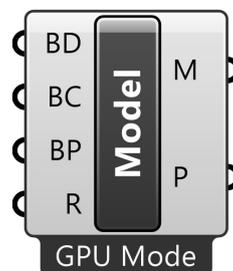


Figura 22 Componente de Top0s encargado de generar el modelo

- **BD (Boundary Domain):** Esta entrada necesita una malla poligonal del modelo a optimizar, además de los datos del material.
- **BC (Boundary Condition):** Esta entrada necesita los estados de carga y los soportes estructurales del modelo.
- **BP (Boundary Properties):** Esta entrada sirve para especificar parámetros extra sobre el modelo.
- **R (Resolution):** En esta entrada especificaremos la resolución del modelo, a mayor resolución mejores resultados pero mayor coste computacional.

Las salidas de este componente son dos:

- **M (Model):** que es el modelo matemático que sirve de entrada al componente que resuelve el problema de optimización topológica.
- **P (Performance):** Contiene datos sobre el modelo.

Este componente necesita para sus entradas de otros componentes (el nombre coincide con la entrada) que le codifiquen toda la información necesaria para crear el modelo. Estos componentes son los siguientes:

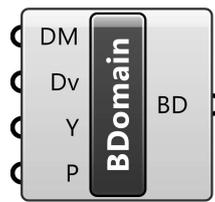


Figura 23 Componente de TopOs encargado de generar los datos de la malla del modelo

- **DM (Domain Mesh):** En esta entrada se conectará el modelo convertido en una malla poligonal.
- **Dv (Density value):** Aquí se especifica la densidad relativa del material.
- **Y:** Módulo de Young del material (GPa).
- **P:** Valor del coeficiente de Poisson del material.

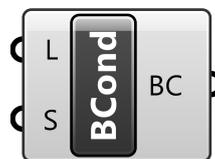


Figura 24 Componente de TopOs encargado de generar las condiciones de contorno del modelo

- **L (Load):** Esta entrada necesita las cargas como malla poligonal que intersecta a la malla del modelo y pueden ser de 4 tipos (volumétrica, superficial, lineal o puntual).
- **S (Support);** Aquí la entrada necesita los soportes estructurales como una malla que intersecta con la malla del modelo.



Figura 25 Componente de TopOs encargado de asignar el tamaño de elemento de la malla

- **S (Size):** Tamaño máximo del elemento que va a componer la malla tridimensional del modelo, se especifica con un número.

Para tener una visión general de cómo se conectan todos estos componentes entre sí, todo ello se va a mostrar en la siguiente figura.

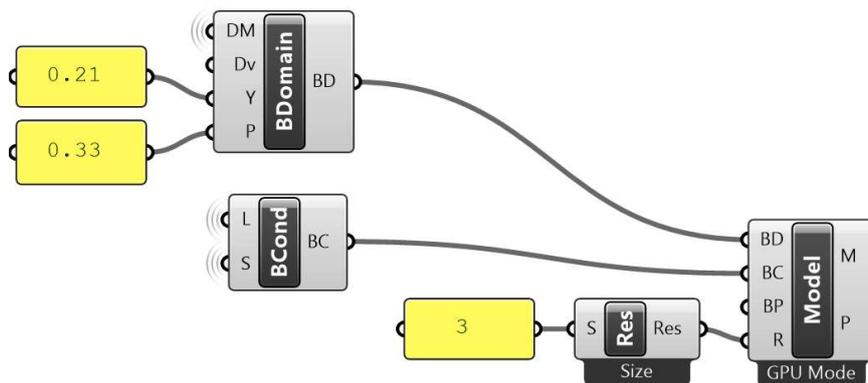


Figura 26 Detalle de los componentes de TopOs necesarios para generar el modelo

Una vez explicadas todas las entradas necesarias para poder crear el modelo, ahora se explicará el componente llamado Optimus, que es el encargado de ejecutar la optimización topológica.

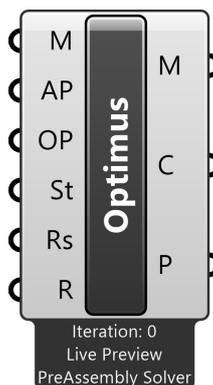


Figura 27 Componente de TopOs encargado de realizar la optimización topológica

- **M (Model):** Entrada de los datos del modelo.
- **AP (Analyser Parameters):** Entrada de datos para el análisis, es opcional. Si no hay entrada, se usarán los parámetros por defecto.
- **OP (Optimus parameters):** Entrada de datos para la optimización, es opcional. Si no hay entrada, se usarán los parámetros por defecto.
- **St (Subdivision Threshold):** Umbral de subdivisión de los elementos. El elemento con la densidad inferior a este valor será eliminado, los demás serán subdivididos.

- **Rs (Reset):** Permite reiniciar la simulación
- **R (Run):** Inicia la simulación.

De todas estas entradas, la más interesante y la que se va a utilizar para hacer variar la solución del Solver es el OP. Por lo tanto, el componente es el siguiente.

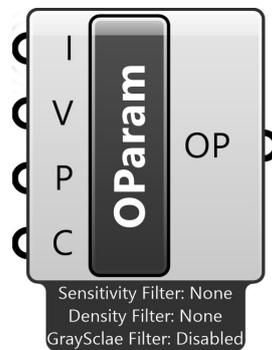


Figura 28 Componente de TopOs encargado de controlar los parámetros que controlan el proceso

- **I (Optimisation iteration):** Número máximo de iteraciones por optimización.
- **V (Volume fraction):** Fracción de volumen objetivo.
- **P (Penalty):** Un valor entre 2 y 3 previene que las zonas sin masa queden poco definidas.
- **C (Change):** Valor que representa la diferencia mínima entre dos iteraciones que hace parar la simulación.

También este componente permite añadir filtros a la hora de realizar la simulación (parte inferior del componente), que hacen que los resultados puedan variar dependiendo del valor tomado.

Para visualizar los resultados, se disponen varios componentes que muestran la malla resultante pudiendo elegir colores o acabados. Una vez colocados y conectados todos los componentes quedaría de la siguiente forma, representado en la siguiente figura.

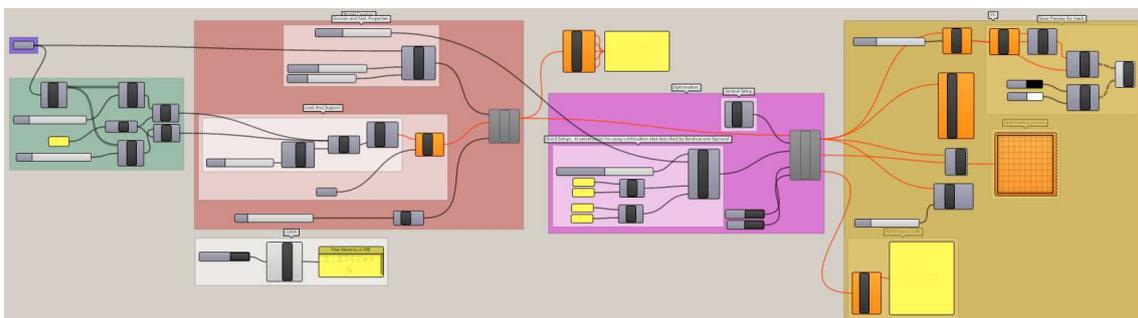


Figura 29 Detalle general de los componentes de TopOs necesarios para la optimización del modelo

- **Zona verde:** Preparación de superficies para aplicar fuerzas y restricciones estructurales.
- **Zona roja:** Aplicación de fuerzas y restricciones estructurales, y creación del modelo.
- **Zona violeta:** Ajustes de parámetros del Optimizador.
- **Zona naranja:** Opciones de visualización de la solución.

### 3 Productos escogidos.

La elección de productos para este TFM empezó con la búsqueda de productos que existan en la actualidad que se hayan podido generar mediante diseño generativo. Las primeras búsquedas se realizaron en internet y los resultados fueron muy variados, existen productos tales como: chasis de vehículos (bicicletas, motocicletas, coches...), estructuras metálicas en edificación o mobiliario, llantas de vehículos, suelas de zapatillas, muebles, distribución de espacios (merenderos, cajas de herramienta, distribución en planta...), diseño eficiente de disipadores de calor, diseño de acústicas de salas de conciertos...



Figura 30 Distintos diseños de llantas de coche



Figura 31 Zapatilla con el talón diseñado mediante diseño generativo



Figura 32 Ejemplo de muebles generados mediante diseño generativo

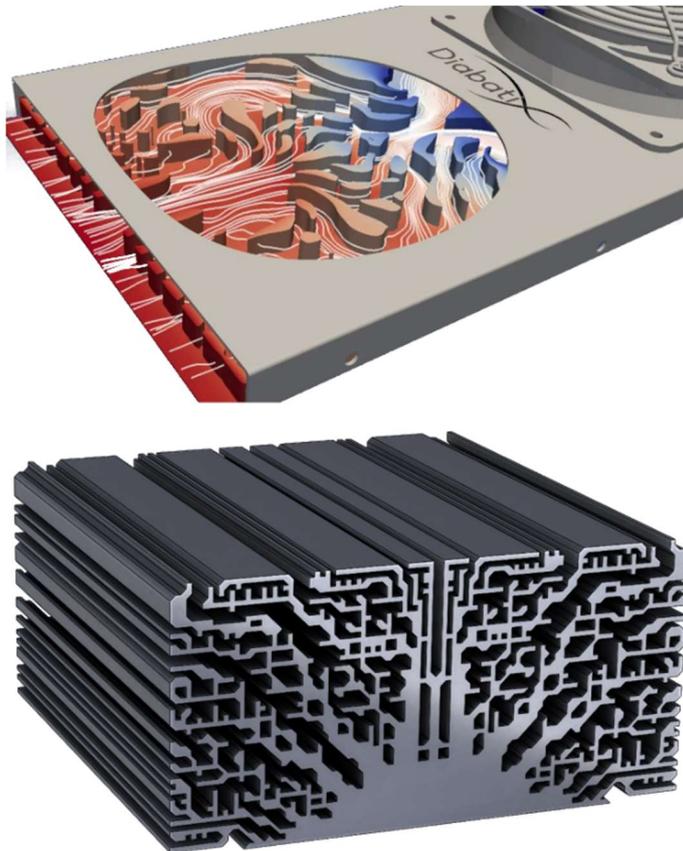


Figura 33 Ejemplo de disipadores térmicos diseñados mediante diseño generativo

La idea era ver como se podía controlar la generación de formas durante el proceso de optimización para tratar de buscar una determinada estética, para así poder estudiar mediante la optimización topológica la generación de formas de los productos. Por lo tanto, la elección de productos se orientó hacia el de tipo estructural y se decide trabajar con los siguientes:

- Llanta de coche.
- Estructura metálica tipo pérgola.
- Cuadro de bicicleta.
- Soporte farola.

## 4 Generación de soluciones.

En este apartado de la memoria se va a explicar el proceso desde cero hasta el punto de que ya sea posible empezar a generar soluciones en los productos elegidos. El proceso va a ser explicado tanto para Fusion 360 como para Grasshopper, enseñando todos los pasos seguidos.

### 4.1 Llanta de coche

El primer paso es encontrar información sobre cómo están construidas y diseñadas las llantas de coche para poder generar una forma inicial, sobre la que sea posible empezar a generar formas.

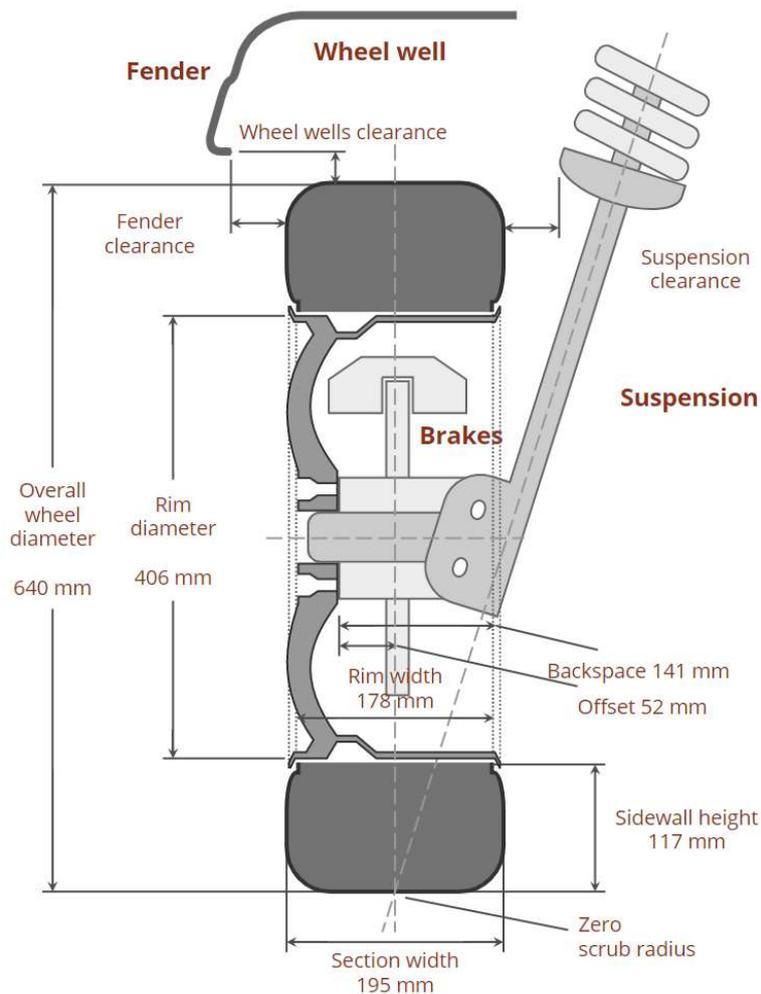


Figura 34 Medidas de llanta y rueda para un Ford Focus del 2006

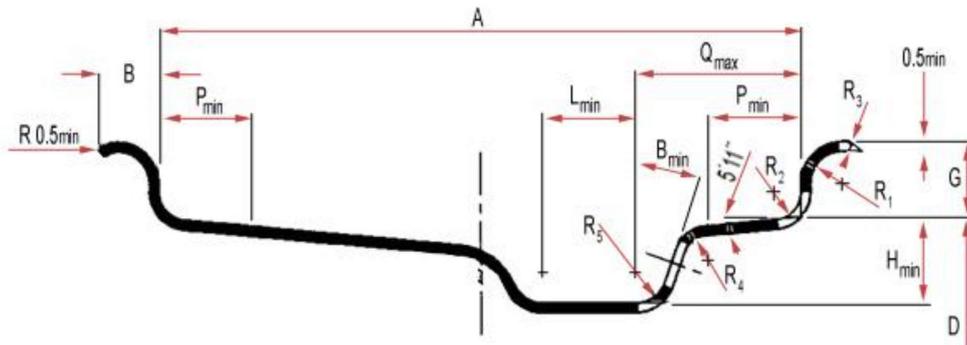


Figura 35 Sección y medidas de una llanta de coche

La primera imagen corresponde a las dimensiones de una rueda de coche obtenidas de la página web wheel-size.com y el tamaño de esta rueda corresponde a un Ford Focus de 2006.

