



Escola Tècnica Superior d'Enginyeries  
Industrial i Aeronàutica de Terrassa

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# PROYECTO DE MODELIZACIÓN, CONSTRUCCIÓN Y CÁLCULO ESTRUCTURAL DE UNA ESTRUCTURA

Grado en ingeniería en tecnologías industriales  
(GRETI)

**Autor:** Amat de Swert, Lucas

**Tutores:** Weyler Pérez, Rafael

Sánchez Romero, Montserrat

29/05/2015

1ª convocatoria

## Índice

1. Introducción.....	5
2. Objetivo.....	5
3. Justificación.....	6
4. Alcance.....	6
5. Requerimientos.....	7
6. Antecedentes y estado del arte.....	7
7. Sistemas considerados.....	8
7.1 Introducción.....	8
7.2 Sistema tubo.....	8
7.2.1 Pieza de unión.....	8
7.2.2 Barras.....	10
7.2.3 Estructuras de muestra.....	10
7.3 Sistema barra plana.....	11
7.3.1 Barras.....	11
7.3.2 Estructura de muestra.....	12
7.4 Sistema con bola.....	12
7.4.1 Pieza unión.....	13
7.4.2 Barras.....	14
7.4.3 Estructura de muestra.....	14
7.5 Comparación y selección de los sistemas.....	15
7.5.1 Sistema tubo.....	15
7.5.2 Sistema barra plana.....	15
7.5.3 Sistema con bola.....	15
7.5.4 Selección final.....	16
8. Sistema con bola.....	16
8.1 Pieza unión.....	16
8.1.1 Sistema fijación entre la pieza unión y las barras.....	16
8.1.2 Diferentes piezas unión.....	18
8.2 Diferentes tipos de barras.....	19
8.3 Articulaciones.....	20
8.3.1 Introducción.....	20
8.3.2 Cono interior.....	21
8.3.3 Cono exterior.....	21
8.3.4 Unión cono exterior, cono interior y pieza unión.....	22
8.3.5 Articulación entre barras.....	22

8.4	Apoyos.....	23
8.4.1	Introducción.....	23
8.4.2	Apoyo empotrado.....	23
8.4.3	Apoyo fijo.....	23
8.4.4	Apoyo móvil.....	24
8.5	Estructuras de muestra.....	25
9.	Material.....	26
10.	Simulación.....	28
10.1	Introducción.....	28
10.2	Ejemplo simulación.....	29
11.	Resumen presupuesto.....	34
12.	Estudio medioambiental y riesgos laborales.....	35
13.	Planificación y programación de fases siguientes.....	36
14.	Conclusiones.....	37
15.	Bibliografía.....	38

## Índice de imágenes.

Imagen 1 Pieza unión 4 entradas .....	8
Imagen 2 Pieza unión 4 entradas cortada.....	9
Imagen 3 Pieza unión 6 entradas .....	9
Imagen 4 Pieza unión 6 entradas cortada.....	9
Imagen 5 Estructura muestra sistema con tubo .....	10
Imagen 6 Barra plana de dos planos .....	11
Imagen 7 Barra plana .....	12
Imagen 8 Estructura muestra sistema barra plana.....	12
Imagen 9 Pieza unión .....	13
Imagen 10 Pieza unión cortada .....	13
Imagen 11 Estructura muestra sistema con bola .....	14
Imagen 12 Fijación mediante presión .....	17
Imagen 13 Fijación mediante rosca .....	17
Imagen 14 Fijación mediante rosca detalle .....	17
Imagen 15 Estructura básica triángulo rectángulo .....	19
Imagen 16 Estructura básica triángulo equilátero .....	19
Imagen 17 Cono interior .....	21
Imagen 18 Cono exterior .....	21
Imagen 19 Unión cono interior, cono exterior y pieza unión.....	22
Imagen 20 Articulación entre barras .....	22
Imagen 21 Apoyo empotrado.....	23
Imagen 22 Apoyo fijo .....	24
Imagen 23 Apoyo móvil .....	24
Imagen 24 Estructura muestra 1 .....	25
Imagen 25 Estructura muestra 2.....	25
Imagen 26 Estructura muestra 3.....	26
Imagen 27 Estructura simple simulación.....	29
Imagen 28 Como definir sujeciones .....	30
Imagen 29 Como definir uniones entre piezas .....	31
Imagen 30 Como definir cargas.....	32
Imagen 31 Como definir material .....	32
Imagen 32 Resultado simulación .....	33
Imagen 33 Estudio impacto ambiental. ....	35

## Índice de tablas.

Tabla 1 Características material ABS .....	28
Tabla 2 Codificación tareas siguientes.....	37
Tabla 3 Programación temporal.....	37
Tabla 4 Programación en fechas .....	37

# 1. Introducción.

En este proyecto se quiere modelar un sistema de barras para dar la posibilidad de construir diferentes estructuras en 3 dimensiones. La idea es modelar diferentes piezas que se puedan unir entre ellas y que el conjunto entre estas constituya una estructura tridimensional. Se ha intentado diseñar un sistema que de mucha libertad a la hora de decidir que estructura realizar de manera que con las piezas se pueda construir una gran variedad de estructuras diferentes.

Se han estudiado diferentes conjuntos de piezas que constituían sistemas para la construcción de estructuras. Finalmente se ha escogido uno teniendo en cuenta los siguientes factores:

- 1) La flexibilidad en cuanto a las diferentes estructuras que se pueden realizar.
- 2) Simplicidad de uso.
- 3) La originalidad del sistema, de manera que sea más atractiva.

# 2. Objetivo.

El objetivo de este proyecto es modular el sistema de barras y las diferentes uniones entre ellas para obtener una herramienta que de la posibilidad de construir diferentes estructuras. Una vez obtenida la herramienta, se quiere realizar una estructura simple y estudiar su comportamiento a diferentes cargas, de manera que se pueda observar el efecto de estas sobre la estructura. Para la modulación de la herramienta, la construcción de la estructura y el estudio de esta a diferentes cargas se va a utilizar el programa de modulación Solidworks.

El objetivo de esta herramienta es que los futuros alumnos puedan utilizarla para diseñar sus propias estructuras y puedan observar el comportamiento de esta cuando se la somete a diferentes cargas. De esta manera los futuros estudiantes podrán observar, de forma más amena y divertida, los diferentes conceptos estudiados en clase.

### 3. Justificación.

Este proyecto se realiza para facilitar a los alumnos una herramienta con la que puedan modelar la estructura que ellos decidan y estudiar su comportamiento a diferentes cargas. De esta manera, se busca que los alumnos observen las diferentes consecuencias de las cargas sobre la estructura que ellos mismos han diseñado, de manera más práctica y amena.

Los alumnos tendrán todas las piezas necesarias para realizar su estructura, por lo tanto, deberán unir estas piezas para realizarla y después decidir a qué cargas quieren someter su estructura para ver su comportamiento. Tienen la posibilidad de simular su estructura antes de realizarla, para ello deberán utilizar el programa de modulación Solidworks, ya que las piezas están moldeadas con este programa.

### 4. Alcance.

En este proyecto se quiere:

- Diseñar completamente un sistema de barras modulable. Este sistema deberá dar la posibilidad de construir estructuras en 3 dimensiones. También se diseñaran los apoyos fijos, móviles y empotrados.
- Proponer un material con el que fabricar el sistema, de manera que se pueda fabricar mediante una impresora 3D.
- Realizar una simulación de una estructura, realizada con el sistema de barras modulable diseñado, sometida a alguna carga.
- Estudiar los costes del sistema propuesto.

## 5.Requerimientos.

Los requerimientos básicos de este proyecto serán:

- El sistema de barras ha de ser modulable, es decir, se debe diseñar diferentes piezas que se puedan unir entre ellas, de manera, que dé la posibilidad de realizar diferentes estructuras.
- El sistema ha de ser capaz de realizar estructuras en tres dimensiones.
- Se debe poder realizar una simulación de la estructura, fabricada mediante el sistema implementado.
- Se ha de poder fabricar todas las piezas mediante una impresora 3D.

## 6.Antecedentes y estado del arte.

En los últimos años, en la asignatura de “medios continuos y resistencia de materiales”, se ha planteado a los alumnos un juego que consistía en fabricar una estructura con elementos que simulaban barras. El objetivo de esta actividad era que los alumnos pudieran estudiar de forma práctica y divertida los conceptos adquiridos en clase al observar los efectos de diferentes cargas en las estructuras que ellos mismos habían diseñado.

El problema es que esta actividad, en ciertos casos, implicaba una dedicación muy grande de tiempo y ponía en un compromiso a los alumnos. Con este proyecto se pretende dar la herramienta para que la construcción de la estructura no implique tanto tiempo, de manera que se pueda realizar sin comprometer a los alumnos.

## 7. Sistemas considerados.

### 7.1 Introducción.

A continuación mostramos los tres sistemas diferentes considerados. Cada uno utiliza diferentes tipos de barras y diferentes piezas para unirlos. En este apartado también se compararan los tres sistemas y se decidirá por uno.

Se han considerado tres sistemas diferentes que se les ha llamado de la siguiente manera: sistema tubo, sistema barra plana y sistema con bola. De aquí en adelante se les llamara con estos nombres.

### 7.2 Sistema tubo.

Este sistema consiste en barras cilíndricas que se unen entre ellas gracias a unas piezas que tienen varias salidas en forma de tubos. Las barras se introducen en estos tubos quedando fijas por presión.

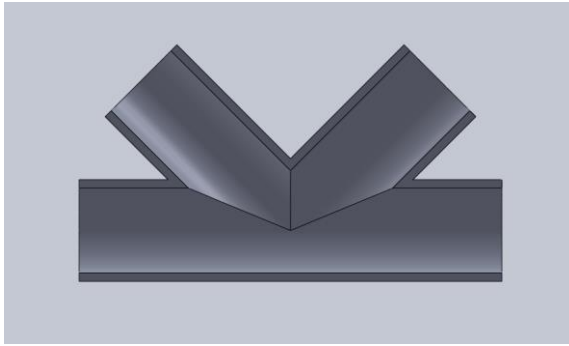
#### 7.2.1 Pieza de unión.

