



## Trabajo Fin de Grado

Título del trabajo:

Análisis, Cálculo y Modelado de una pala cargadora frontal.

## MEMORIA

Autor/es

Alberto Gómez Rubio

Director/es

Paula Canalís Martínez

Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza

2016 – 2017



## RESUMEN

El presente trabajo fin de grado aborda el cálculo, análisis y modelado de una pala cargadora frontal tomando como referencia el modelo comercial 603R de la marca John Deere. Este tipo de maquinaria es empleada en la empresa Ronal Ibérica S.A.U. donde realicé en la actualidad las prácticas correspondientes a mi carrera profesional y también he desarrollado parte del presente trabajo fin de grados gracias a la ayuda proporcionada por la empresa en cuestión.

El proyecto está estructurado en dos partes correlacionales:

En primer lugar, partiendo del mencionado modelo comercial se calcularán y analizarán las reacciones de los elementos que componen la pala, las fuerzas que deben realizar los cilindros hidráulicos y el dimensionamiento de éstos, los diámetros de los pasadores y las anchuras de las orejetas. Con los valores geométricos de la pala, conocidos a través de la ficha técnica, se realizarán los cálculos analíticos. Gracias al software EES se han podido solucionar de forma rápida todas las ecuaciones implicadas en los cálculos analíticos.

Por otra parte, haciendo uso del software de diseño mecánico “SolidWorks 2016”, se modelizarán los componentes principales de la pala cargadora para comprobar y comparar los cálculos analíticos y los obtenidos en dicho software a través de los criterios de tensión, coeficientes de seguridad y desplazamientos requeridos. La modelización en SolidWorks permite conocer de una forma muy visual y esquemática el funcionamiento de la pala, sus restricciones de movimiento y la forma en que se transmiten las fuerzas de unos elementos a otros.



**DECLARACIÓN DE  
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD**

Este documento debe acompañar el Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su revisión.

D./Dz. ALBERTO GÓMEZ RUBIO

con nº de DNI 18455856-N en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)  
GRADO, {Título del Trabajo}

ANÁLISIS, CÁLCULO Y MODELADO DE UNA PALA CARGADORA FRONTAL

---

---

---

---

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 24/11/2017

Fdo: ALBERTO GÓMEZ RUBIO



## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	5
1.1	TEMA OBJETO DEL PROYECTO .....	5
1.2	MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN .....	6
1.3	CONOCIMIENTOS APLICADOS .....	7
1.4	NECESIDAD .....	8
2.	PALA CARGADORA FRONTAL.....	9
2.1	DEFINICIÓN .....	9
2.2	ANTECEDENTES Y EVOLUCIÓN .....	9
2.3	TIPOLOGÍA PALA CARGADORA FRONTAL.....	10
2.4	TIPOLOGÍA CAZOS O HERRAMIENTAS .....	13
3.	CÁLCULOS ANALÍTICOS.....	16
4.	SISTEMA HIDRÁULICO.....	18
5.	SIMULACIÓN SOLIDWORKS.....	19
6.	CONCLUSIONES.....	20
6.1	CONCLUSIONES DEL PROYECTO .....	20
6.2	APORTE AL AUTOR.....	20
7.	ANEXO I. CÁLCULOS ANALÍTICOS.....	21
8.	ANEXO II. CÁLCULOS SISTEMA HIDRÁULICO .....	21
9.	ANEXO III. SOLIDWORKS. MODELADO 3D .....	21
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	22



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 TEMA OBJETO DEL PROYECTO

El presente trabajo fin de grado tiene como objeto el cálculo, análisis y modelado de una pala cargadora frontal con cazo para cereal cuyo uso principal estaría destinado al sector agrícola y ganadero. Para dicho análisis se partirá del modelo comercial de John Deere 603 R. No obstante, dado que el modelo comercial se encuentra sometido a patentes se procederá a realizar un nuevo diseño con su filosofía, pero analizando y justificando el porqué de las geometrías elegidas.

Así todo el desarrollo está basado en la integración de herramientas CAD / CAE en el proceso de diseño. Como se ha expuesto el objeto del proyecto es el análisis de un cargador frontal agrícola, con el fin de asimilar los siguientes objetivos:

1/ Integración del software SolidWorks como herramienta de CAD / CAE

2/ Análisis de un cargador frontal agrícola a partir de un modelo comercial de similares características perteneciente al fabricante John Deere.

El fabricante John Deere dispone de un catálogo online para la identificación de las piezas. No obstante, este catálogo no aporta dimensiones ni funcionalidades de los elementos. Para resolver esta carencia se ha procedido a la toma de medidas de varias máquinas y mecanismos similares logrando un conjunto que permitiría la fácil instalación en la maquinaria agrícola actual.

La integración de SolidWorks como herramienta de diseño aporta la validación del diseño mediante los diversos sistemas de análisis integrados: interferencias, mallado, limitaciones de desplazamiento, pudiendo simular el funcionamiento del cargador, así como la prueba de distintos materiales, restricciones de movimientos y la deformación esperada según el tipo de cargas.

El segundo objetivo del proyecto es comprobar, a través del cálculo en SolidWorks, que los cálculos analíticos realizados, las diferentes hipótesis y las condiciones del diseño son las adecuadas.