La segunda imagen muestra una sección de la parte superior de la llanta, con unas medidas orientativas para poder diseñarla. Junto a las dimensiones principales de la primera imagen que ayudan a definir el tamaño de la llanta y al usar la segunda como lienzo, se consigue diseñar en Fusion 360 las partes de apoyo de la llanta

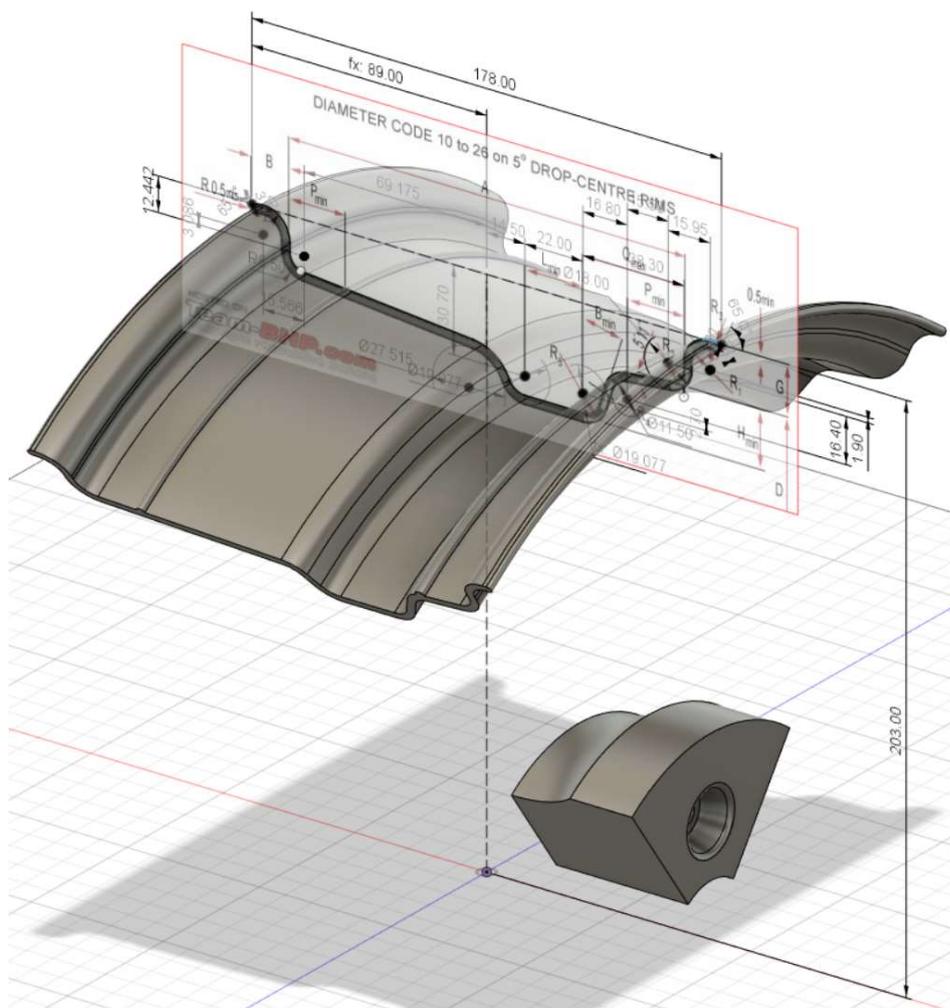
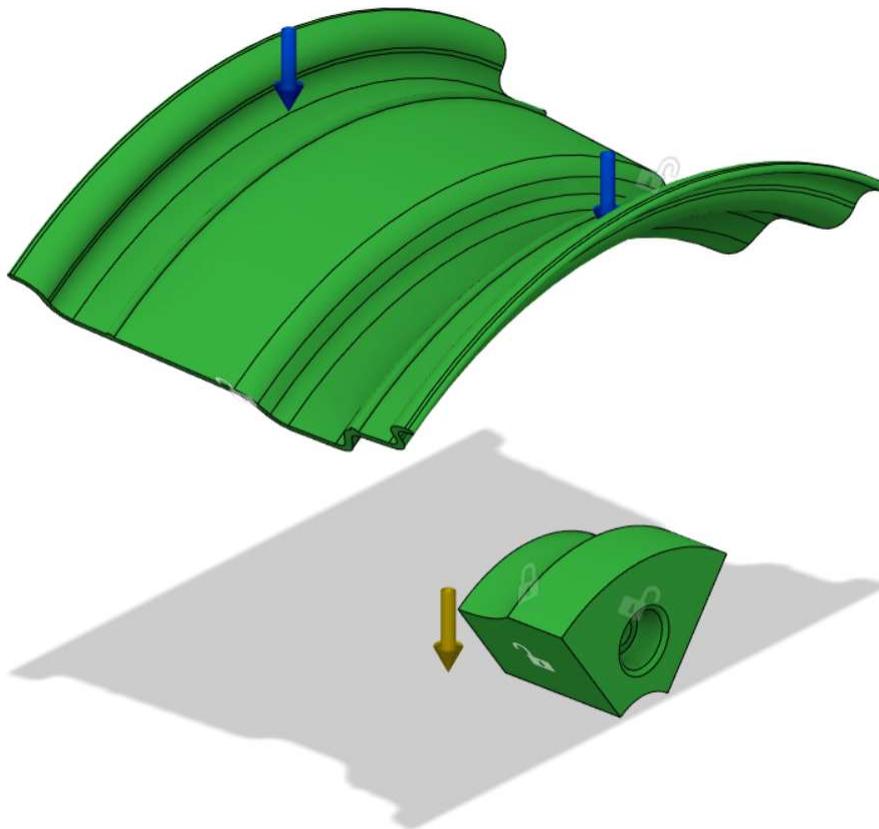


Figura 36 Diseño de la llanta de coche en Fusion 360

Se ha decidido realizar el estudio de llanta sobre una sección (quinta parte) de la misma para ahorrar tiempo computacional a la hora de realizar las simulaciones.

#### 4.1.1 Fusion 360

Una vez se tiene el diseño inicial que va a servir para generar las formas, hay que pasar a la herramienta de diseño generativo de Fusion 360, que se encargará de optimizar el diseño en base a los parámetros que se le especifiquen al programa y siguiendo el flujo de trabajo explicado en el punto 2.

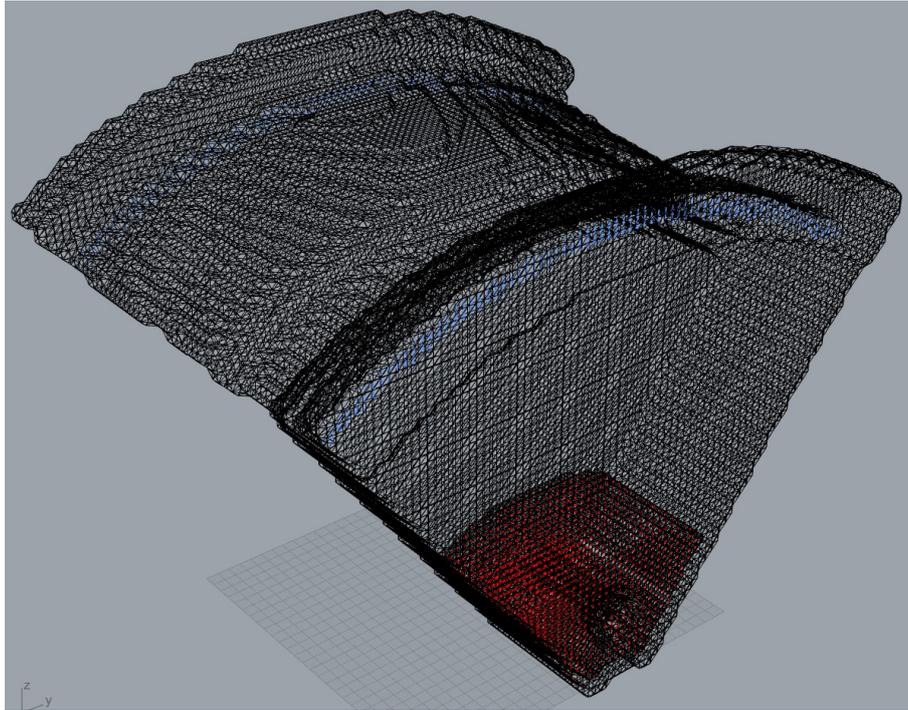


*Figura 37 Modelo de la llanta preparado para optimizar en Fusion 360*

Aquí se puede observar en verde las zonas que se van a conservar durante la fase de optimización, la flecha amarilla indica la dirección de la gravedad y las flechas azules indican la dirección de los esfuerzos. Todos estos indicadores se repetirán para los demás ejemplos de implementación en la herramienta de optimización en Fusion 360.

#### 4.1.2 Grasshopper

En Grasshopper antes de iniciar la simulación, se puede ver una forma inicial sobre la que se va a aplicar la optimización. En esa forma se pueden ver en rojo las zonas que van a actuar de soporte, en azul las zonas donde se aplican las fuerzas y también se puede ver el tamaño de los elementos de la malla tridimensional.



*Figura 38 Modelo de la llanta preparado para optimizar en Grasshopper*

Para obtener las formas que se usan en Grasshopper, se han exportado lo diseñado en Fusion 360 en formato STL y se han importado en Rhino.

## 4.2 Pérgola

Para la pérgola, se han probado varias formas, cambiándolas a cada paso debido a que se tenían que restringir zonas para que tuviera funcionalidad, hasta dar con la que se ha creído que podría funcionar mejor;

1. Dos losas cuadradas separadas entre sí, que hacen las funciones de suelo y de techo.
2. Una losa cuadrada actuando de techo y en el suelo se colocan losas cuadradas pequeñas en los bordes que hacen de placas de anclaje.
3. Por último, unas barras en forma de rectángulo en el techo y las losas cuadradas en el suelo actuando como placas de anclaje.

Por lo tanto, los resultados obtenidos de las distintas pruebas serán reflejados en el siguiente apartado dedicado a reflejar todos los resultados obtenidos.

#### 4.2.1 Fusion 360

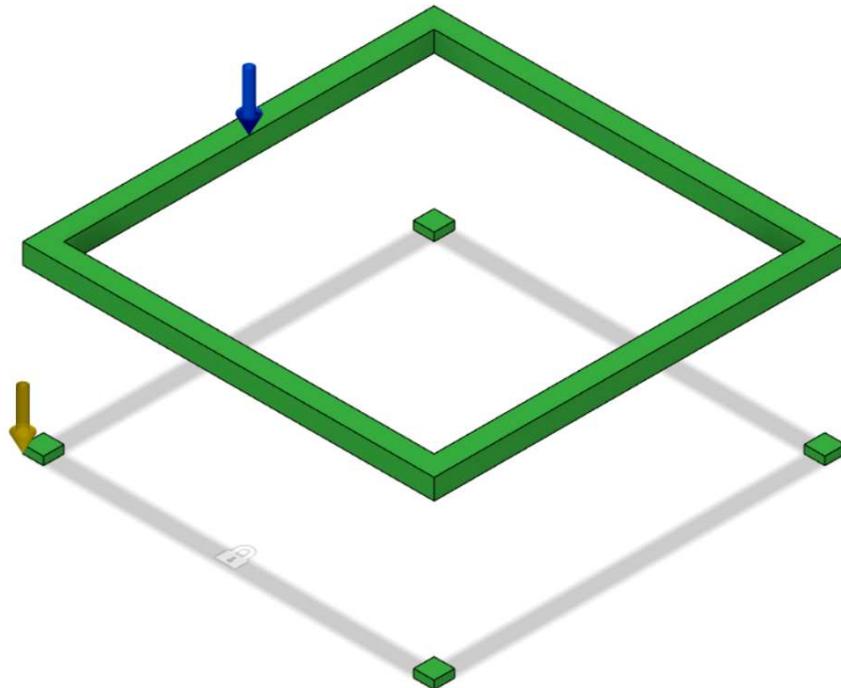


Figura 39 Modelo de la pérgola preparado para optimizar en fusión 360

#### 4.2.2 Grasshopper

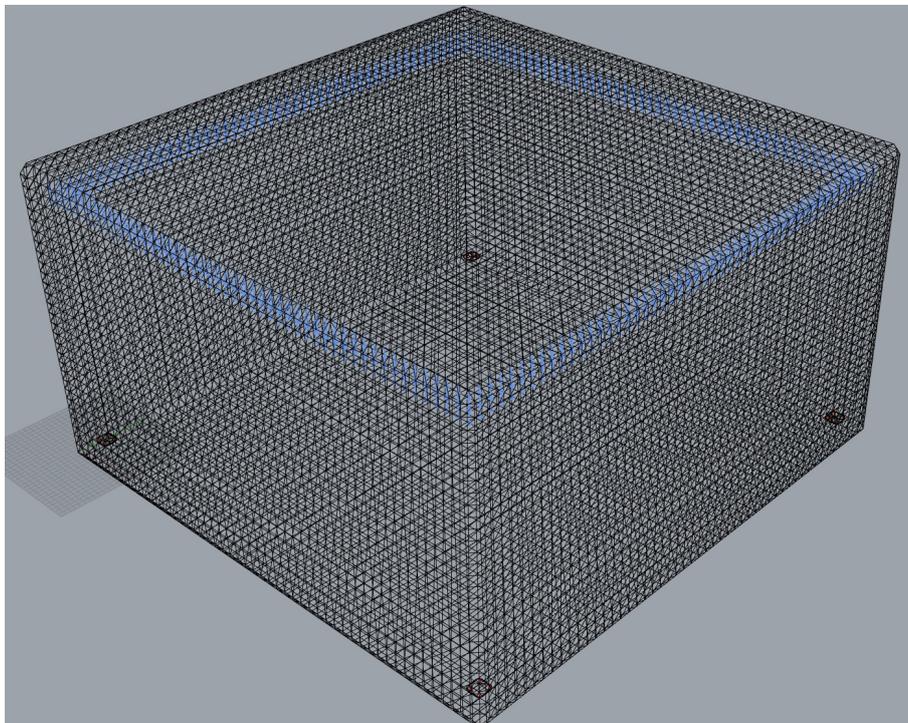
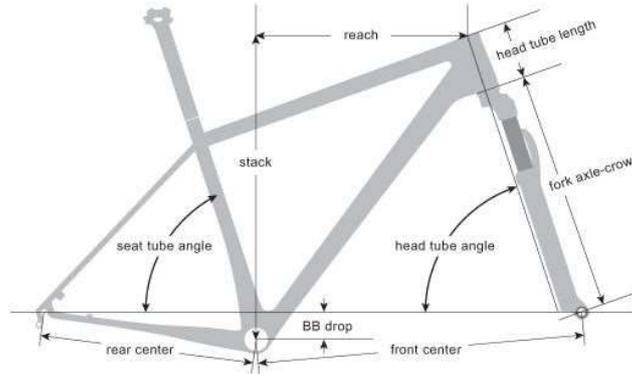