En las siguientes imágenes se puede observar la pieza de unión.

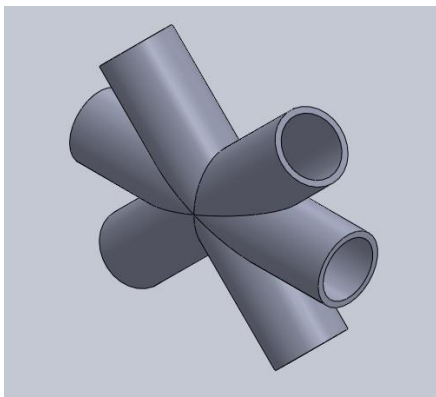


*Imagen 1 Pieza unión 4 entradas*

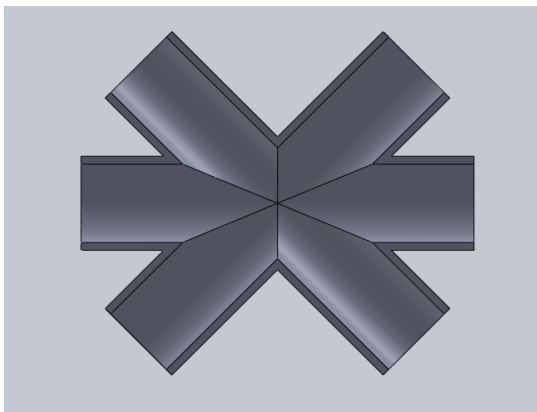




*Imagen 2 Pieza unión 4 entradas cortada*



*Imagen 3 Pieza unión 6 entradas*



*Imagen 4 Pieza unión 6 entradas cortada*

La primera pieza permite unir las barras cilíndricas con ángulos de  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  y/o  $180^\circ$ . Para la segunda permite los mismos ángulos además de  $225^\circ$  y  $315^\circ$ . Estas piezas nos permiten unir las diferentes barras formando diferentes ángulos de manera que podemos ir construyendo nuestra estructura. Este sistema es muy fácil e intuitivo pero el problema es que solo permite construcciones en un mismo plano, es decir, no permite estructuras en 3D.

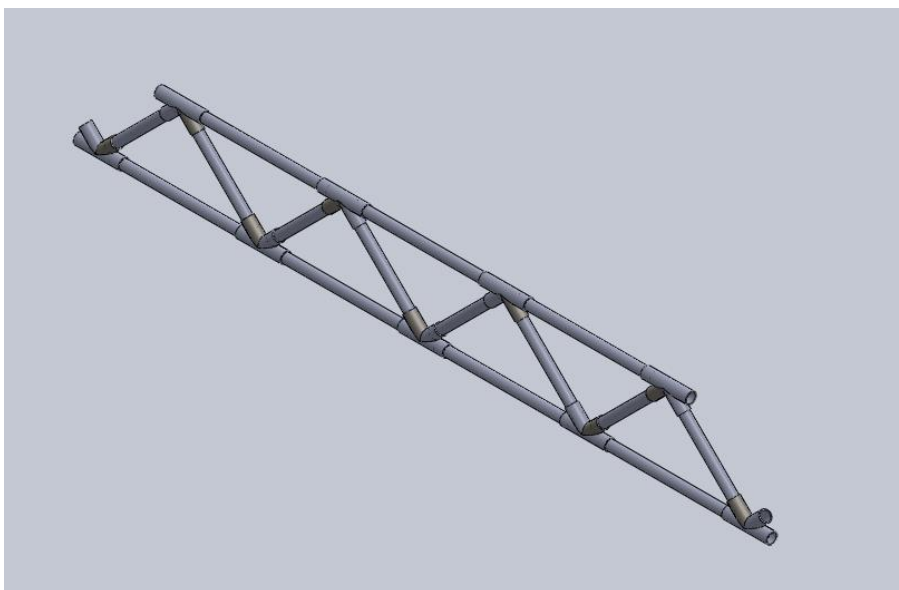
### 7.2.2 Barras.

Para el diseño de las barras debemos tener en cuenta los diferentes ángulos posibles. Se ha considerado que la mejor opción es dar la posibilidad de realizar triángulos isósceles rectángulos que se pueden unir entre ellos dando lugar a estructuras más complejas. El triángulo se ha diseñado para una base de 340mm y dos lados iguales de 240,41mm. Se han diseñado las barras pensando en que, una vez introducidas en la pieza unión, quedan a una distancia de 20mm del vértice, por lo tanto, las barras son 40mm más cortas que el lado del triángulo que forman. Por lo tanto tenemos dos barras diferentes de longitudes: 300mm y 200,41mm.

### 7.2.3 Estructuras de muestra

En la siguiente imagen se puede observar una estructura posible. Como se puede ver, mediante la unión de las barras con las piezas de unión podemos realizar esta estructura. Por supuesto se pueden realizar otras estructuras pero, igual que en este caso, todas estarán contenidas en un solo plano.

Se ha considerado poner una entrada extra en la pieza de unión, de manera que se pueda seguir la estructura en el plano normal al plano actual. Finalmente se descartó la idea porque solo permite el plano normal, en caso de realizar planos no normales, la actual la pieza unión quedaría muy deformada, y por lo tanto, difícilmente resistente.



*Imagen 5 Estructura muestra sistema con tubo*

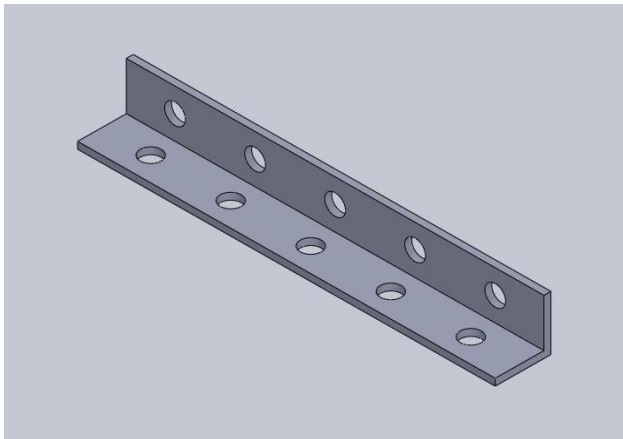
### 7.3 Sistema barra plana.

Este sistema consiste en barras planas agujereadas a diferentes distancias que se unen entre ellas mediante tornillos y tuercas o pasadores. Este sistema sí que permite estructuras en 3 dimensiones pero solo considera dos planos diferentes perpendiculares entre ellos.

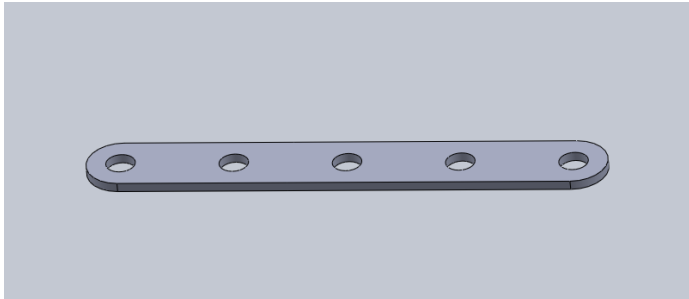
#### 7.3.1 Barras.

En este caso las barras son planas. Se han considerado dos tipos de barras, las que solo pertenecen a un plano y las que pertenecen a los dos planos perpendiculares. La gran ventaja de este sistema es que los ángulos entre las barras son libres, es decir, todos los ángulos son posibles, siempre y cuando estén contenidos en alguno de los dos planos posibles. Solo se han diseñado barras de 300mm aunque podría diseñarse para muchas otras longitudes, ya que, en este caso, no hace falta buscar las longitudes para hacer triángulos isósceles o equiláteros como en el caso anterior, pues los ángulos son libres.

En las siguientes imágenes podemos observar las dos barras diseñadas.



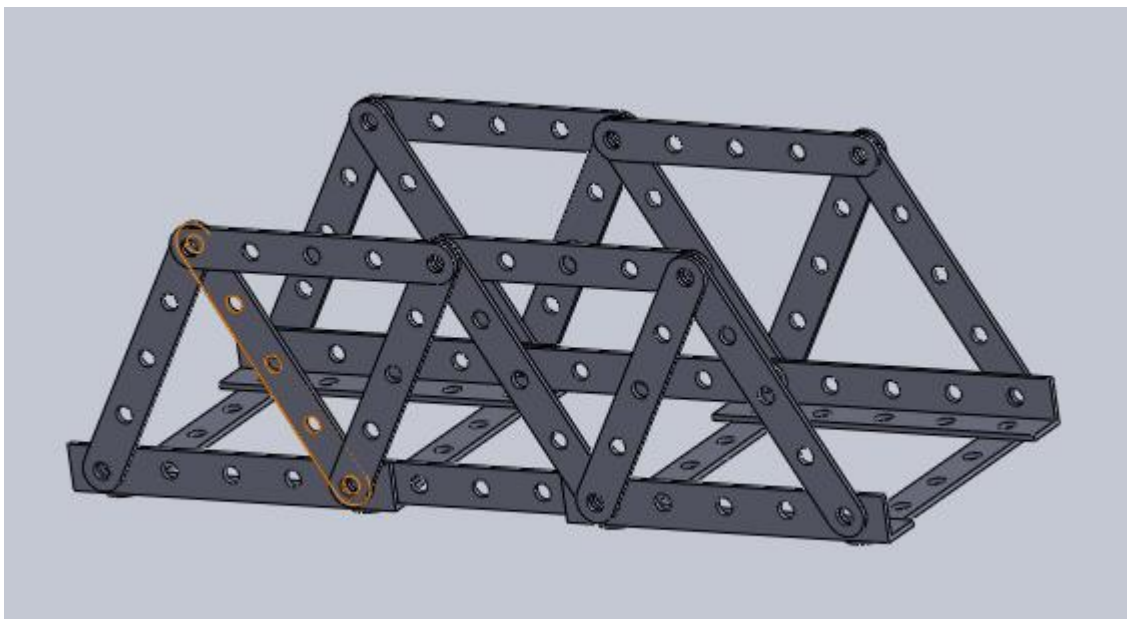
*Imagen 6 Barra plana de dos planos*



*Imagen 7 Barra plana*

### 7.3.2 Estructura de muestra.

En la siguiente imagen podemos observar una estructura de muestra realizada con este sistema. Como ya se ha comentado anteriormente la principal ventaja de este sistema es que los ángulos son libres pero como desventaja, este sistema, solo trabaja en dos planos perpendiculares.