Figura 40 Modelo de la pérgola preparado para optimizar en Grasshopper

### 4.3 Cuadro de bici

Para el diseño inicial del cuadro de bici también se ha optado, como en la llanta de coche, por buscar una imagen donde se especifiquen las dimensiones y a partir de esta imagen, diseñar las formas de las que se partirán para la optimización topológica.



size	fork axle-crown	headtube angle	seattube angle	headtube	BB drop	stack	reach	front center	rear center
S - 395	497	72	72.5°	90	57	615	395	623	440
M - 415	497	72	72.5°	105	57	630	415	647	440
L - 435	497	72	72.5°	120	57	644	435	672	440
XL - 455	497	72	72.5°	135	57	658	455	696	440

Figura 41 Medidas utilizadas para el diseño del cuadro de la bicicleta

#### 4.3.1 Fusion 360

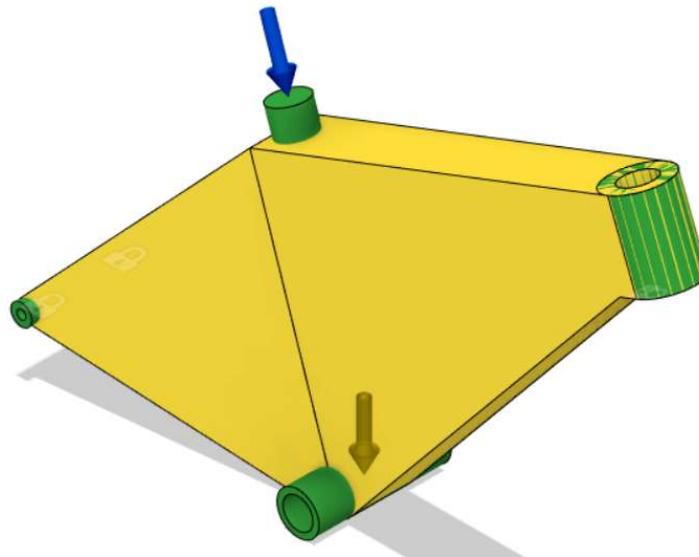


Figura 42 Modelo del cuadro de la bicicleta preparado para optimizar en Fusion 360

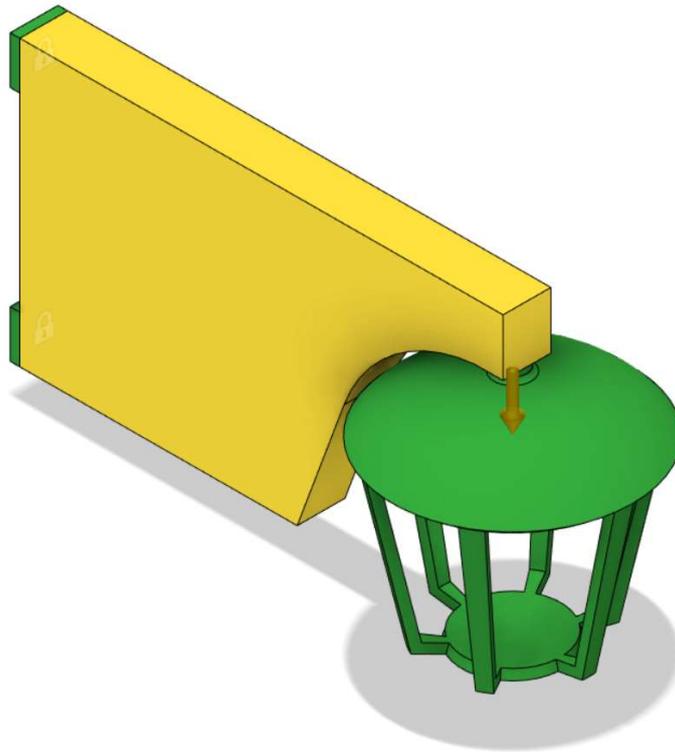
## 4.4 Soporte farola

Para el soporte de la farola, se ha optado por la opción de brazo de pared ya que estéticamente podrían dar resultados que se podrían aprovechar.



*Figura 43 Soporte de una farola utilizado como inspiración*

### 4.4.1 Fusion 360



*Figura 44 Modelo del soporte de la farola preparado para optimizar en Fusion 360*

## 5 Resultados.

En este apartado se van a exponer los resultados obtenidos en cada producto para las distintas variantes y condiciones que se han probado en cada iteración, para ello se han tomado capturas de pantalla directamente de lo generado por las dos herramientas de optimización topológica analizadas.

### 5.1 Llanta de coche

Para este producto se han seguidos varias estrategias para poder obtener diferencias entre las distintas iteraciones.

- **Variar la dirección de las fuerzas aplicadas:** Siguiendo esta estrategia se consigue generar directamente versiones del mismo producto sin hacer cambios significativos que aumenten el tiempo de diseño. Las direcciones utilizadas son las principales cartesianas.
- **Hacer cambios en la geometría:** Con esta estrategia se pretende generar formas distintas obligando al programa a calcular de manera distintas la solución óptima.
- **Variar parámetros:** Esta estrategia debido a la naturaleza de las herramientas utilizadas, solamente es posible de seguir en Grasshopper, ya que permite un control casi total de los parámetros que entran el juego en la optimización.
- **Combinar todas las estrategias utilizadas:** También otra estrategia a seguir es combinar todas las anteriores y comparar los cambios, a ver si estos cambios son significativos.

#### 5.1.1 Fusion 360

Las siguientes figuras muestran a la izquierda la forma inicial antes de la optimización con las condiciones iniciales en cada caso y en la derecha el resultado de la optimización.

Las fuerzas aplicadas corresponden a un vehículo con un peso de 1500 kg. El objetivo no es representar un caso real de carga, sino generar distintas variantes para el mismo diseño.

Los cambios en la geometría de la llanta se pueden ver en la siguiente figura, donde se ha optado por introducir una pequeña curvatura y reducir la zona donde se puede generar material en la base de los pilares de la llanta.



Figura 45 Detalle del cambio de geometría de la llanta

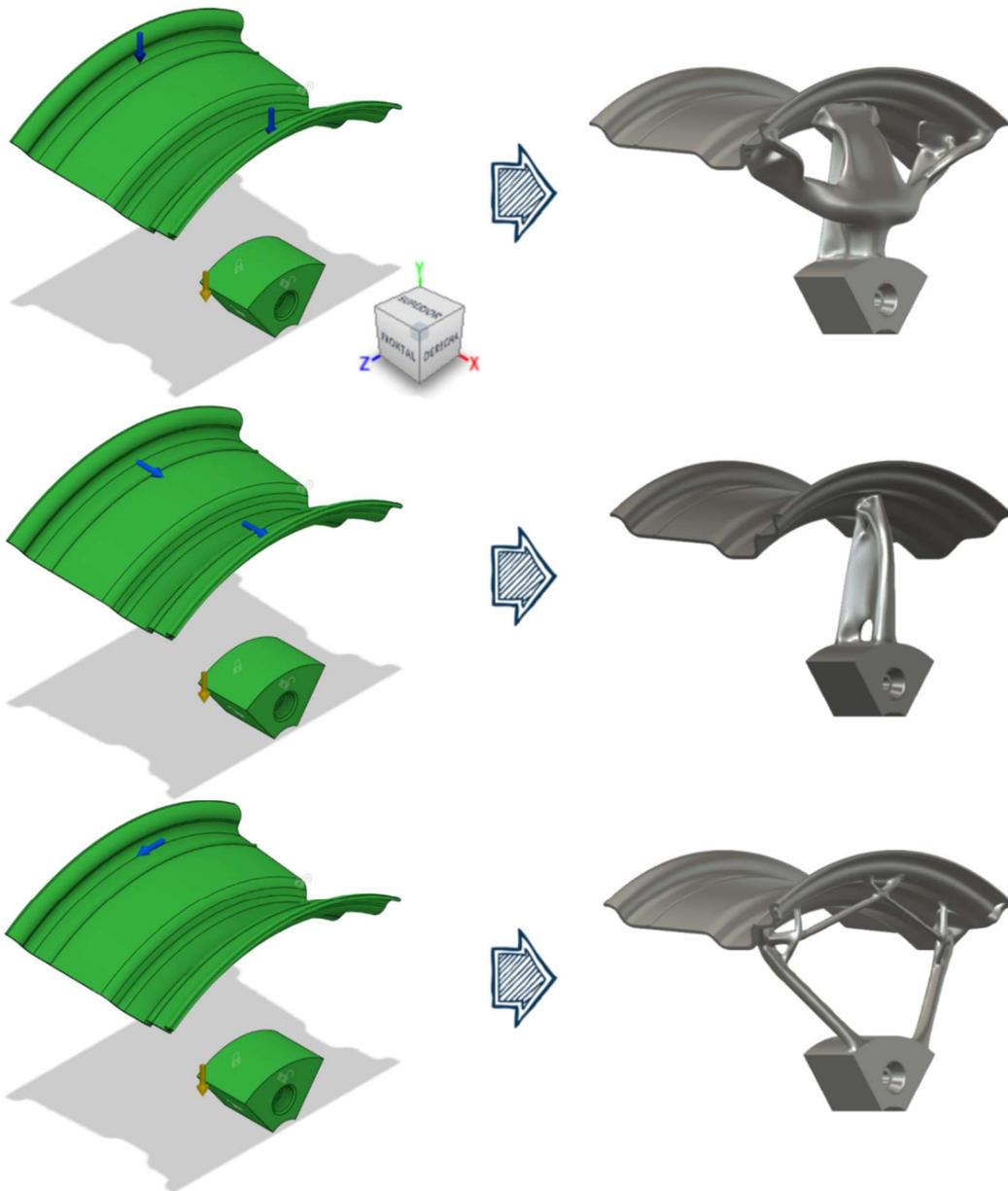


Figura 46 Resultados de la optimización de la llanta en Fusion 360 para distintas direcciones de las fuerzas aplicadas

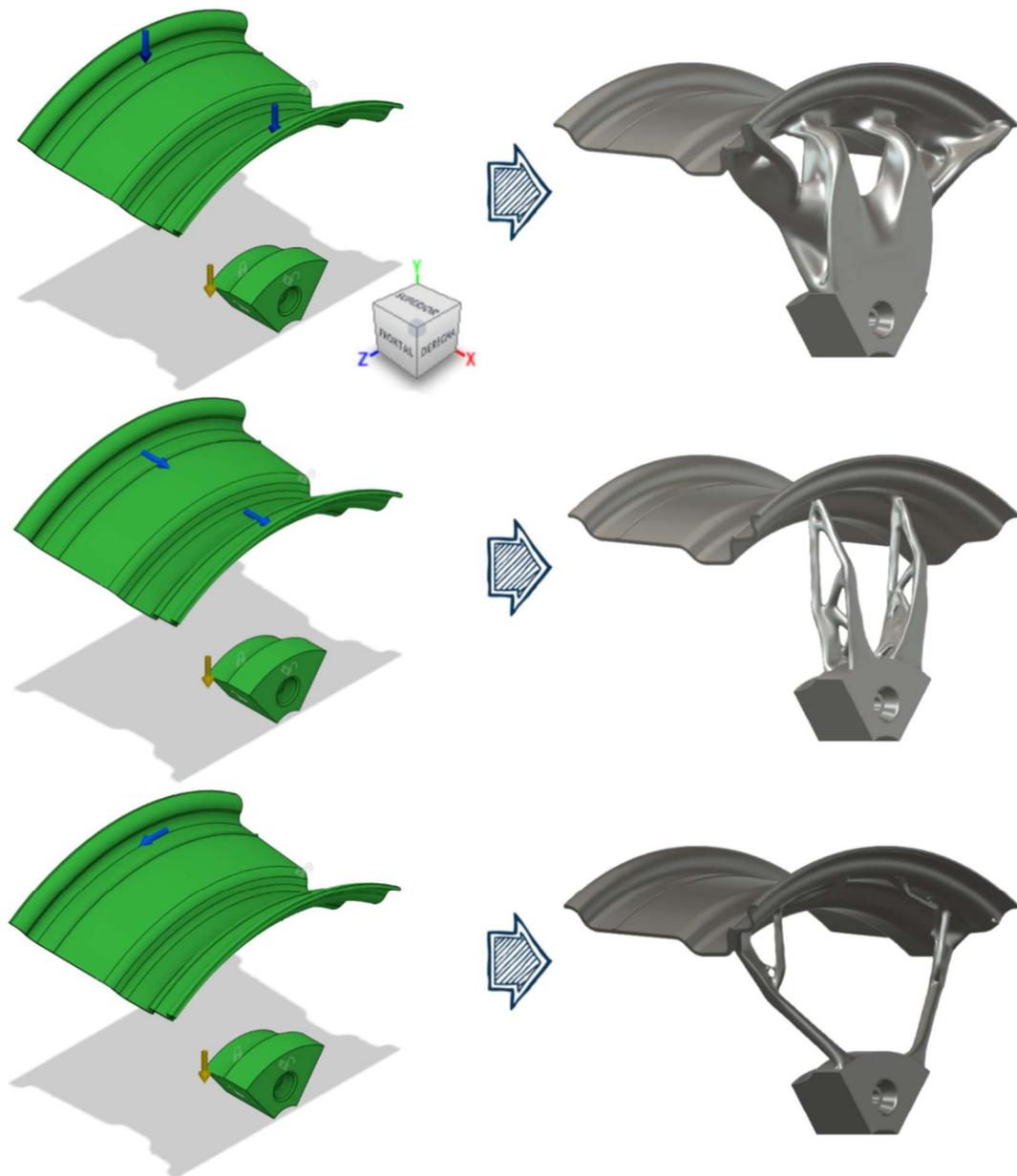


Figura 47 Resultados de la optimización de la llanta en Fusion 360 tras el cambio de geometría para distintas fuerzas aplicadas

### 5.1.2 Grasshopper

En Grasshopper se aplicará la estrategia de variar la dirección de las fuerzas y variar los parámetros de control de la simulación.

Estos parámetros son los siguientes:

- **V:** Con este parámetro se puede controlar la cantidad de material que se utiliza para generar la solución, representa la proporción de material final utilizado con respecto al inicial.
- **Sr:** Este es un parámetro que controla la influencia de los filtros utilizados para refinar la solución que se genera.

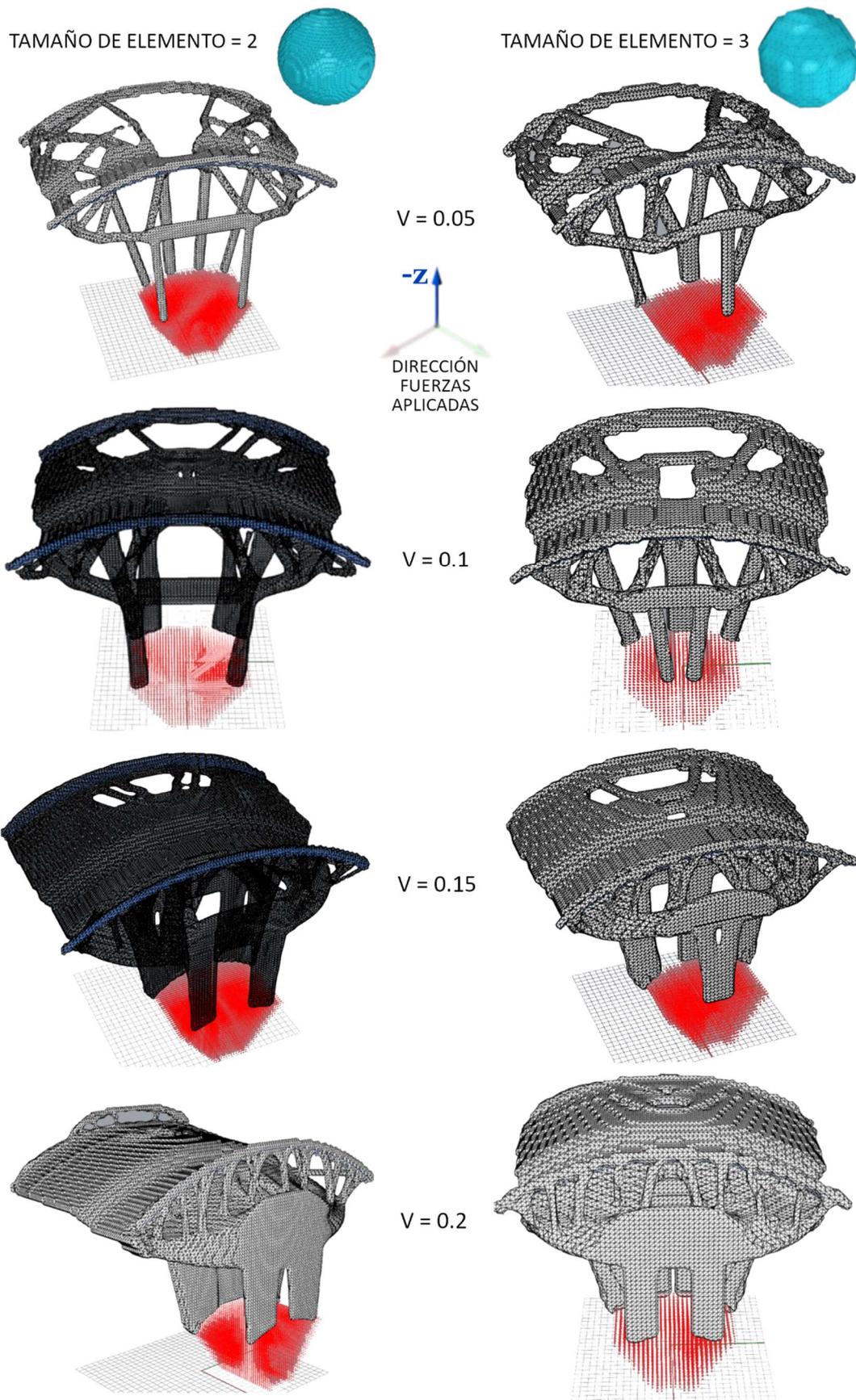


Figura 48 Resultados de la optimización de la llanta en Grasshopper para distintos tamaños de elemento y V, fuerzas aplicadas en eje z negativo



Figura 49 Resultados de la optimización de la llanta en Grasshopper para distintos  $Sr$  en dos tipos de filtro, fuerzas aplicadas en eje  $x$

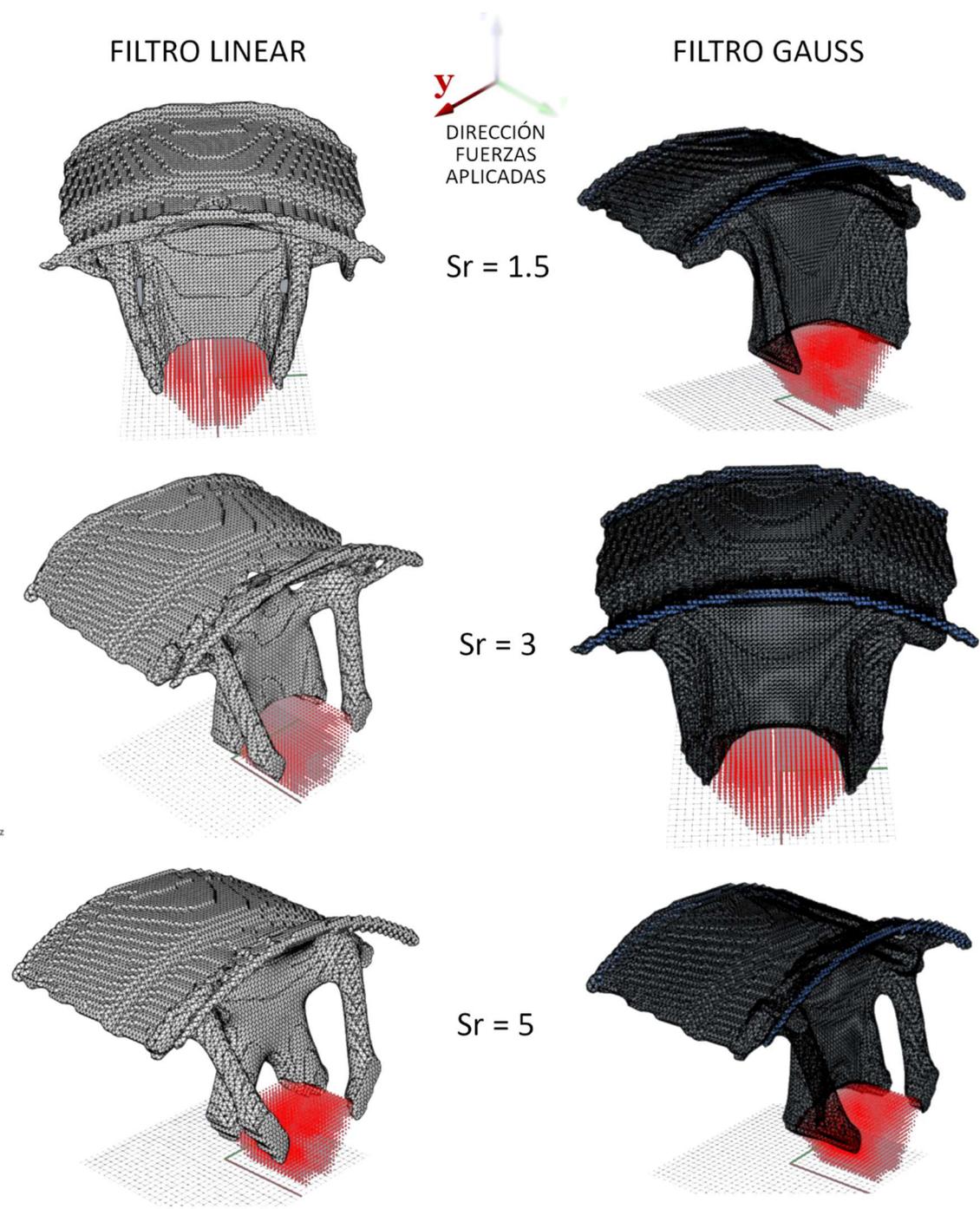


Figura 50 Resultados de la optimización de la llanta en Grasshopper para distintos Sr en dos tipos de filtro, fuerzas aplicadas en eje y

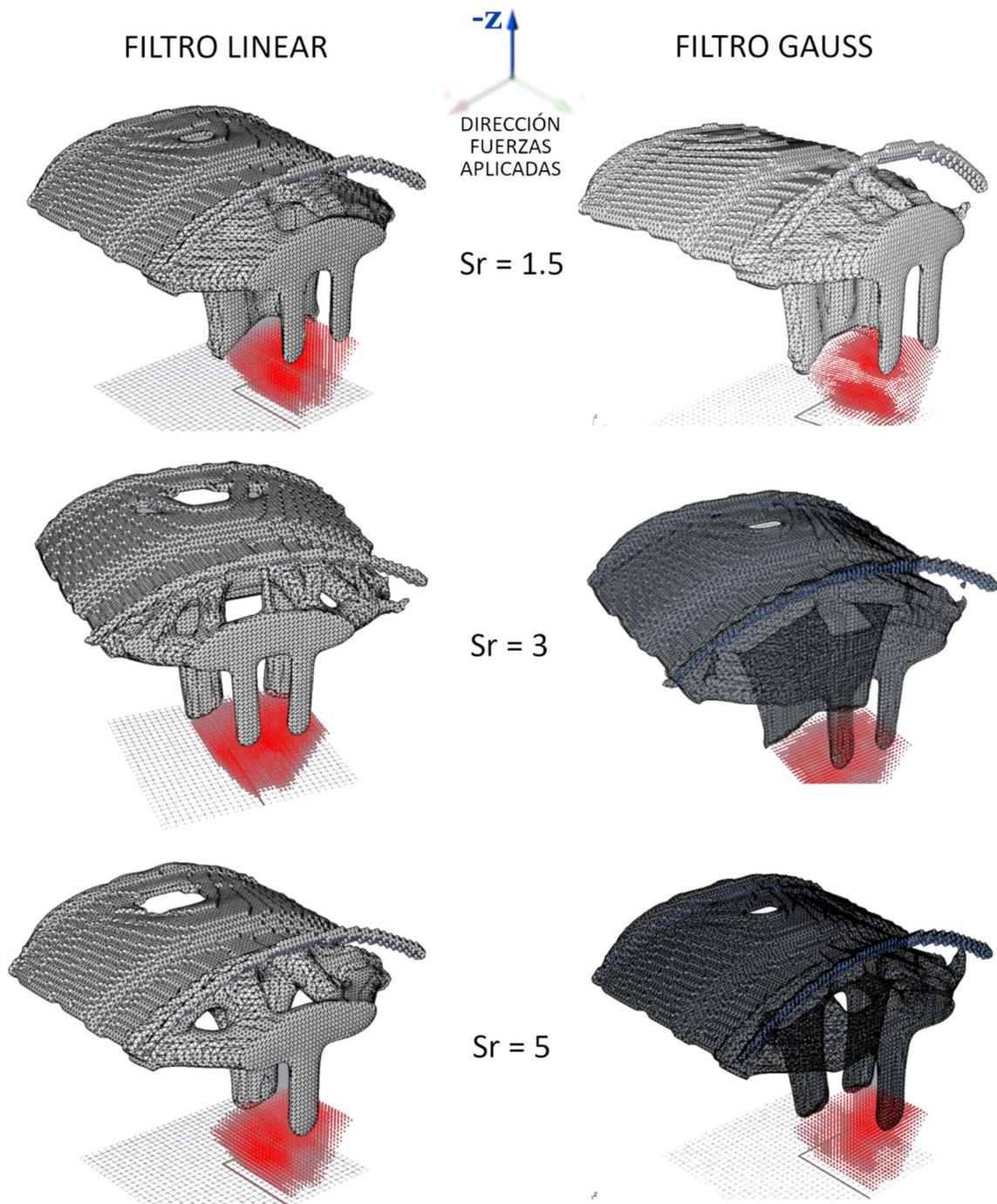


Figura 51 Resultados de la optimización de la llanta en Grasshopper para distintos Sr en dos tipos de filtro, fuerzas aplicadas en eje z negativo