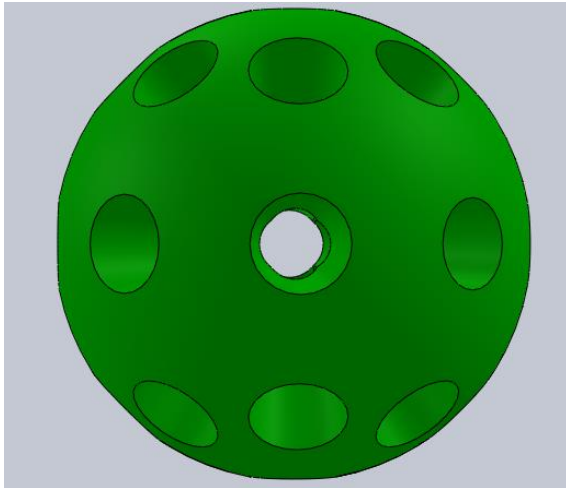
*Imagen 8 Estructura muestra sistema barra plana*

### 7.4 Sistema con bola.

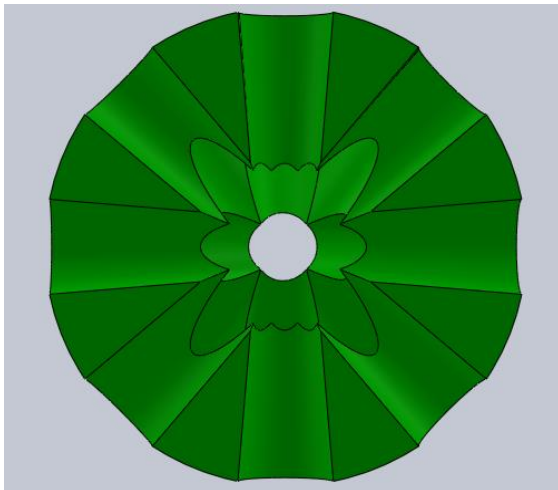
En este sistema utilizamos barras cilíndricas que se unen mediante una pieza esférica con huecos en diferentes direcciones. La principal ventaja de este sistema es que permite trabajar en 4 planos diferentes a diferencia del caso anterior que solo permite 2 o en el primer sistema que solo permite uno.

#### 7.4.1 Pieza unión.

Esta es la pieza más interesante de este sistema ya que con solo un elemento podemos unir hasta 26 barras diferentes en 4 planos distintos. Consiste en una esfera con 13 agujeros pasantes, es decir, que atraviesan la esfera entera, contenidos en 4 planos diferentes. Cada agujero forma  $45^\circ$  con el anterior por lo tanto, en este sistema, se realizaran triángulos equiláteros. En la siguiente imagen se puede observar esta pieza.



*Imagen 9 Pieza unión*



*Imagen 10 Pieza unión cortada*

#### 7.4.2 Barras.

Se han realizado 5 tamaños diferentes de barras proporcionales entre ellas con razón de raíz de 2. De esta manera, con dos barras de un determinado tamaño y una del tamaño siguiente se puede construir un triángulo isósceles rectángulo. Se han diseñado de esta manera porque la bola tiene agujeros cada  $45^\circ$  por lo tanto siempre acabamos realizando triángulos isósceles rectángulos.

#### 7.4.3 Estructura de muestra.

En la siguiente imagen se puede ver una estructura de muestra. Como ya se ha comentado la principal ventaja de este sistema son los diferentes planos en los que podemos trabajar, pero como desventaja las barras han de tener un tamaño muy específico.

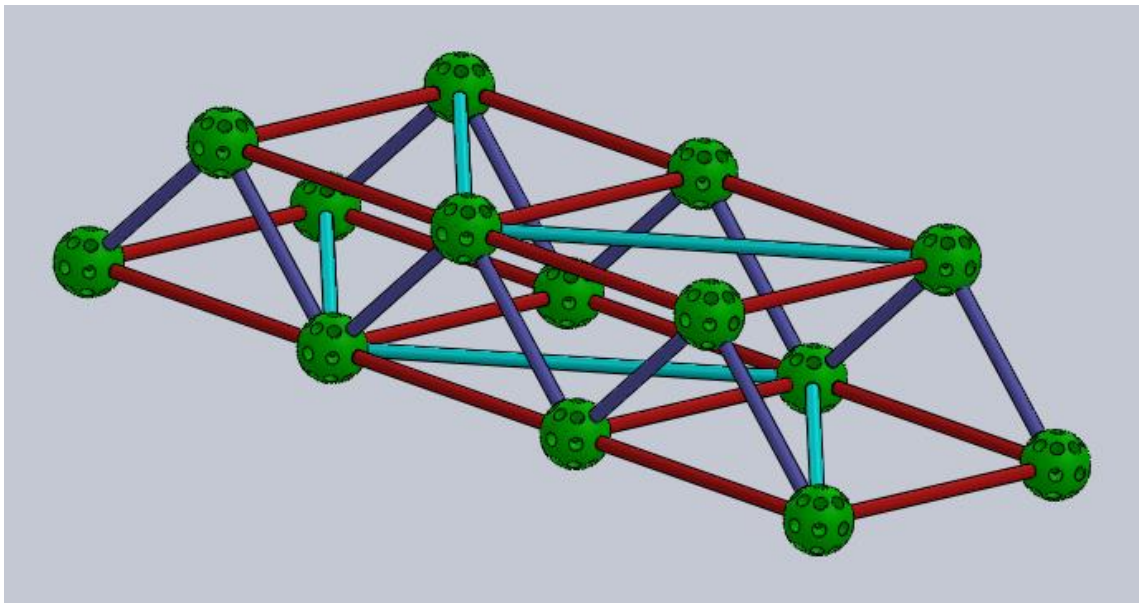


Imagen 11 Estructura muestra sistema con bola

## 7.5 Comparación y selección de los sistemas.

### 7.5.1 Sistema tubo.

En cuanto al sistema tubo podemos considerar como ventajas la simplicidad del modelo que facilita mucho el uso del mismo, no solo en cuanto a la construcción, sino también en cuanto a la simulación de la estructura.

Pero, como ya se ha comentado, la libertad de construcción de este sistema es muy limitada, ya que, solo permite construcciones en un mismo plano. Por esta razón este sistema no se considera adecuado, pues no cumple con el requisito de dar la posibilidad de estructuras en 3 dimensiones.

### 7.5.2 Sistema barra plana.

Este sistema tiene la gran ventaja de que los ángulos son libres en el plano de la barra, es decir, puedes introducir cualquier ángulo que desees siempre y cuando esté contenido en el plano de unión de las dos barras. Otra ventaja es que las barras no tienen por qué tener una longitud determinada, ya que, al tener ángulos libres se puede diseñar cualquier geometría. Otra ventaja es que la simulación también se puede considerar sencilla igual que en el caso anterior.

Como desventajas podemos decir que, aunque si se pueden realizar estructuras en 3D, los planos de construcción siempre serán perpendiculares entre ellos.

### 7.5.3 Sistema con bola.

Este sistema, a diferencia del anterior, sí que permite crear estructuras en 3 dimensiones con planos que no son perpendiculares entre ellos, aunque siempre estarán condicionados por los ángulos de la pieza unión, aun así, se puede considerar que este sistema tiene más libertad de acción. También debemos considerar que el uso de este sistema es muy intuitivo y, en mi opinión, más original y atractivo.

La desventaja de este sistema es que los ángulos están fijados por la pieza unión. También la simulación se vuelve un poco más compleja de realizar y las longitudes de las barras deben estar bien diseñadas para poder realizar las estructuras que se desean.

#### 7.5.4 Selección final.

El primer sistema queda descartado porque no permite estructuras 3D.

Entre el segundo y el tercero se ha optado por el tercero ya que permite planos no ortogonales y por lo tanto, se podría considerar que tiene más libertad de estructuras posibles aunque los ángulos estén fijados. También se ha considerado que es más atractivo aunque la implementación sea más compleja.

## 8. Sistema con bola.

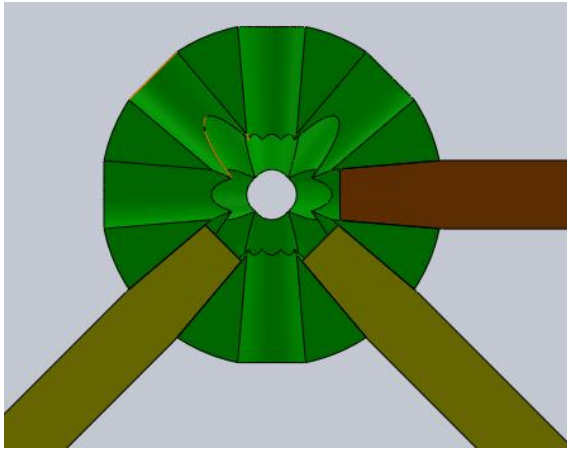
### 8.1 Pieza unión.

Esta pieza ya se ha mostrado en el apartado anterior pero ampliaremos la información y mostraremos las modificaciones que se han realizado para mejorarla. La función de esta pieza es unir las diferentes barras en un punto. Consiste en una esfera agujereada, es en estos agujeros donde se introducen las barras para que queden fijas.

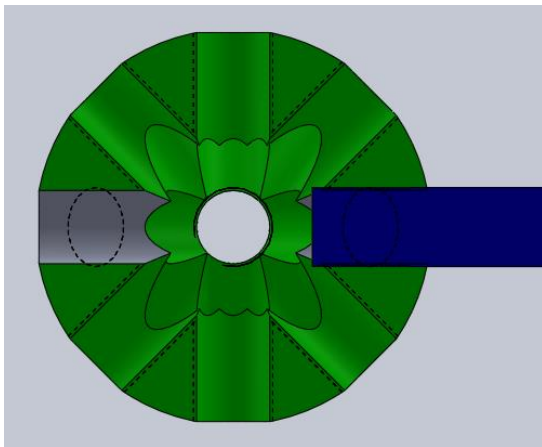
#### 8.1.1 Sistema fijación entre la pieza unión y las barras.