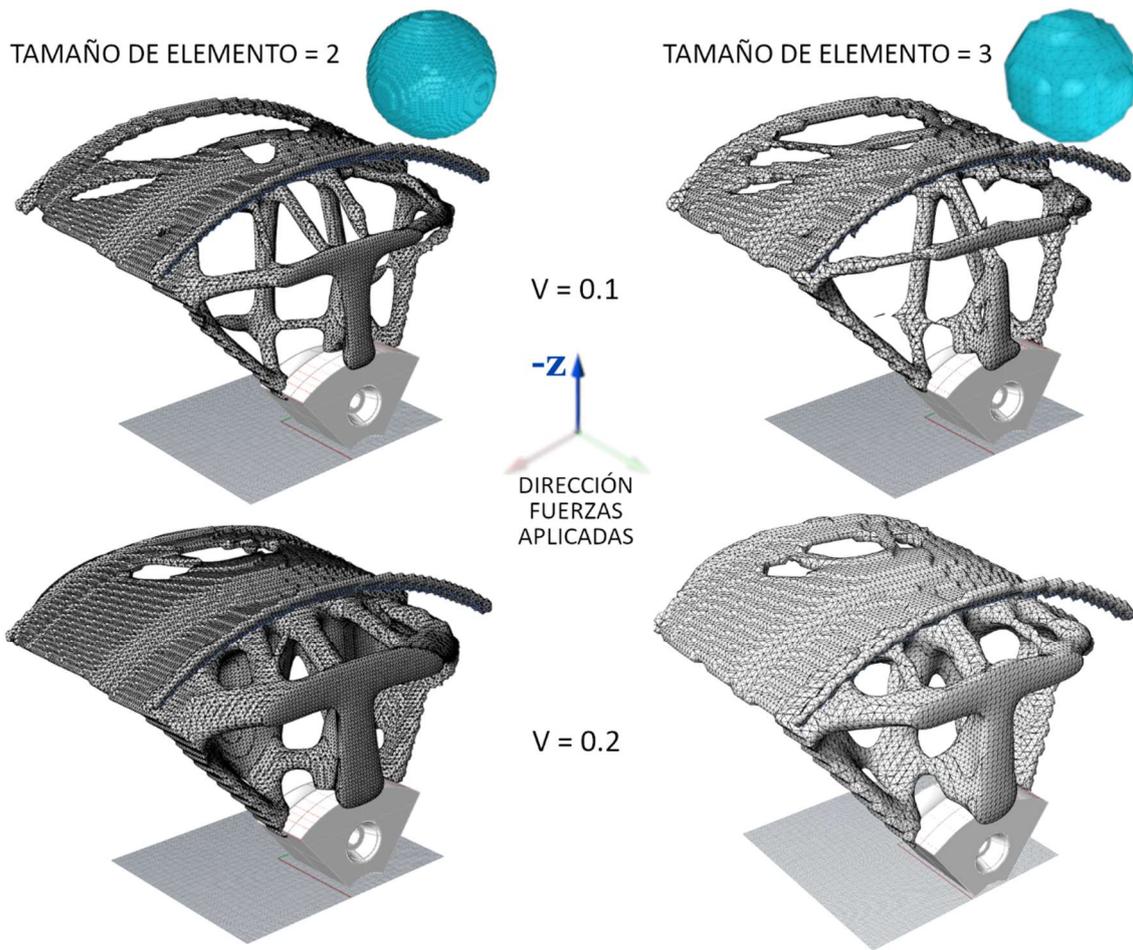


Figura 52 Resultados de la optimización de la llanta en Grasshopper para distintos tamaños de elemento y  $V$ , fuerzas aplicadas en eje z negativo

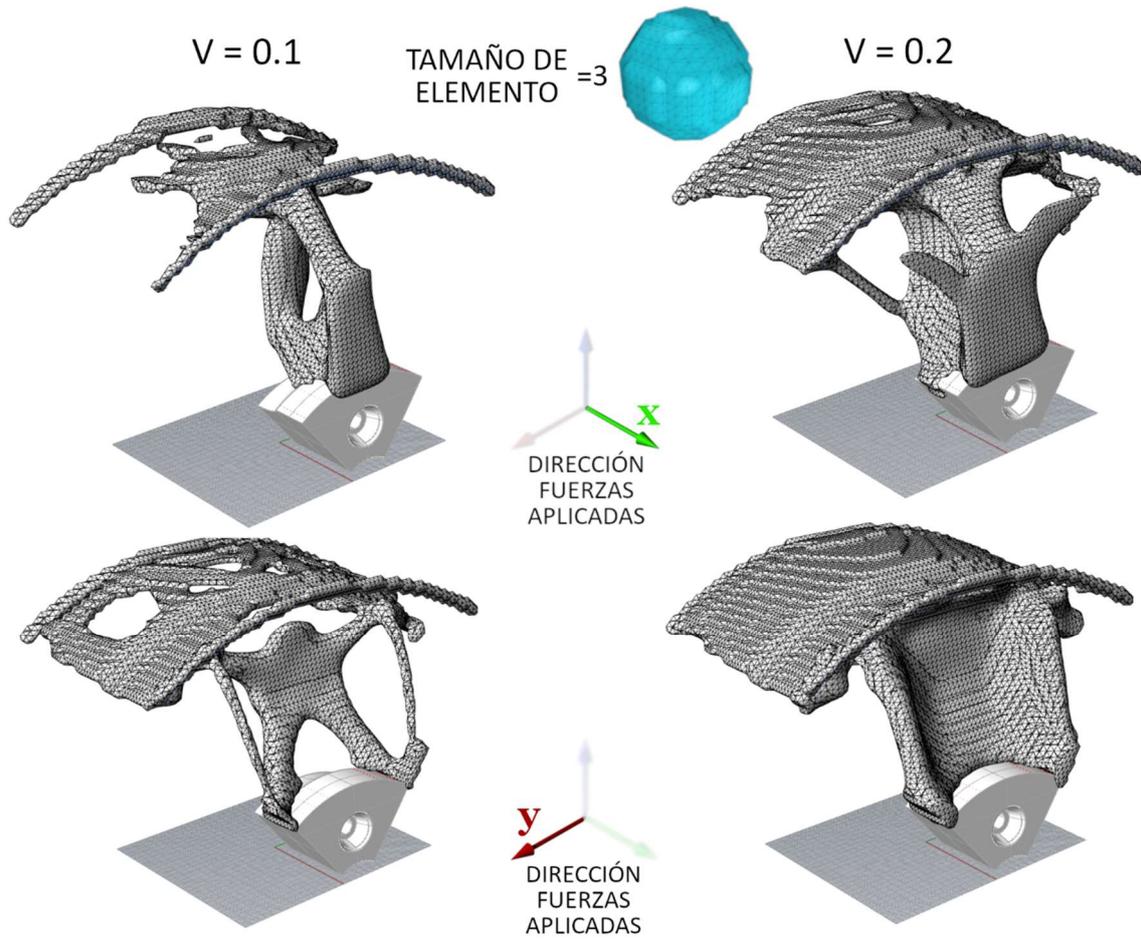


Figura 53 Resultados de la optimización de la llanta en Grasshopper para distintos  $V$ , fuerzas aplicadas en eje  $x$  e  $y$

## 5.2 Pérgola

En este apartado se van a mostrar todas las pruebas realizadas en las dos herramientas de optimización estudiadas, basándose en todo lo hecho anteriormente.

### 5.2.1 Fusion 360

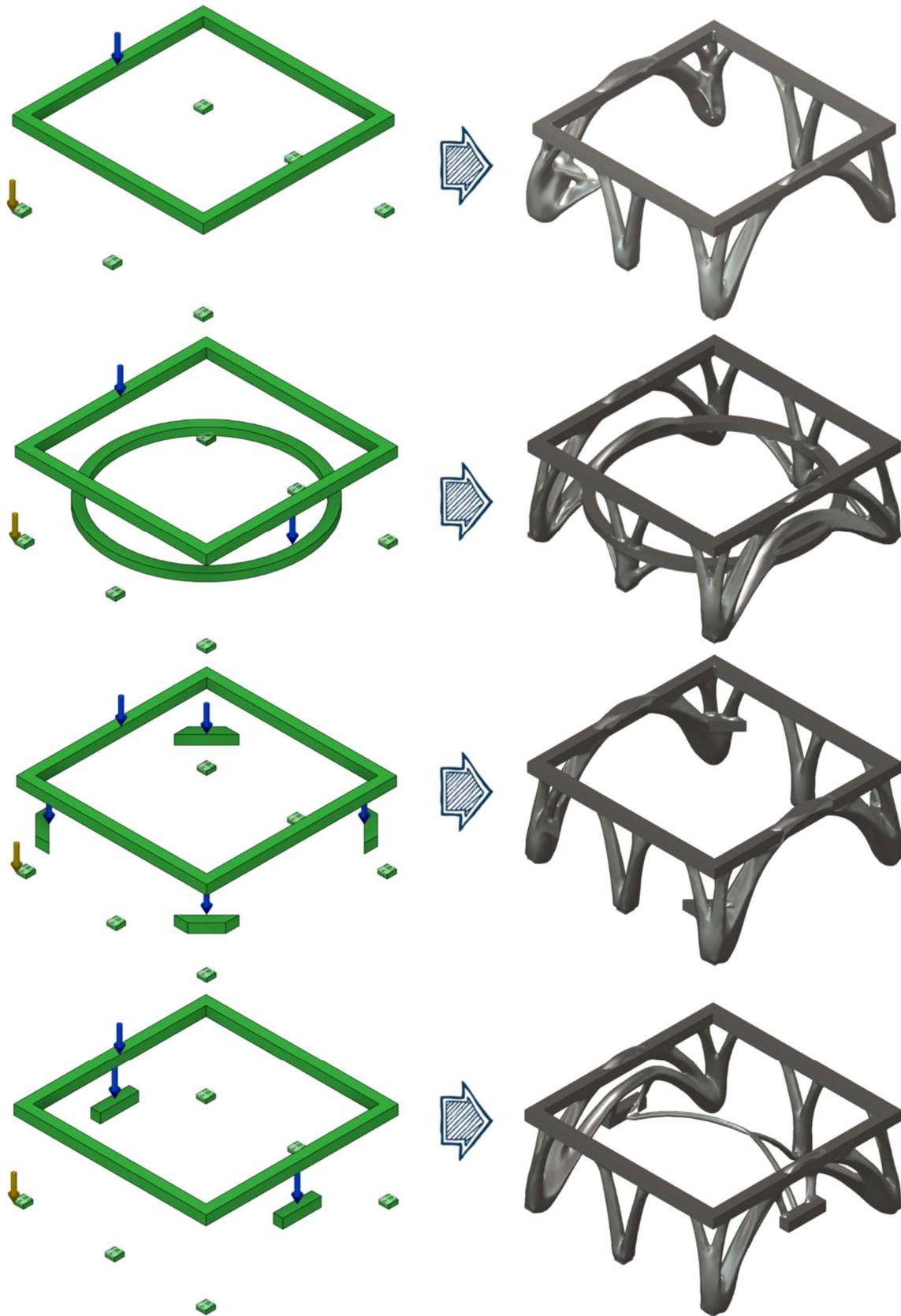


Figura 54 Resultados de la optimización de la pérgola en Fusion 360 para distintas geometrías

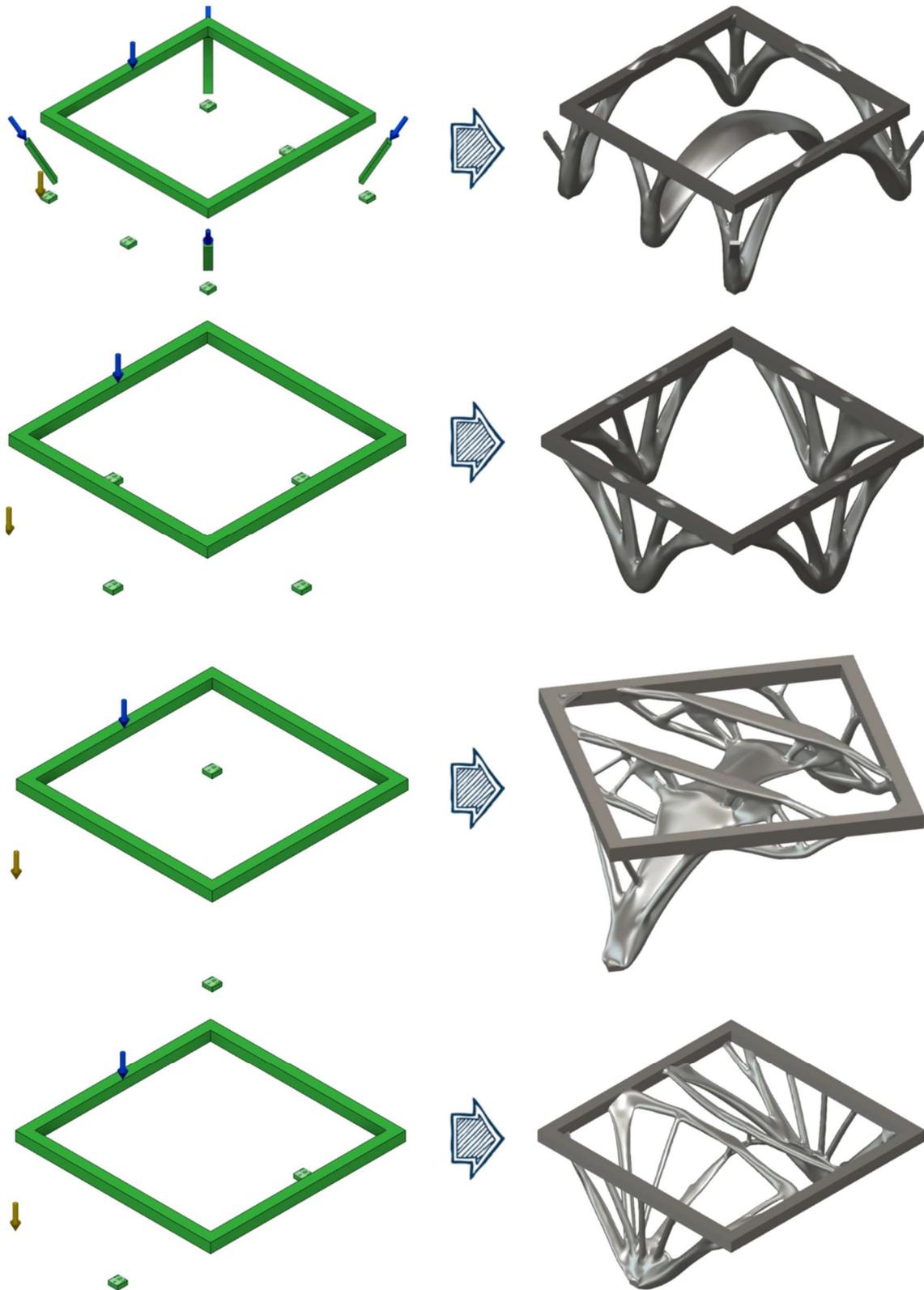


Figura 55 Resultados de la optimización de la pérgola en Fusion 360 para distintas geometrías

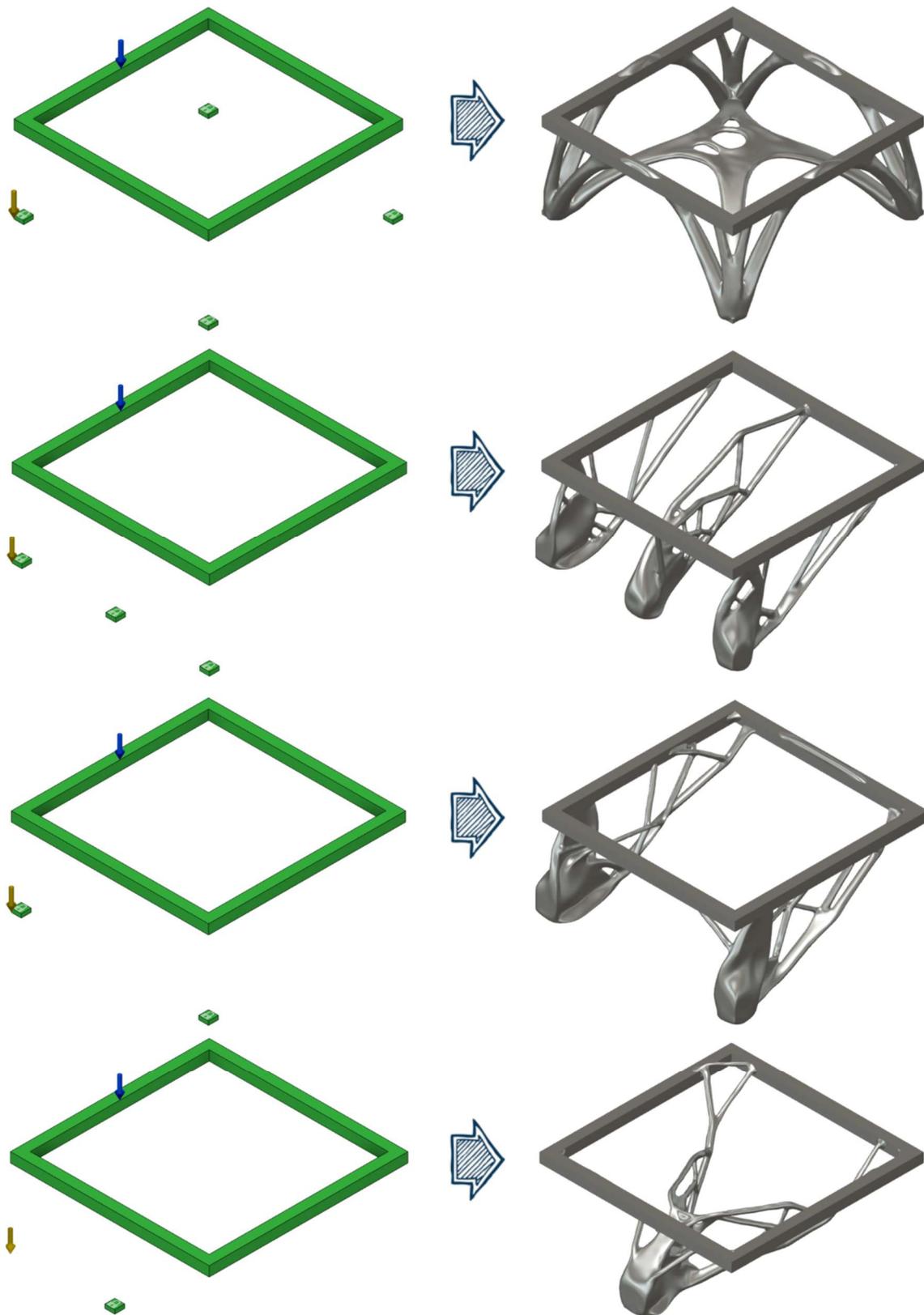


Figura 56 Resultados de la optimización de la pérgola en Fusion 360 para distintas geometrías

### 5.2.2 Grasshopper

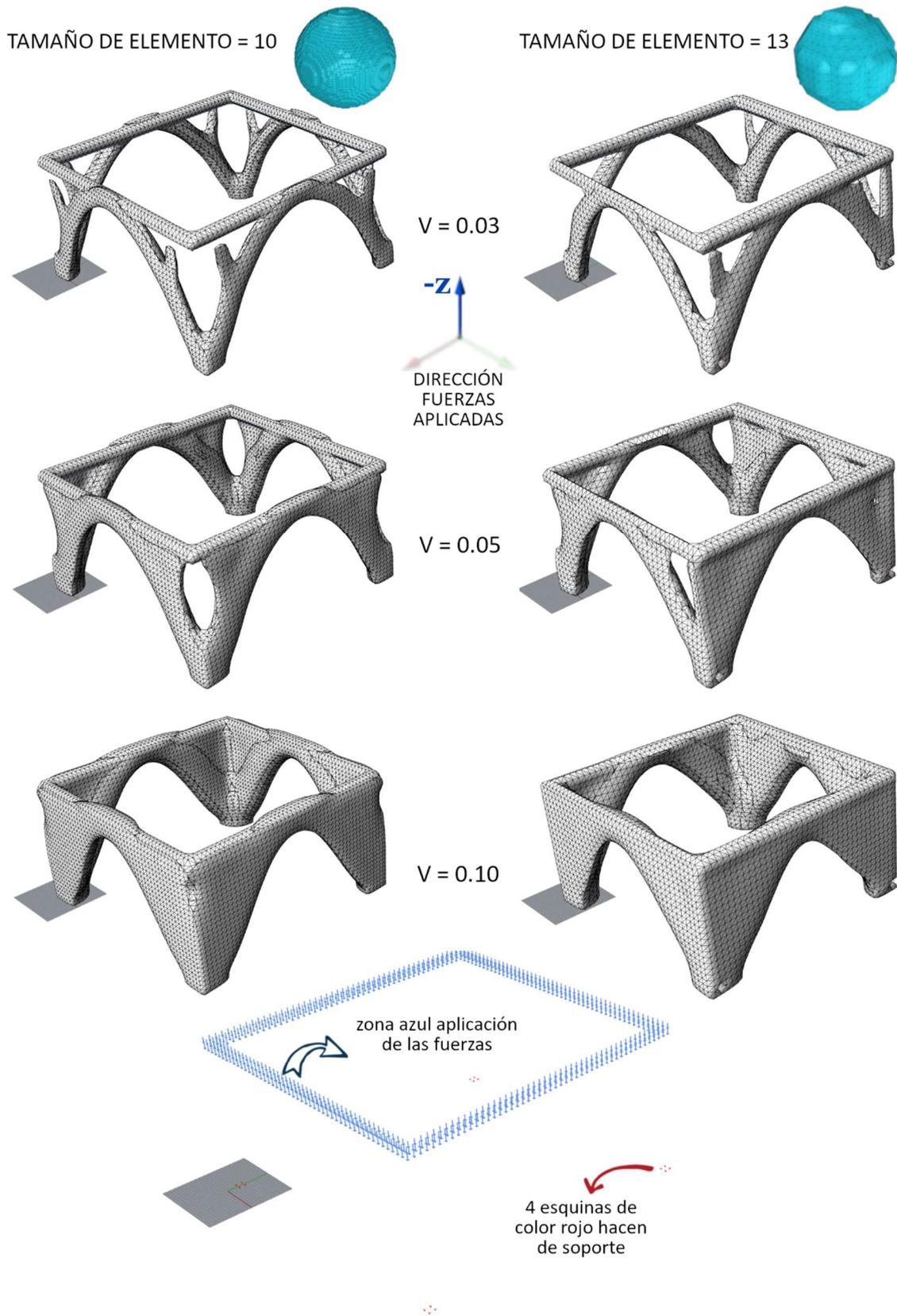


Figura 57 Resultados de la optimización de la pérgola en Grasshopper para distintas geometrías, tamaños de elemento y V

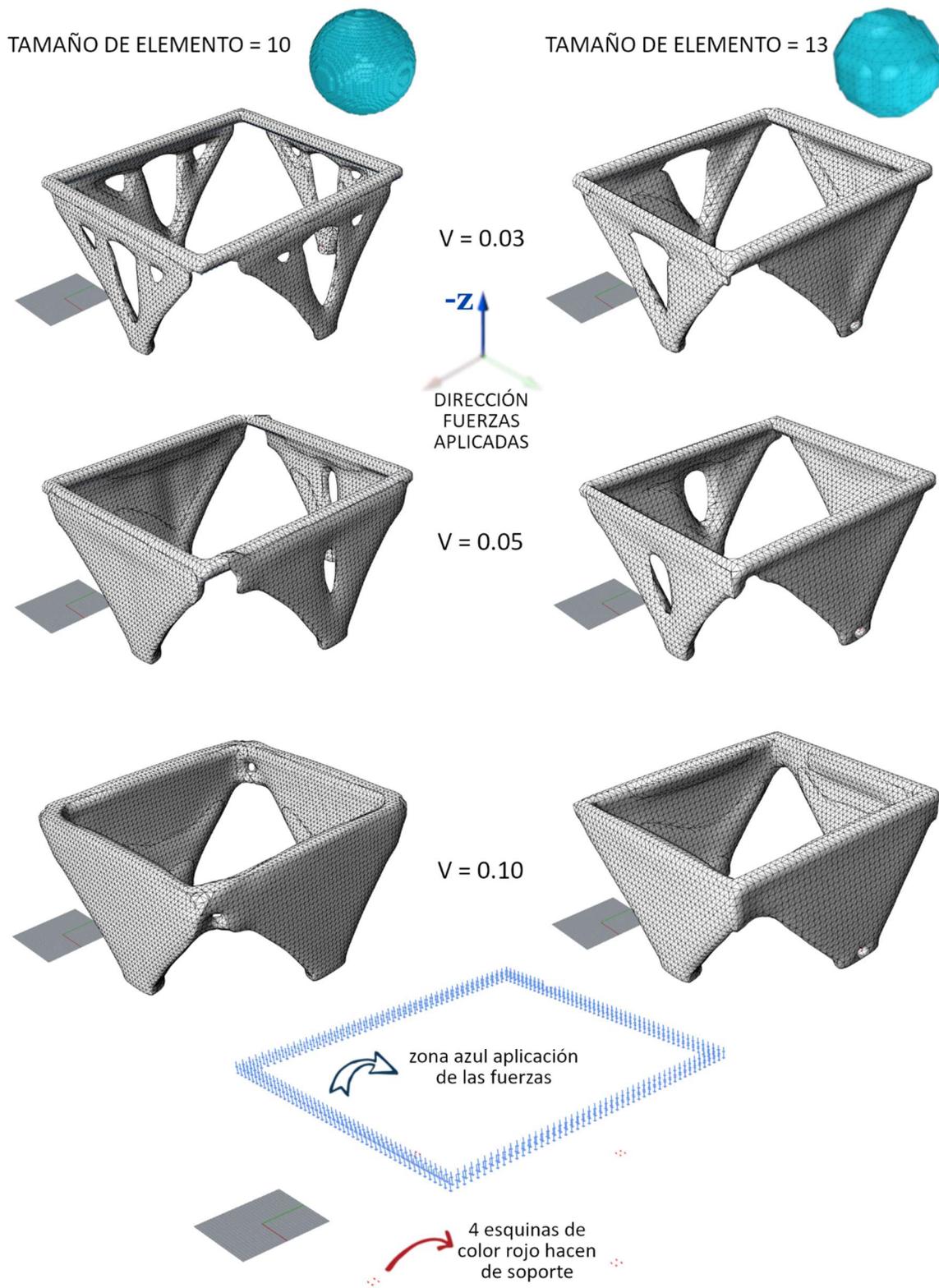


Figura 58 Resultados de la optimización de la pérgola en Grasshopper para distintas geometrías, tamaños de elemento y V