El sistema de fijación entre la pieza unión y la barra se ha ido modificando, al principio se consideró que se fijasen mediante presión. Para ello se diseñó el hueco y la barra con cierta inclinación para asegurar el contacto y por lo tanto la fijación. El problema era que este método de fijación no consideraba el caso en el que la barra estuviese sometida a tracción, por ello se cambió el sistema de fijación por presión a fijación por rosca. El sistema con rosca consiste en modificar los huecos de la pieza unión a agujeros roscados e introducir una rosca en las barras para poder enroscarlas en la pieza unión. En las siguientes imágenes podemos observar los dos sistemas.

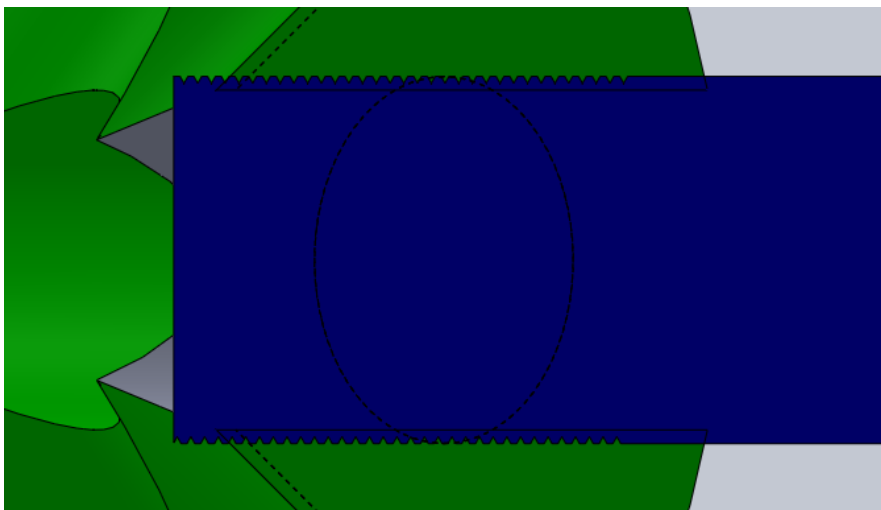




*Imagen 12 Fijación mediante presión*



*Imagen 13 Fijación mediante rosca*



*Imagen 14 Fijación mediante rosca detalle*

### 8.1.2 Diferentes piezas unión.

Para poder realizar el máximo número de estructuras se han diseñado dos tipos diferentes de piezas unión. Lo que diferencia una de la otra es la orientación de los agujeros. Los ángulos de estas piezas se han diseñado pensando en modelar triángulos rectángulos y triángulos equiláteros, ya que, mediante este sistema podemos obtener una gran variedad de estructuras.

La primera pieza tiene los agujeros formando ángulos de  $45^\circ$  entre ellos. Tenemos 26 entradas contenidas en 4 planos diferentes. En cada plano hay 8 entradas diferentes, pero se debe tener en cuenta que hay dos entradas que están contenidas en todos los planos, por lo tanto, hay  $8 \times 4 - 2 \times 4 + 2$ , es decir, 26. Todos los planos tienen una recta en común que, a la vez, es un diagonal de la esfera. Los planos forman ángulos de  $45^\circ$  entre ellos, de igual manera, los agujeros están orientados formando ángulos de  $45^\circ$ . De esta forma podemos realizar triángulos rectángulos en todos los planos.

La segunda pieza está pensada para realizar triángulos equiláteros, es decir, las salidas están orientadas con ángulos de  $60^\circ$ . Pero no está limitada a triángulos equiláteros sino que también se pueden realizar triángulos rectángulos o, lo que también es interesante, realizar un triángulo equilátero por un plano y por otro realizar un triángulo rectángulo. Para ellos se han realizado las salidas por un lado de la pieza a  $60^\circ$  y por el otro lado a  $45^\circ$ . Para ello se han dispuesto los agujeros en 6 planos diferentes.

En las siguientes imágenes podemos observar cómo, mediante la pieza unión con salidas a  $45^\circ$  podemos realizar triángulos rectángulos y mediante la pieza unión con salidas a  $60^\circ$ , triángulos equiláteros.

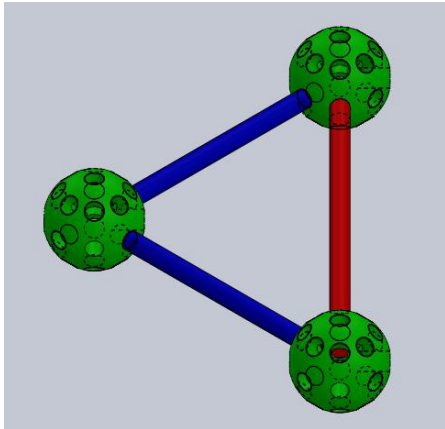


Imagen 15 Estructura básica triángulo rectángulo

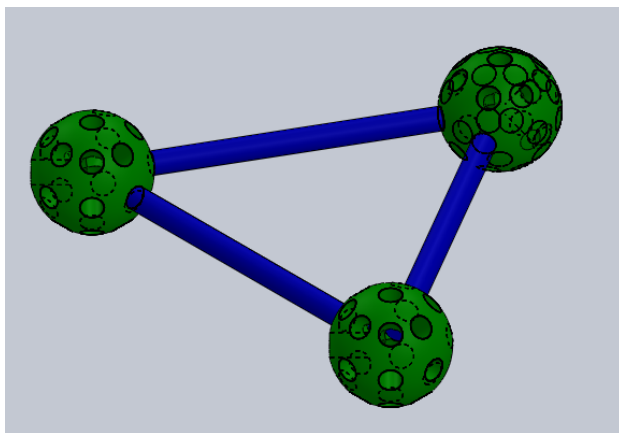


Imagen 16 Estructura básica triángulo equilátero

Para más información, consultar los planos de ambas piezas.

## 8.2 Diferentes tipos de barras.

Como ya se ha comentado, la geometría básica para la formación de las diferentes estructuras es el triángulo. Se han diseñado 5 barras de diferentes tamaños que dan la posibilidad de realizar 4 triángulos equiláteros. Para ello, estas barras son proporcionales con razón de raíz de dos. De sección todas tienen un diámetro de 20mm.

La longitud de los lados de los triángulos que se pueden hacer son los siguientes:

$$170 \text{ mm}$$

$$170 \cdot \sqrt{2} = 240,42 \text{ mm}$$

340 mm

$$340 \cdot \sqrt{2} = 480,83 \text{ mm}$$

680 mm

Las longitudes de las barras son un poco más cortas, ya que, la distancia que queda entre el final de la barra y el centro de la pieza unión también forma parte del triángulo. En concreto esta distancia es siempre de 20mm por lo tanto las barras son 40mm más cortas que los lados de los triángulos que forman. En concreto:

$$170 - 40 = 130 \text{ mm.}$$

$$170 \cdot \sqrt{2} - 40 \approx 200 \text{ mm.}$$

$$170 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{2} - 40 = 300 \text{ mm.}$$

$$170 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{2} - 40 \approx 441 \text{ mm.}$$

$$170 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{2} - 40 = 640 \text{ mm.}$$

## 8.3 Articulaciones.

### 8.3.1 Introducción.

El sistema inicial no consideraba articulaciones entre las barras ya que el sistema de unión es fijo. Se propuso realizar una nueva forma para permitir la articulación entre la pieza unión y las barras y entre las barras. Para ello se diseñó dos piezas nuevas que dan la opción de articular las barras. Este sistema de articulación se compone de dos piezas, una de ellas se une a la pieza unión, explicada en el punto 8.1.2, y la otra se une a la primera y a la barra. De esta manera se articula la barra con la pieza unión. También existe la posibilidad de unir dos de las segundas piezas y estas a dos barras diferentes, de manera que las dos barras quedan articuladas entre ellas.

Estas dos piezas las llamaremos como interior (la que se une a la pieza unión) y como exterior (la que se une a la barra). Seguidamente se explicaran estas dos piezas y sus posibilidades.

### 8.3.2 Cono interior.

Esta pieza consiste en un cilindro unido a un cono cortado por el vértice. La parte del cilindro esta roscada, ya que, será esta parte la que se enrosca a la pieza unión. Al final de la parte cónica, en la parte cortada, hay un saliente por donde se unirá al cono exterior mediante un pasador. En la siguiente imagen podemos observar esta pieza. Para más información, consultar los planos.

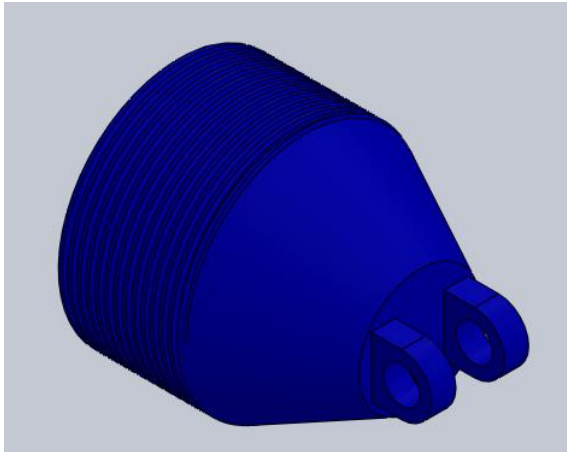


Imagen 17 Cono interior

### 8.3.3 Cono exterior.

Esta pieza también consiste en un cilindro unido a un cono cortado por el vértice, pero en este caso el cilindro es hueco y es este hueco el que esta roscado para que la barra pueda enroscarse a este. También tiene un saliente en la parte cortada para unirse con el cono interior. Ver planos para más información.