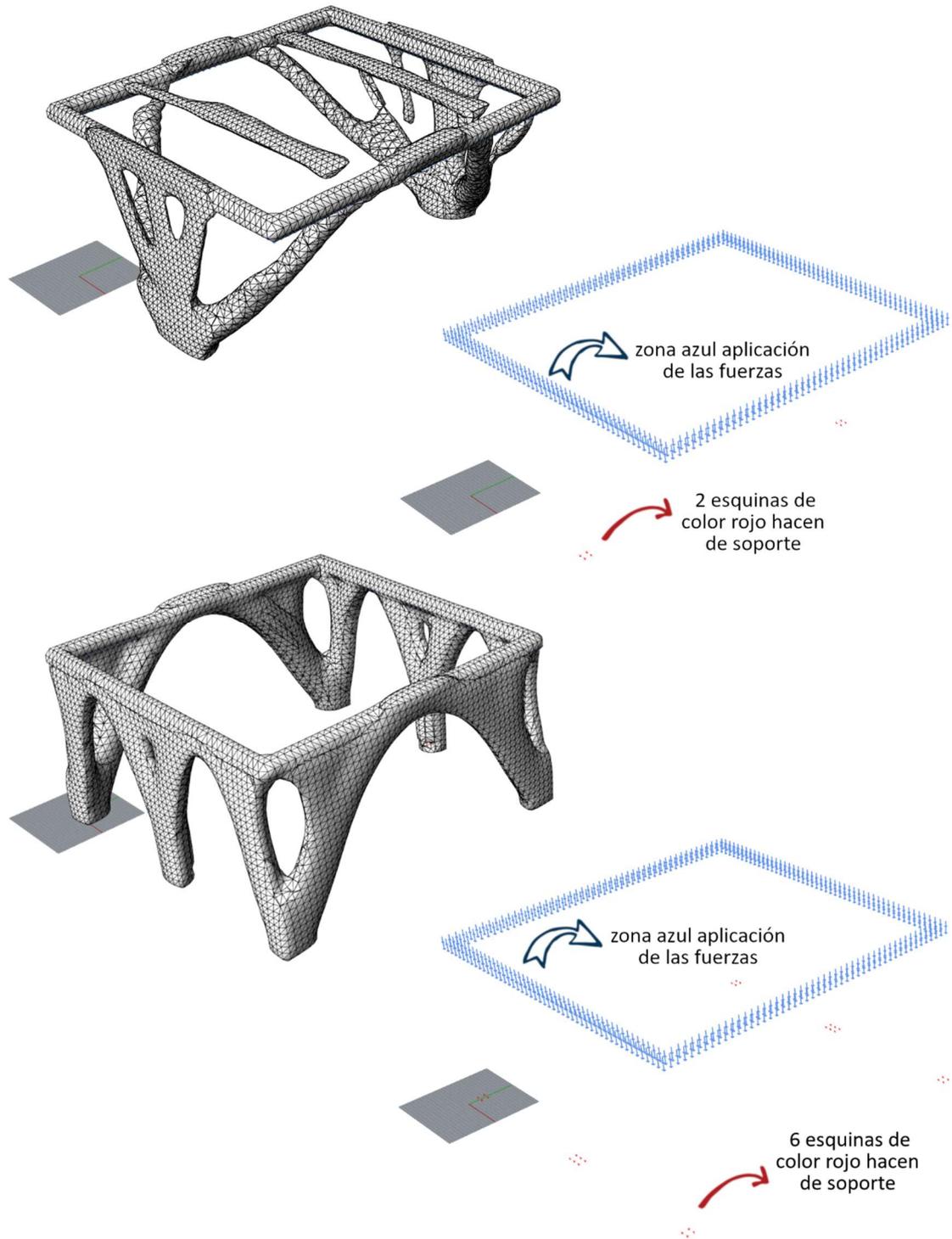


Figura 59 Resultados de la optimización de la pérgola en Grasshopper para distintas geometrías, tamaños de elemento y V

### 5.3 Cuadro de bici

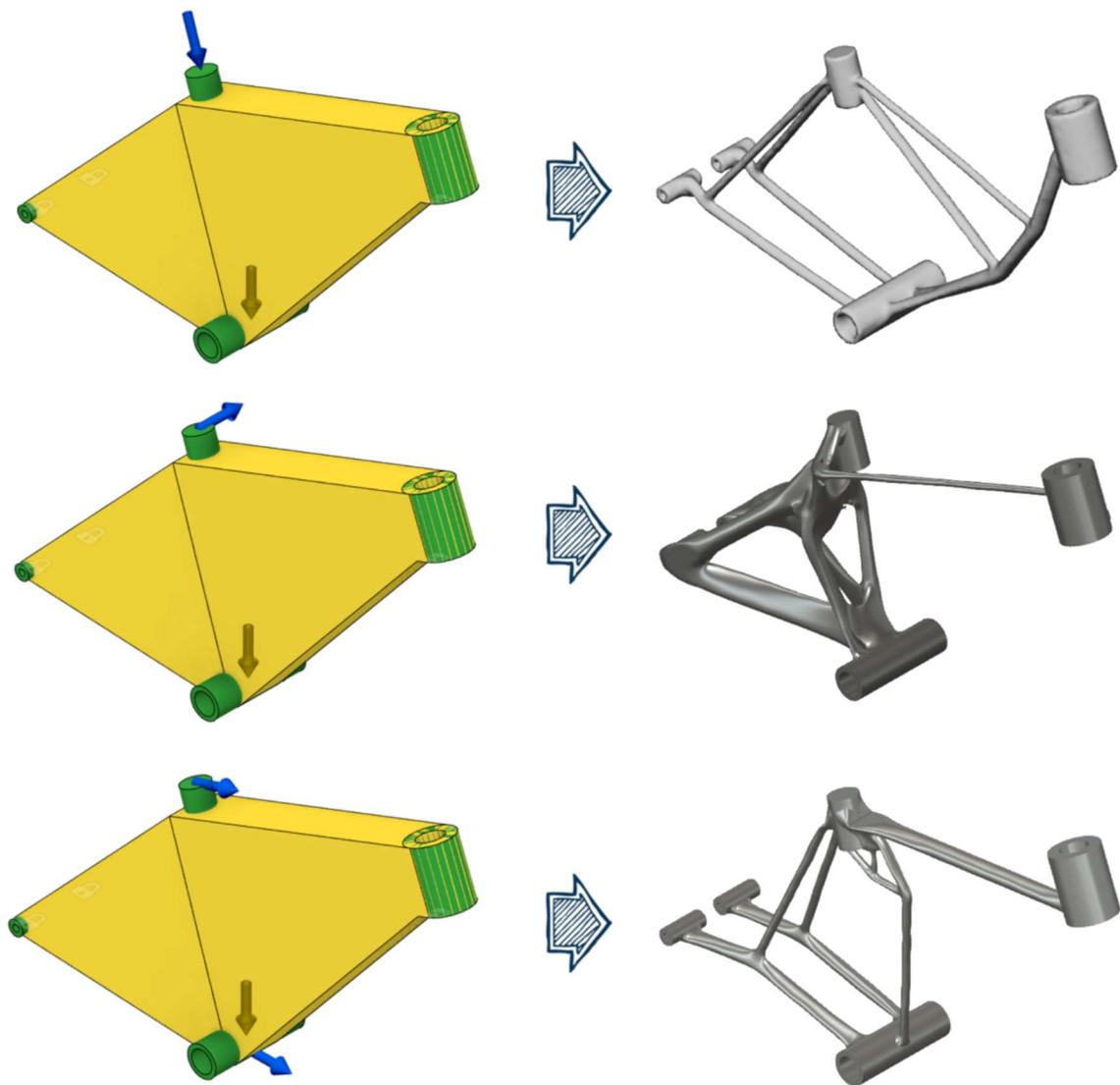


Figura 60 Resultados de la optimización del cuadro de la bici en Fusion 360 variando la dirección de las fuerzas aplicadas

## 5.4 Soporte farola

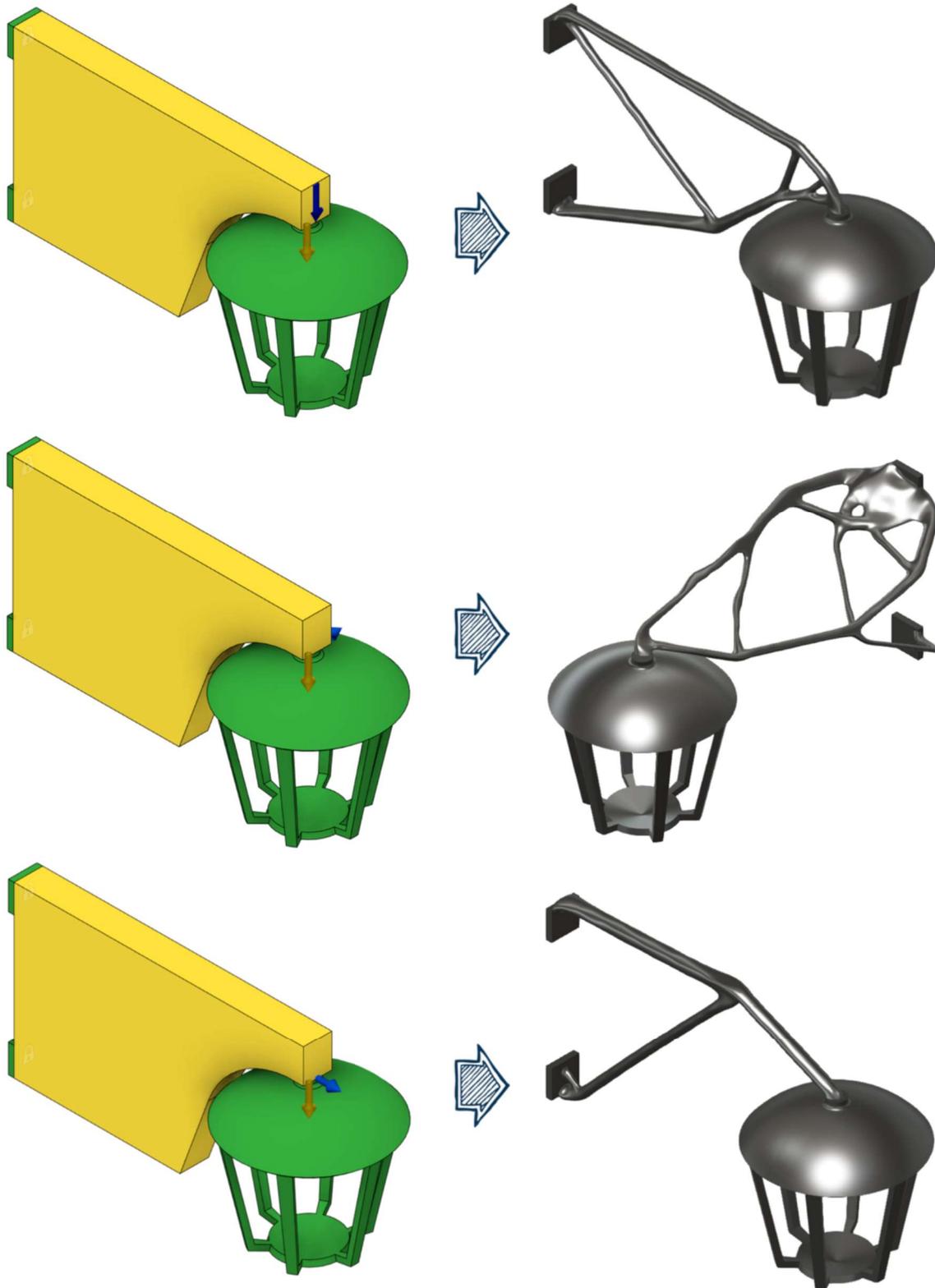


Figura 61 Resultados de la optimización del soporte de la farola en Fusion 360 variando la dirección de las fuerzas aplicadas

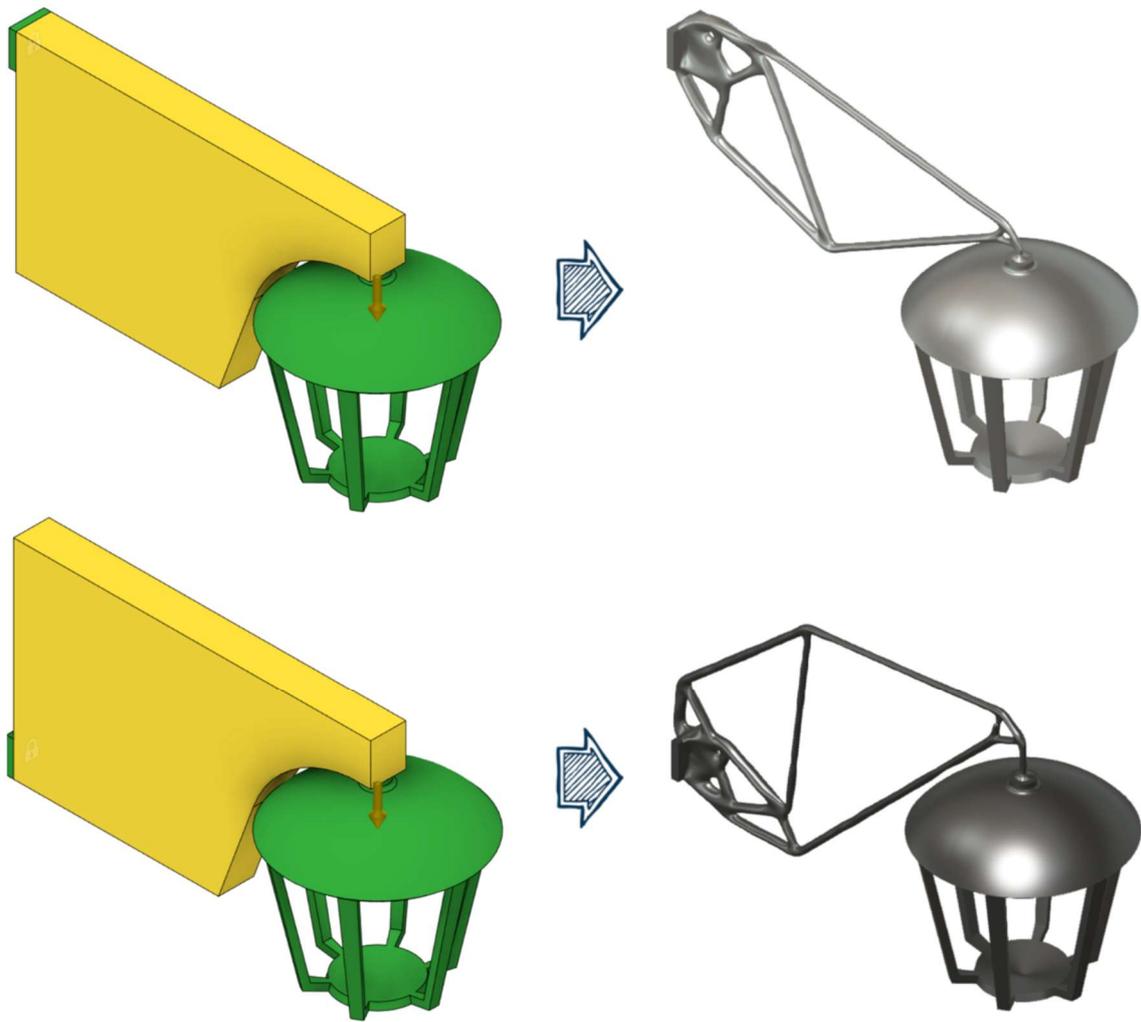


Figura 62 Resultados de la optimización del soporte de la farola en Fusion 360 variando la geometría

## 6 Conclusiones

Para concluir con la memoria se reflexionará sobre varios aspectos tratados en este TFM tales como el rendimiento de las herramientas, las posibilidades de estas y los resultados obtenidos para cada producto en cada herramienta de optimización topológica. Mediante esta reflexión se podrá determinar si la optimización topológica se puede usar como medio de generación de ideas, además de como creación de soluciones para problemas mecánicos.