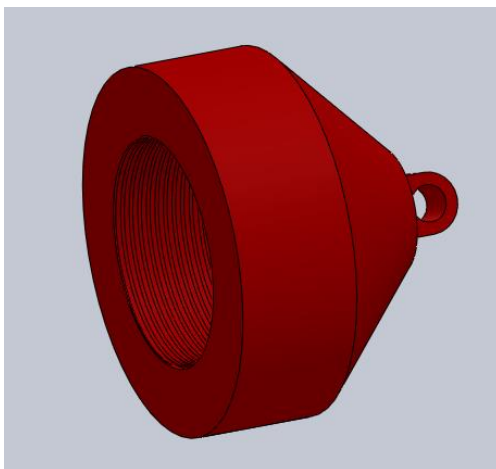
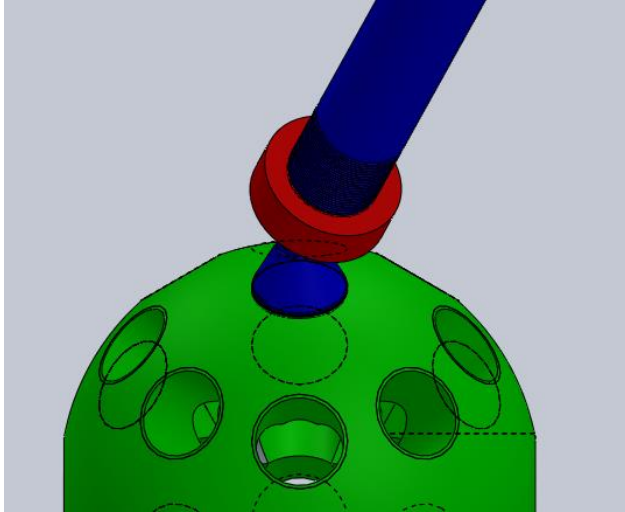


Imagen 18 Cono exterior

### 8.3.4 Unión como exterior, como interior y pieza unión.

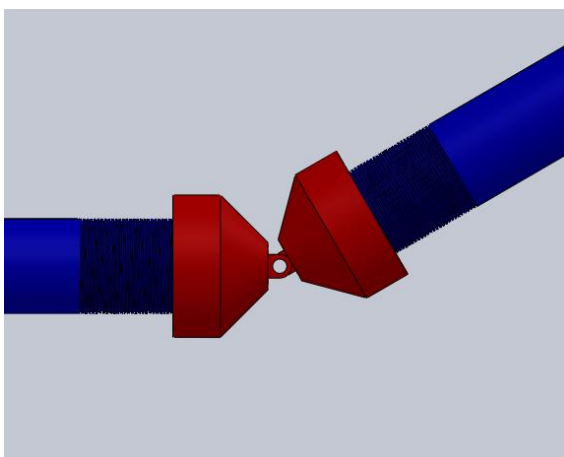
En la siguiente imagen podemos ver las tres piezas unidas entre ellas. Como ya se ha comentado, el objetivo es articular la barra. Mediante este sistema conseguimos este objetivo sin tener que modificar todo el sistema. Por ello lo podemos considerar como un extra al sistema desarrollado.



*Imagen 19 Unión como interior, como exterior y pieza unión*

### 8.3.5 Articulación entre barras.

Como ya se ha comentado en la introducción de este apartado, también existe la posibilidad de articular dos barras mediante dos conos exteriores. De esta manera podemos realizar una rotula entre dos barras. En la siguiente imagen podemos ver este sistema.



*Imagen 20 Articulación entre barras*

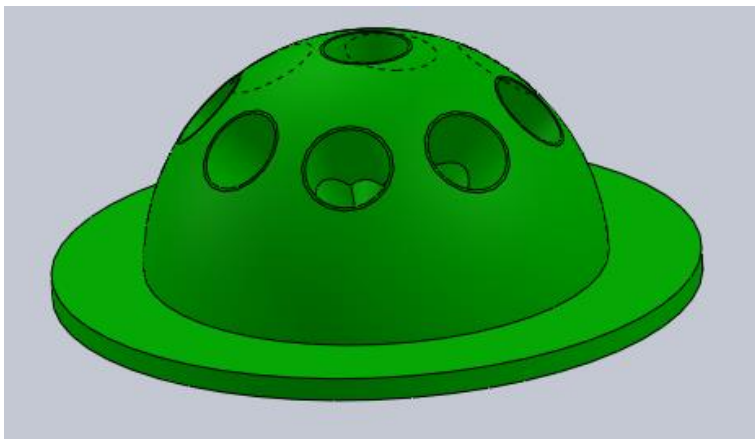
## 8.4 Apoyos.

### 8.4.1 Introducción.

Se han considerado los posibles apoyos entre la estructura y el suelo. El objetivo es simular los diferentes apoyos reales que se realizan en las estructuras en nuestro sistema de piezas modulares. Para ello se han realizado pequeñas modificaciones en la pieza unión, se han modulado algunas piezas nuevas y se han utilizado las ya existentes para realizar estos apoyos.

### 8.4.2 Apoyo empotrado.

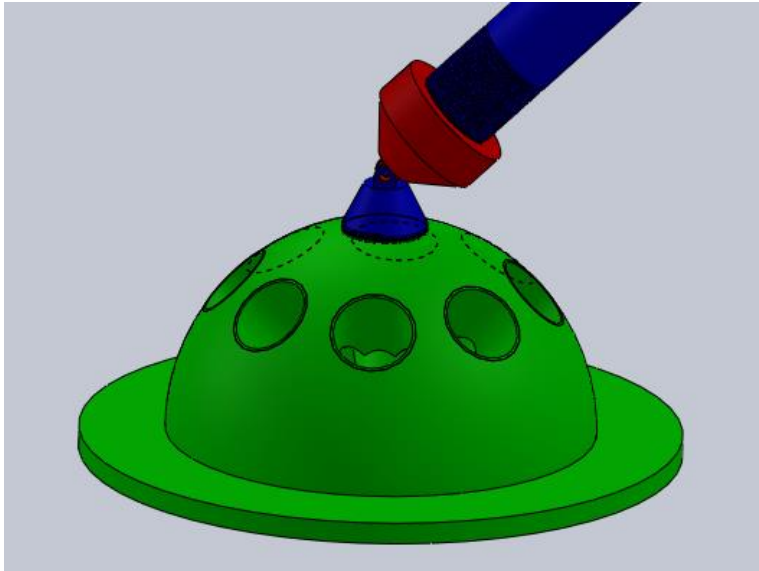
Este apoyo es el más fácil de realizar pues solo consiste en cortar una de las esferas por la mitad. De esta manera el apoyo realizará fuerza en todas las direcciones y también podrá realizar momento. En la siguiente imagen podemos observar esta pieza.



*Imagen 21 Apoyo empotrado*

### 8.4.3 Apoyo fijo.

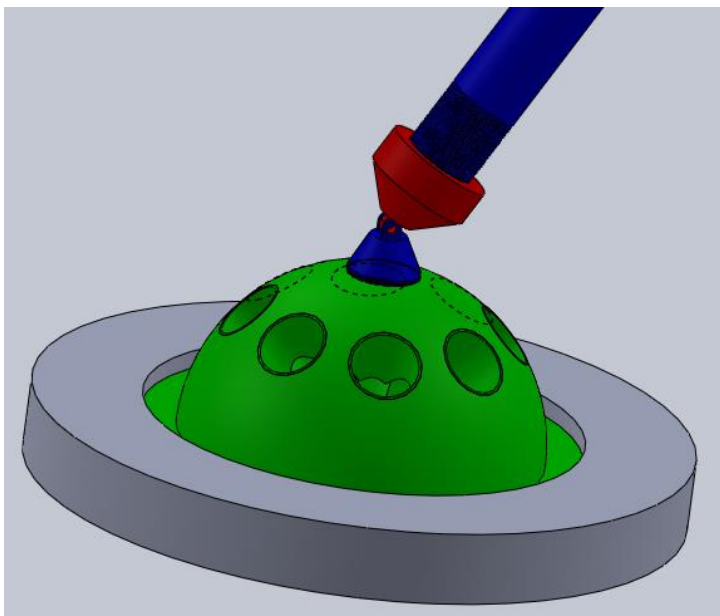
Este apoyo consiste en unir la pieza que hemos utilizado para simular el apoyo anterior con el conjunto de cono exterior y cono interior. De esta manera el conjunto no puede realizar momento pero sí fuerza en cualquier dirección. En la imagen podemos observar el conjunto de las tres piezas unidas a una barra.



*Imagen 22 Apoyo fijo*

#### 8.4.4 Apoyo móvil.

Este apoyo consiste modificar el conjunto anterior de manera que solo pueda realizar fuerza en la dirección vertical. Para ello se le introduce unos rodamientos entre el suelo y la media esfera. Para ellos se ha diseñado una caja que une los rodamientos con la semiesfera. En la imagen podemos observar el sistema implementado.

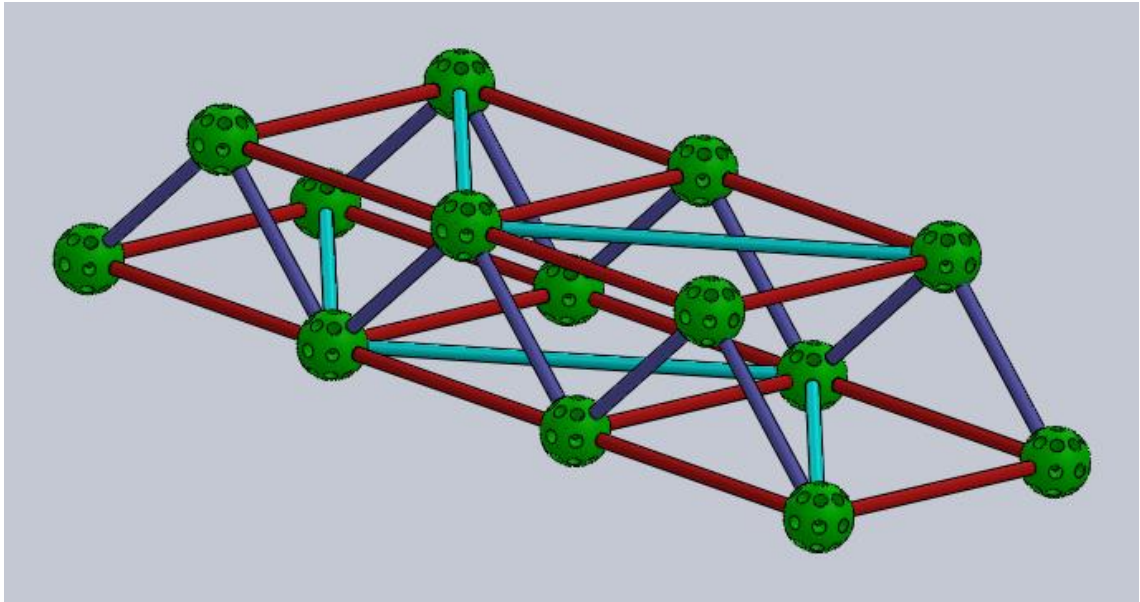


*Imagen 23 Apoyo móvil*

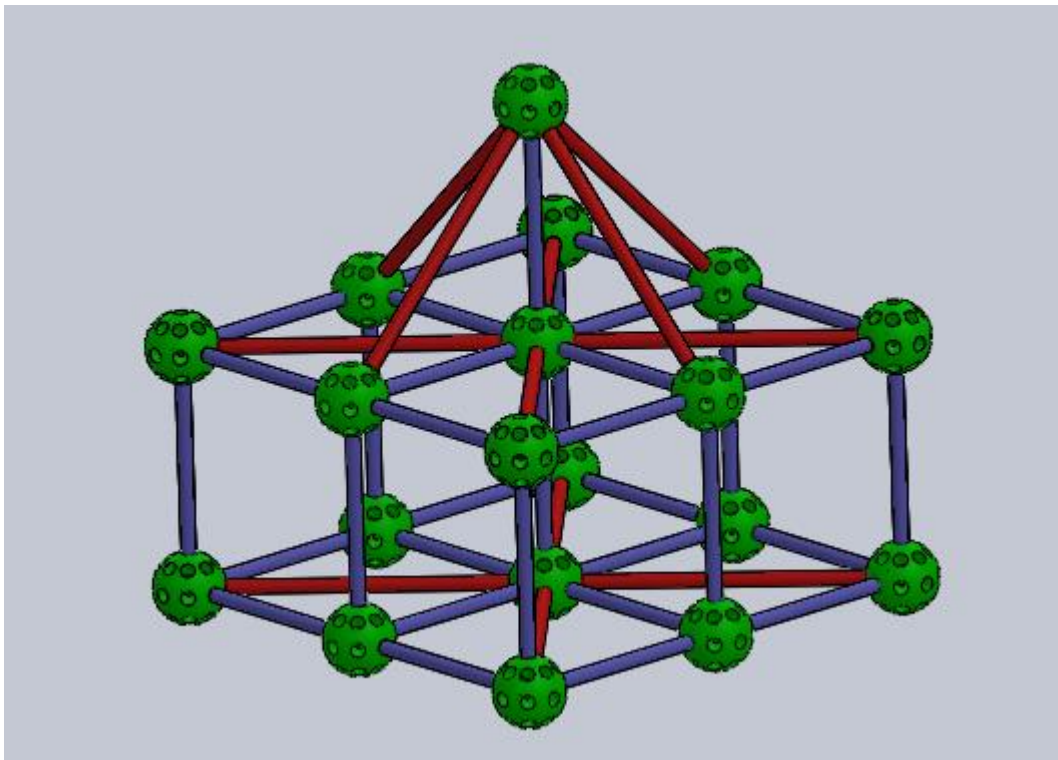


## 8.5 Estructuras de muestra.

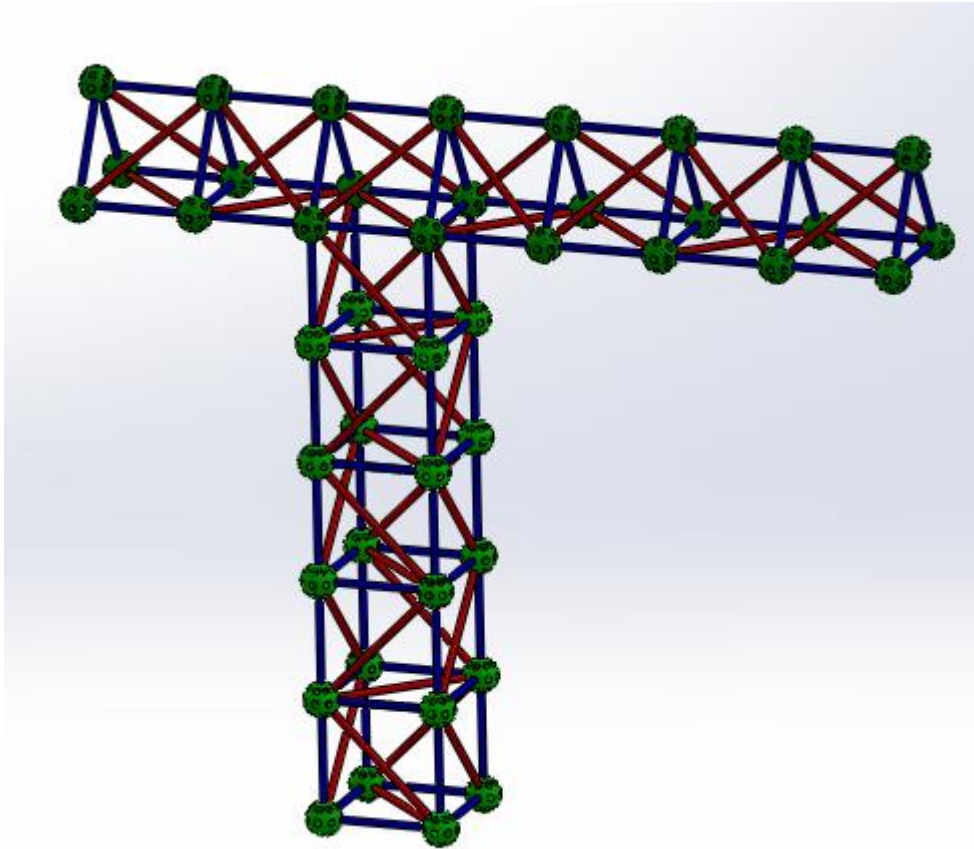
A continuación se muestran algunas de las estructuras modeladas para comprobar la geometría y la variedad de posibilidades que tenemos con nuestro sistema de piezas.



*Imagen 24 Estructura muestra 1*



*Imagen 25 Estructura muestra 2*



*Imagen 26 Estructura muestra 3*

## 9. Material.

Para este apartado debemos recordar que la idea es construir este sistema modurable mediante una impresora 3D. Este tipo de impresoras, por lo general, utilizan diferentes tipos de polímeros. Para realizar el modelo van imprimiendo capas, una sobre la otra, con el polímero introducido. De esta manera conseguimos imprimir en 3D la pieza modelada por ordenador.

En el mercado actualmente encontramos varios materiales diferentes. Principalmente tenemos: ABS, PLA, PET, TPE (conocido como ninjaflex). A continuación se muestran las principales características de cada material.

-ABS: es un material de gran tenacidad, muy resistente, de gran dureza y rígido. Tiene una mala resistencia a los rayos UV.

-PLA: es un material biodegradable pero las características físicas no son tan buenas como las del ABS. Además tiene una menor resistencia a las altas temperaturas, aunque suficiente para nuestro uso (110°C).

-PET: este material tiene una gran capacidad de cristalización dando lugar a un material transparente. Además tiene una gran resistencia al impacto. Este material es muy utilizado para realizar botellas, pero para nuestro uso no sirve ya que buscamos que el material tenga un módulo de Young alto y alta tenacidad.

-TPE: la característica principal de este material es su alta elasticidad. Esta característica es interesante para nuestro producto siempre y cuando venga acompañado de un módulo de Young alto, característica que no tiene este material.

Como hemos visto, hay muchos polímeros diferentes que se pueden utilizar en las impresoras 3D. Cada material tiene diferentes características pero para nuestro caso hemos visto que el mejor material que podemos utilizar es el ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno), ya que, presenta las características que buscamos.

Como ya hemos comentado, este polímero presenta una gran tenacidad además de ser duro y rígido. Otra característica que resulta muy interesante es que se puede taladrar, de esta manera podemos fabricar los agujeros de las piezas unión mediante taladro roscado. Estas características hacen que sea muy utilizado para realizar modelos de ingeniería. También se utiliza para otros juegos de construcción como LEGO y similares. En la siguiente tabla se pueden observar sus características.

Alargamiento a la Rotura ( % )	45
Coefficiente de Fricción	0,5
Módulo de Tracción ( GPa )	2,1-2,4
Resistencia a la Tracción ( MPa )	41-45

Resistencia al Impacto Izod ( J m-1 )	200-400
Absorción de Agua - en 24 horas ( % )	0.3-0.7
Densidad ( g/cm <sup>3</sup> )	1,05
Resistencia a la Radiación	Aceptable
Resistencia a los Ultra-violetas	Mala

*Tabla 1 Características material ABS*

## 10. Simulación.

### 10.1 Introducción

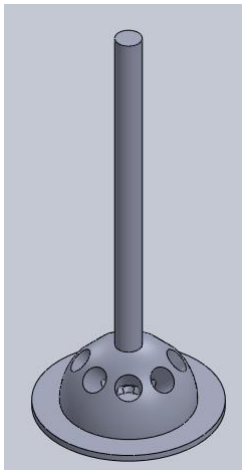
En este apartado mostraremos como realizar la simulación de la estructura para poder observar cuales son los efectos de las cargas sobre esta. Para simplificar el uso de esta herramienta las simulaciones se harán con los mismos componentes modelados pero sin las roscas. Este pequeño cambio no tiene efectos en cuanto a la fiabilidad de la simulación, ya que geoméricamente, los componentes son idénticos. En cambio, simplifica mucho el método para realizarla y, además, no exige tanto trabajo para el ordenador de manera que es más eficiente.