### 6.1 Fusion 360

En las pruebas realizadas se ha comprobado que Fusion 360 es una herramienta que permite con unos pocos pasos, generar diseños que no necesitan de una gran preparación por parte del diseñador. Este rasgo de facilidad de uso, junto a la agradable interfaz ayuda a que el usuario enseguida puede obtener grandes resultados.

Por otra parte, el desempeño de la herramienta es realmente bueno ya que durante todo el desarrollo del TFM no se ha tenido en ningún momento cierres o cuelgues inesperados.

Además, al estar basado en la nube, no es necesario tener el ordenador encendido para resolver los problemas de optimización topológica. Estos servicios basados en la nube son rápidos y están basados en un sistema de créditos, que al utilizar estos sistemas basados en la nube son consumidos dependiendo de la operación. Se ha de aclarar que al ser una cuenta académica los créditos son ilimitados.

En cuanto a las posibilidades que ofrece, la más destacable es la gran potencia de cálculo de la que dispones. Al ser un sistema basado en la nube, no es necesario disponer de un ordenador potente para realizar las simulaciones.

### 6.2 Grasshopper

Esta herramienta ofrece más posibilidades a la hora de controlar la simulación, ya que permite acceder a todos los parámetros involucrados en el proceso. Esto hace que las posibilidades que ofrece esta herramienta sean superiores a las ofrecidas por Fusion 360.

Esta ventaja también tiene un inconveniente, la necesidad de tener mayores conocimientos sobre Grasshopper para poder usar la herramienta, de los que necesitarías para usar Fusion 360. Aunque el método de usar Grasshopper, basado en la programación gráfica mediante bloques que se conectan entre sí es muy intuitiva, para usar herramientas más avanzadas si que es necesario un mayor conocimiento. Esta puede ser una buena razón para decantarse por otras herramientas que no necesitan de tanto aprendizaje para utilizarla, pero que el control sobre la optimización es menor.

Otra ventaja de este programa es la posibilidad de usar complementos creados por otros usuarios y descargarlos desde un repositorio web, como el que se ha usado para realizar este TFM. Esta posibilidad hace de Rhino y Grasshopper unas herramientas en constante crecimiento.

## **6.3 Estrategias seguidas**

### **6.3.1 Variar la dirección de las fuerzas aplicadas**

Como se puede ver en todos los resultados obtenidos, tanto en Fusion 360 como en Grasshopper, esta estrategia es fundamental para conseguir lo que se buscaba.

Como se acaba de decir los cambios que provoca variar la dirección de las fuerzas en la forma del producto son muy grandes, por lo tanto, seguir esta estrategia debería ser una opción para tener muy en cuenta.

Por otra parte, variar las fuerzas podría desembocar en problemas que no se pueden resolver al tratarse de problemas estructurales, por lo tanto habría que tenerlo muy en cuenta,

Estos resultados son esperables, ya que la optimización topológica se basa en calcular los esfuerzos sufridos por la pieza y redistribuir de una manera óptima la masa disponible en todo el volumen de control. Por lo que cambiar la dirección de las fuerzas aplicadas, debería cambiar de forma significativa la distribución de los esfuerzos, por ende, de la distribución de la materia. Estos cambios se han visto reflejados en los resultados obtenidos.

### **6.3.2 Hacer cambios en la geometría**

Esta estrategia ha sido utilizada en todos los productos, obteniendo cambios muy significativos en la pérgola, en el soporte de la farola y cambios menores en la llanta. En el cuadro de la bicicleta no se han realizado esta estrategia, ya que en las pruebas realizadas el resultado no era nada parecido al objeto de partida.

Para la llanta se ha optado por variar la pieza central, que sirve como apoyo para los pilares de esta. Este cambio ha afectado a que las formas se generasen en menor espacio en su base. Esto ha provocado que los diseños que se ven más afectados por esta reducción en la sección de apoyo, cambien con una mayor claridad que los que no se ven afectados por este cambio, es decir, las fuerzas aplicadas en z negativo y en el eje longitudinal de la llanta.

En el caso de la pérgola, esta estrategia se ha seguido cambiando los apoyos de esta, tanto en número como en disposición. Esto obliga al programa a cambiar los cálculos de los esfuerzos y como consecuencia la distribución de la masa. Por lo tanto, era de esperar la gran variación en los resultados obtenidos.

Por último, en el soporte de la farola, estos cambios vienen dados por la reducción del número de soportes

Con esto se demuestra que unos pequeños cambios en la geometría a optimizar, provoca cambios significativos en los modelos generados, por lo que se puede decir que también es una buena estrategia que seguir.

### **6.3.3 Variar los parámetros de la optimización**

Debido a la naturaleza de ambas herramientas, los mayores cambios se han producido en Grasshopper, ya que permite variar una gran cantidad de estos.

Los cambios en Fusion 360 producidos por la variación en los parámetros han sido poco significativos, por eso se ha optado por omitirlos. En cambio, en Grasshopper estos cambios si son visibles y por ese motivo si se ha optado a mostrarlos. Que es en lo que basa prácticamente las pruebas realizadas sobre la llanta.

De todas formas, estos cambios han supuesto en la mayoría de los casos de un “adelgazamiento” del modelo, no llegando a ser tan significativos como en las anteriores estrategias. Es posible que ante la complejidad del complemento utilizado y ante las opciones que ofrece, no se haya profundizado lo suficiente como para conseguir estos cambios que si se han visto en las otras estrategias.

Esta estrategia para conseguir cambios en los modelos ha sido causas de distintos estudios por parte de investigadores en los últimos años, por lo que es una vía donde la complejidad es elevada y necesita conocimientos profundos de la herramienta que se utiliza.

## **6.4 Valoraciones finales**

Los diseñadores actualmente disponen de multitud de herramientas informáticas para romper los bloqueos a la hora de generar nuevos diseños. La complejidad y los conocimientos necesarios para usar herramientas de diseño generativo suponen en ocasiones que no se utilicen todo lo que deberían. Por ese motivo en este TFM se ha intentado dar una visión más amplia sobre la utilización de otras herramientas para ese fin, como la optimización topológica.

A la vista de los resultados obtenidos, se puede decir que aplicando pequeños cambios a la hora de utilizar esta herramienta (con las tres estrategias seguidas) se pueden obtener diseños lo suficientemente distintos unos de otros, como para asegurar la generación de ideas que sirvan al diseñador como inspiración para crear nuevos productos.

Los productos escogidos tienen un gran componente estructural a la hora de la optimización, por lo tanto, no se puede asegurar que estas herramientas ni estas estrategias se puedan extrapolar a otros productos que no tengan el componente estructural tan marcado. Aunque en el cuadro de la bicicleta el componente estructural es importante, no se han conseguido resultados deseables en este caso.

Por lo tanto, se puede decir que las herramientas de optimización topológica, con las estrategias adecuadas y dentro del ámbito estructural son viables como medio para la generación de ideas.

## 7 Bibliografía

1. **Diego Más, José Antonio y Alcaide Marzal, Jorge.** *Tema 1: Introducción al diseño generativo.* Material académico de la asignatura Diseño Generativo de Producto del Máster Universitario en Ingeniería Industrial.
2. *Product customization and generative design.* **Trautmann, Laura.** 2021, Multidiszciplináris Tudományok.
3. **Autodesk.** [En línea] 15 de Julio de 2016.  
[https://www.youtube.com/watch?v=E2SxqUvtpk&ab\\_channel=Autodesk](https://www.youtube.com/watch?v=E2SxqUvtpk&ab_channel=Autodesk).

## Documento II:

# PRESUPUESTO



# ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

<b>1</b>	<b>DESARROLLO DEL TRABAJO FINAL DE GRADO</b>	<b>51</b>
<b>2</b>	<b>HERRAMIENTAS Y MATERIAL EMPLEADO</b>	<b>52</b>
<b>3</b>	<b>PRESUPUESTO GENERAL</b>	<b>53</b>



# 1 Desarrollo del Trabajo Final de Máster

Para el desarrollo del TFM se han empleado un total de 300 horas, que corresponden con 12 créditos ECTS. Las horas se han empleado de la siguiente manera:

1. **Estudio y análisis del problema propuesto:** 215 horas. Esta parte supone la mayoría del tiempo dedicado, debido a la necesidad de realizar multitud de simulaciones abarcando todos los casos de estudio y las estrategias seguidas que consumen gran parte del tiempo.

Este proceso tiene una tarifa de 40 €/hora, debido a que en un proyecto puntual de un ingeniero dista de lo que podría suponer estar trabajando para una empresa.

2. **Documentación y redacción de la memoria:** 85 horas. Esta es la parte que completa la primera partida y que completa las 300 horas que componen el TFM. Supone una tarifa de 23 €/hora debido a que un técnico sin estudios superiores puede realizar la tarea.

PARTIDA 1: DESARROLLO DEL TRABAJO FINAL DE GRADO				
CONCEPTO	UNIDAD BÁSICA	CANTIDAD DE UNIDADES BÁSICAS	PRECIO (€) POR UNIDAD BÁSICA	TOTAL (€)
Estudio y análisis	h	215	40 €	8,600 €
Documentación y redacción de la memoria	h	85	23 €	1,955 €

Costes Indirectos	2%
<b>SUBTOTAL 1</b>	<b>10,766 €</b>

## 2 Herramientas y material empleado

Por otro lado, se encuentra la partida donde se reflejan los gastos derivados de la utilización de licencias de software o del material utilizado. Estos gastos son:

1. **Coste de amortización del ordenador:** El ordenador que se ha utilizado en la elaboración del TFM es un ordenador de sobremesa. El ordenador fue un equipo hecho por piezas que supuso un coste de 1500 €, cuyo periodo de amortización se ha supuesto de 5 años, a 2016 horas laborables al año (suponiendo 252 días laborable en 2021 y a 8 horas la jornada), se obtiene un coste de 14,8 céntimos la hora. Debido a que el TFM han ocupado 300 horas, el coste total es de 44.40 €.
2. **Coste de amortización de Autodesk Fusion 360:** El coste de una licencia de Autodesk Fusion 360 es de 1,356 € por 3 años, además se debe añadir la extensión de diseño generativo con un coste de 2,112€ al año. También existe la posibilidad de adquirir dicha licencia mensualmente a un coste de 61€ y 267€ respectivamente. Se cree que lo más conveniente es adquirir la licencia para el máximo de años debido a la rebaja en el precio frente a la suscripción mensual. El coste de amortización es de 1.27 euros la hora. Como el software se ha utilizado por estimación un 40 % de las horas de diseño, las horas totales utilizadas son 86 horas, por lo que tiene un coste de 109.38 €.
3. **Coste de amortización de Rhinoceros:** Este software únicamente ofrece la posibilidad de realizar un pago de 995€ por una licencia de por vida, por lo que el coste para este presupuesto, suponiendo que no se va a volver a utilizar es de 995€
4. **Coste amortización Microsoft 365:** El coste de la licencia supone 69 € euros al año, y se ha utilizado para la redacción de la memoria, es decir unas 85 horas. Por lo que el coste sería de 0.03 € la hora.

PARTIDA 2: HERRAMIENTAS Y MATERIAL EMPLEADO				
CONCEPTO	UNIDAD BÁSICA	CANTIDAD DE UNIDADES BÁSICAS	PRECIO (€) POR UNIDAD BÁSICA	TOTAL (€)
Coste de amortización del ordenador	h	300	0.148	44.40 €
Coste de amortización de Autodesk Fusion 360	h	86	1.27	109.22 €
Coste de amortización de Rhinoceros	ud	1	995	995 €
Coste amortización Microsoft 365	h	85	0.03	2.55 €

Costes Indirectos	2%
<b>SUBTOTAL 2</b>	<b>1,174.19 €</b>

### 3 Presupuesto general

PARTIDA 1: DESARROLLO DEL TRABAJO FINAL DE MÄSTER				
CONCEPTO	UNIDAD BÁSICA	CANTIDAD DE UNIDADES BÁSICAS	PRECIO (€) POR UNIDAD BÁSICA	TOTAL (€)
Estudio y análisis	h	215	40 €	8,600 €
Documentación y redacción de la memoria	h	85	23 €	1,955 €

Costes Indirectos	2%
<b>SUBTOTAL 1</b>	<b>10,766 €</b>

PARTIDA 2: HERRAMIENTAS Y MATERIAL EMPLEADO				
CONCEPTO	UNIDAD BÁSICA	CANTIDAD DE UNIDADES BÁSICAS	PRECIO (€) POR UNIDAD BÁSICA	TOTAL (€)
Coste de amortización del ordenador	h	300	0.148	44.40 €
Coste de amortización de Autodesk Fusion 360	h	86	1.27	109.22 €
Coste de amortización de Rhinoceros	ud	1	995	995 €
Coste amortización Microsoft 365	h	85	0.03	2.55 €

Costes Indirectos	2%
<b>SUBTOTAL 2</b>	<b>1,174.19 €</b>

<b>COSTE SIN IVA</b>	<b>11,940.19 €</b>
IVA	21%

<b>COSTE TOTAL DEL TFM</b>	<b>14,447.62 €</b>
----------------------------	--------------------