Para realizar la simulación en solidworks tendremos que fijar los apoyos, las conexiones entre las diferentes piezas, las cargas y el material.

## 10.2 Ejemplo simulación.

Para mostrar la simulación se ha escogido un ejemplo muy simple para ver paso a paso como realizarla. La estructura escogida es una barra empotrada sometida a una fuerza de tracción en el extremo opuesto a la sujeción.

Para modelar la estructura se han utilizado dos de nuestras piezas. La primera es una barra de longitud 300mm y una semiesfera que hará de apoyo empotrado. Para realizar esta estructura no es necesario utilizar la semiesfera pues podríamos definir el final de la barra como el apoyo, pero es interesante utilizar ambas piezas para ver el comportamiento del sistema de piezas modelado, además nos ayudará a aprender a realizar estudios para estructuras más complejas. En la siguiente imagen podemos ver la estructura que utilizaremos.



*Imagen 27 Estructura simple simulación*

Después de activar la simulación de Solidworks y empezar un nuevo estudio estático, definiremos la cara inferior de la pieza “empotrado” como “geometría fija”. También se pueden utilizar otros tipos de sujeción pero para este caso trabajaremos con empotrado. En la siguiente imagen podemos observar cómo definir esta cara como empotrada.

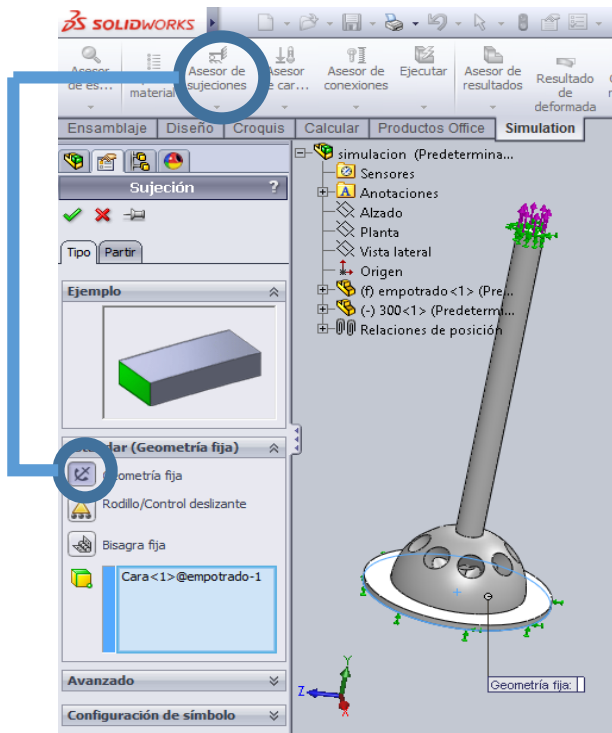


Imagen 28 Como definir sujeciones

Seguidamente definiremos la unión entre las dos piezas. Este proceso lo haremos mediante el asesor de conexiones. Definiremos la conexión como unión rígida, de esta manera definimos las dos piezas como perfectamente unidas. Para realizarlo, entraremos en la selección de asesor de conexiones y seleccionaremos “contacto entre componentes”, seguidamente seleccionaremos las dos piezas y le daremos al tic. En la imagen podemos ver el proceso.

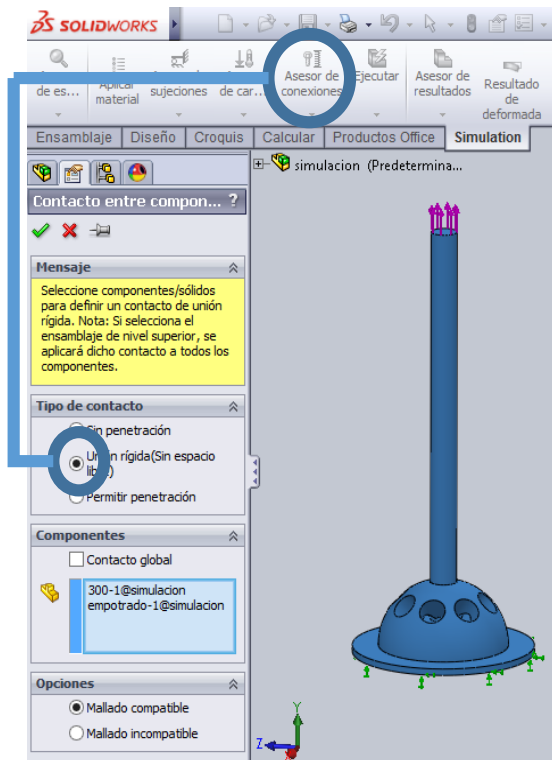


Imagen 29 Como definir uniones entre piezas

El siguiente paso será definir la carga a la que queremos someter nuestra estructura. Para ello abriremos el apartado de “asesor de cargas” y seleccionaremos “fuerza”. Seguidamente debemos seleccionar la cara o el punto donde queremos aplicar la fuerza, en este caso seleccionaremos la cara superior de la barra. Para definir la dirección podemos indicar como normal a la cara. También se puede aplicar otros tipos de cargas y en otras direcciones, pero en este caso queríamos someter la estructura a un esfuerzo de tracción. En la imagen podemos ver cómo definir esta carga.

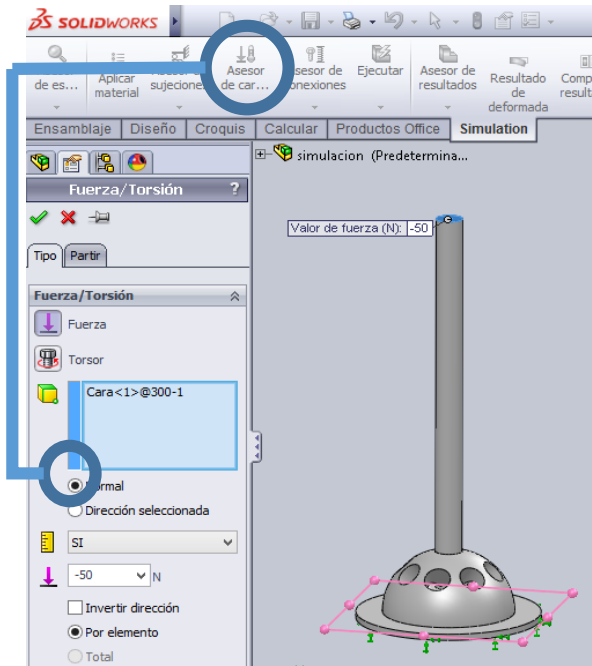


Imagen 30 Como definir cargas

Por último nos queda definir el material, como se ha indicado en el apartado 9 el material seleccionado es el plástico ABS. Podríamos definir el material indicando sus propiedades pero el programa ya tiene en su base de datos este material, así que, solo tendremos que entrar en el apartado “aplicar material” y buscarlo en las diferentes opciones que te da el programa.

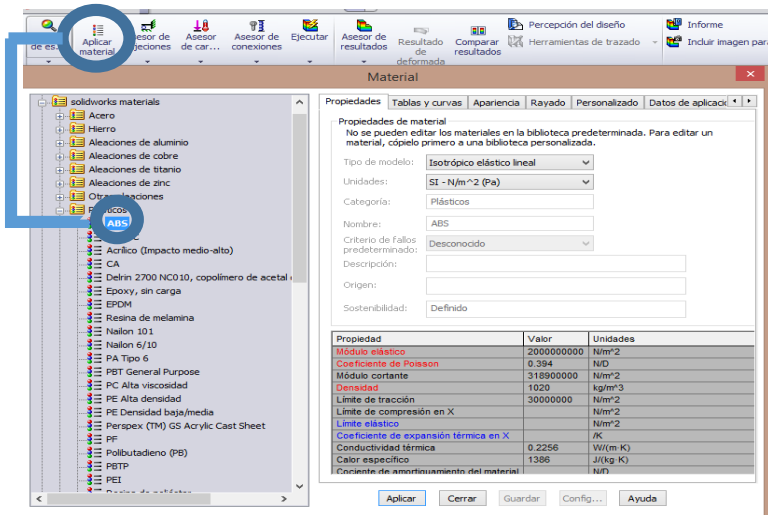


Imagen 31 Como definir material



Por último le daremos a ejecutar para que el programa empiece la simulación. Si queremos que vaya más rápido podemos primero definir la malla y optar por una malla gruesa aunque perderemos fiabilidad.

Una vez finalizada la simulación obtendremos los resultados mediante un gráfico de colores en la estructura. Generalmente, el programa nos dará por defecto el gráfico de tensiones pero, si deseamos ver el de deformaciones podemos cambiar de gráfico en el cuadro inferior izquierdo de la pantalla. También podemos pedir al programa que nos muestre el resultado en un punto en concreto, para ello habrá que ir a “herramientas de trazado” y seleccionar “identificar valores”. En la siguiente imagen podemos observar el resultado de la simulación y se destacan el cuadro inferior para cambiar de gráfico y el cuadro de “herramientas de trazado”

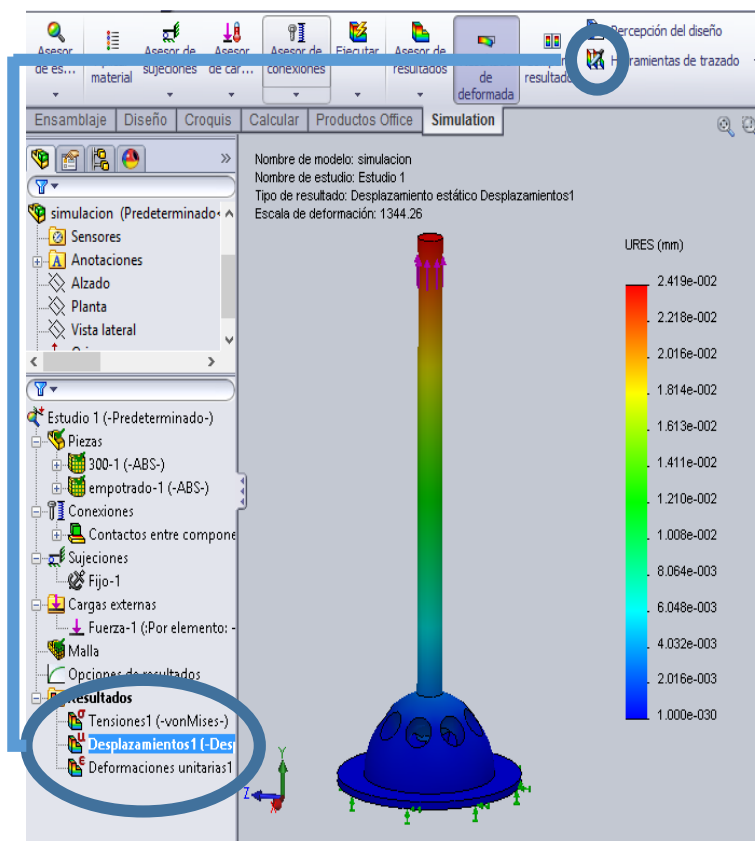


Imagen 32 Resultado simulación

## 11. Resumen presupuesto.

En la siguiente tabla se pueden observar los precios de fabricar cada pieza:

PIEZA	PRECIO [€]
Barra 130mm	0.88
Barra 200mm	1.34
Barra 300mm	2,02
Barra 441mm	2,97
Barra 640mm	4,32
Pieza unión 45°	5,96
Pieza unión 45°, 60°	6,40
Cono interior	0,11
Cono exterior	0,16
Semiesfera apoyos	7,27
Caja apoyo móvil	4,84

Estos precios por pieza son relativamente elevados, especialmente si pensamos en fabricar una estructura con muchas piezas. Esto es debido, principalmente a que el coste del filamento del material para impresoras 3D es muy elevado, si se quisiera reducir el coste de producción podríamos cambiar el método de fabricación. Se podría utilizar el método por inyección, este método de fabricación reduce mucho el coste pero solo para producciones a gran escala, a pequeña escala seguirá siendo más económico utilizar la impresora 3D.

En cuanto a este proyecto, se ha valorado en 1500€.

## 12. Estudio medioambiental y riesgos laborales.

El proceso de fabricación mediante impresora 3D es más ecológico que la fabricación por inyección para modelos a pequeña escala. Puesto que nuestra idea es realizar esta herramienta a pequeña escala (no más de 1000 piezas) se puede considerar que es más ecológico la fabricación por impresora 3D.

Se ha intentado buscar cual es exactamente el consumo de una impresora 3D pero depende de cada caso, por ello se ha consultado estudios de piezas similares para ver cuáles son las ventajas de utilizar este innovador sistema de fabricación. En el siguiente gráfico se muestran los resultados obtenidos por un estudio medioambiental sobre impresión 3D (*The environmental impact of 3D printing*) desarrollado por Cuboyo.

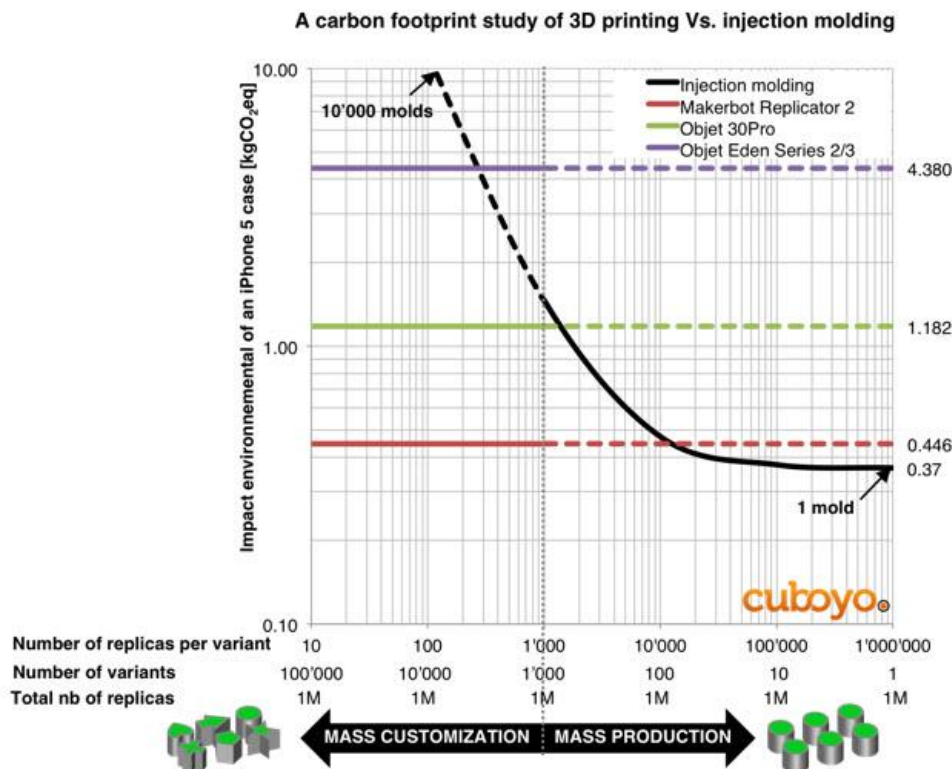


Imagen 33 Estudio impacto ambiental.

Como se puede observar para una escala de producción pequeña es más eficaz utilizar impresoras 3D, de todas maneras este gráfico es orientativo, ya que, no

es un estudio de nuestro caso sino un estudio para realizar una pieza similar con un material similar.

Otra ventaja que podemos considerar de las impresoras 3D para nuestro caso, es que, en caso de tener algún error en el diseño de alguna pieza podemos rectificarla y solo tener una pieza defectuosa.

En cuanto a los riesgos laborales, en nuestro caso, que se trata de imprimir estas piezas a pequeña escala, los riesgos son casi nulos, ya que, al utilizar este proceso no debemos maniobrar ningún tipo de maquinaria como taladro o similares.

## 13. Planificación y programación de fases siguientes.

Las fases siguientes serian:

- Diseñar mediante el programa una estructura. Se podría utilizar una de las ya diseñadas como las del punto 8.5
- Realizar una simulación de la estructura diseñada.
- Construcción del “sistema bola” implementado mediante una impresora 3D.
- La comprobación de la geometría. Aunque mediante el programa de modelización ya se ha comprobado, sería bueno, una vez fabricado el producto, comprobar que todas las piezas encajan.
- Montar la estructura simulada y someterla a unas cargas.
- Comparar los resultados de la simulación con el resultado obtenido.

Para facilitar la programación, en la siguiente tabla podemos ver la codificación de las tareas.

Nombre de la tarea	Código tarea	Precedencias
Diseñar estructura	1	-
Realizar simulación	2	1
Construcción sistema bola	3	-
Comprobación geometría	4	3
Montaje	5	4
Comparar	6	5,2

Tabla 2 Codificación tareas siguientes

En la siguiente tabla podemos observar la programación temporal de las fases siguientes.

Código tarea	Programación temporal
1	Semana 1
2	Semana 2
3	Semana 1
4	Semana 2
5	Semana 3
6	Semana 4

Tabla 3 Programación temporal

A continuación se muestra una propuesta de calendario. Consiste en empezar la última semana de junio, de manera que a final de julio se hayan realizado todas las fases siguientes.

nombre tarea	Programación temporal
Diseñar estructura	29/06/15 a 03/07/15 (semana 1)
Realizar simulación	06/07/15 a 10/07/15 (semana 2)
Construcción sistema bola	29/06/15 a 03/07/15 (semana 1)
Comprobación geometría	06/07/15 a 10/07/15 (semana 2)
Montaje	13/07/15 a 17/07/15 (semana 3)
Comparar	20/07/15 a 24/07/15 (semana 4)

Tabla 4 Programación en fechas

## 14. Conclusiones.

En este proyecto se ha realizado una herramienta para facilitar la construcción de estructuras para la comprensión de conceptos sobre estas.

Como se ha explicado en este documento, esta herramienta ha ido variando mucho durante el proceso, de hecho, la propuesta inicial y final son completamente diferentes. Estos cambios se han realizado porque se han ido

planteando nuevos problemas y nuevos retos que han provocado un rediseño en muchas piezas. Pero, gracias a estos cambios, se ha conseguido realizar una herramienta que nos da la posibilidad de realizar una gran variedad de estructuras. De hecho, el límite de estructuras a realizar está en nuestra imaginación, con esta herramienta, podríamos realizar desde una réplica de la Torre Eiffel hasta la figura de un animal, pasando por infinidad de puentes y otras estructuras que vemos cada día.

Hay que reconocer algunas desventajas, como por ejemplo, si se desea realizar una estructura un poco compleja y con muchas piezas el proceso para realizar la simulación es largo y costoso. Otra desventaja es que el precio de imprimir las piezas mediante impresora 3D no es barato, aunque, si se pudiese realizar a gran escala, el precio de las piezas se reduciría mucho. A pesar de ello, es una herramienta útil, ya que, proporciona la posibilidad de realizar infinidad de estructuras que pueden ayudar a los alumnos a entenderlas mejor.

Finalmente, me gustaría comentar que he disfrutado realizando este proyecto, ya que, se podría decir, que es un juego de construcción y diseñarlo ha sido una experiencia muy agradable. También me encantaría ver que esta herramienta sirve para que otros estudiantes comprendan mejor o disfruten más con la asignatura.

## 15. Bibliografía.

Cuvoyo. *The enviromental impact of 3D printing* [en línea]. 2013. [Consulta: 20/05/2015]. Disponible en: <<http://www.cuboyo.com/environmental>>

Jer Faludi. *Environmental Impacts of 3D Printing* [en línea]. 2013. [Consulta: 20/05/2015]. Disponible en: <<http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/blog/environmental-impacts-3d-printing>>

Wikipedia. *Acrilonitrilo butadieno estireno* [en línea]. 2015. [Consulta: 15/05/2015]. Disponible en: <[http://es.wikipedia.org/wiki/Acrilonitrilo\\_butadieno\\_estireno](http://es.wikipedia.org/wiki/Acrilonitrilo_butadieno_estireno)>