## 1.2 MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

La elección de este trabajo fin de grado se debe tanto al interés generado en el desarrollo de las asignaturas relacionadas con el diseño de máquinas en la carrera impartidas por mi tutora del trabajo de fin de grado, así como por parte familiar debido al uso de este tipo de maquinaria en mi trabajo en el sector agrícola y ganadero.

El objeto de este proyecto se encuentra dentro del espectro competencial a la que la formación en Grado habilita. Así los sectores destinatarios de estas máquinas son principalmente empresas de servicios agrícolas, ganaderos. Particularmente, el modelo elegido presenta un mecanismo de enlace que permite su ensamblaje sin bajarse de la maquinaria. Así se logra que el trabajo sea realizado por la propia máquina sin precisar que el operario conductor deba bajar de la cabina resultando eficaz el diseño.

En general, el mecanismo de la cargadora aporta flexibilidad a las operaciones y un radio de giro que no se ve incrementado, además de polivalencia ya que combinando las operaciones con cazo y pincho se consiguen llevar a cabo las operaciones de manipulación relacionadas con la cosecha.

El mecanismo incluye dos parejas de cilindros hidráulicos cuyo émbolo se calcula para los requerimientos teóricos da carga y descarga de cereal.



### 1.3 CONOCIMIENTOS APLICADOS

Los conocimientos adquiridos en las diferentes asignaturas durante los cuatro años del Grado en Ingeniería Mecánica se aplicarán a lo largo de esta memoria para alcanzar los objetivos planteados. Estas asignaturas son las que a continuación se mencionan y exponen brevemente:

- **CRITERIOS DE DISEÑO DE MÁQUINAS:** Aplicación de conocimientos de cálculos analíticos tales como selección de perfiles estructurales, uniones mediante pasadores etc.
- **CÁLCULO Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS:** En esta asignatura se abordan los conocimientos básicos del modelado 3D y la utilización del software de elementos finito “SolidWorks”.
- **RESISTENCIA DE MATERIALES:** Aprendizaje de cálculos de barras que están sometidas a diversos esfuerzos como son: tracción, compresión y pandeo.
- **MECÁNICA:** En esta asignatura se adquieren los conocimientos necesarios para la elaboración de diagramas de sólido libre.
- **DIBUJO INDUSTRIAL:** Permite adquirir conocimientos esenciales a la hora de realizar y acotar planos de cada una de las piezas de la maquinaria.



## 1.4 NECESIDAD

El ámbito de mayor uso y aplicación de la maquinaria que se describirá y analizará, se concentra en el sector agrícola y ganadero. También es frecuente su uso en el sector de obras públicas y la construcción.

El uso de este tipo de maquinaria en diferentes ámbitos ha permitido la aceleración del ritmo de trabajo, así como un aumento en la efectividad del mismo. Además, facilita la actividad del operario permitiéndole trabajar de una manera más ergonómica.

En la actualidad las palas cargadoras permiten el transporte de materiales pesados como toneladas de carga de cereal, pacas de cereal y facilitan el movimiento de áridos permitiendo realizar trabajos de forma rápida.



## 2. PALA CARGADORA FRONTAL

### 2.1 DEFINICIÓN

La definición para una pala cargadora frontal es pala mecánica compuesta por un tractor sobre orugas o neumáticos, provisto de una cuchara, herramienta o cazo cuyo movimiento de elevación se ejecuta mediante dos brazos laterales articulados.

En dichos brazos laterales se incorporan dos cilindros hidráulicos para elevar y descender las cargas y dos cuadriláteros articulados para formar el chasis principal del cargador frontal.

El sistema hidráulico de la pala cargadora frontal es alimentado a través del propio sistema hidráulico del tractor u oruga mediante la bomba de presión instalada en el tractor. Este sistema hidráulico está formado por un par de cilindros hidráulicos principales que son los encargados de elevar y descender las cargas. Otro par de cilindros hidráulicos secundarios se encargan de mover el cazo o herramienta.

### 2.2 ANTECEDENTES Y EVOLUCIÓN

La revolución industrial trajo consigo una nueva generación de maquinaria, más compleja y ergonómica que trajo consigo un cambio la idea tradicional de cultivo y trabajo en el campo que hasta entonces se había realizado fundamentalmente a mano.

Desde ese momento se disminuyó de forma drástica la mano de obra en el campo pasando a realizarse todos los trabajos de forma más rápida y eficiente gracias a los avances tecnológicos en la maquinaria agrícola.

Como consecuencia de la evolución tecnológica las palas cargadoras también han sufrido la misma evolución siendo en la actualidad capaces de elevar mayores cargas y realizar las labores agrarias de forma mucho más rápida.

Las primeras palas cargadoras poseían características mucho más simples en su fabricación como eran largueros mucho más cortos que impedían una mayor altura de elevación. Este tipo de palas carecía de un cuadrilátero articulado por lo que la inclinación dependía directamente de la propia altura de elevación. Otra de sus limitaciones principales era que los cilindros encargados de elevar la carga eran de simple efecto es decir solo tenía una entrada de aceite a presión para elevar la carga mientras que para descender dicha carga sólo era necesaria el propio peso de esta.

Conforme se iba avanzando en el tiempo iban surgiendo modelos mucho más robustos con refuerzos en el chasis principal, capaces de elevar mayores cargas. Otra de las principales incorporaciones en los nuevos modelos es la existencia de un cuadrilátero articulado que permite una inclinación de la herramienta totalmente independiente de la altura de elevación de los brazos principales.

## 2.3 TIPOLOGÍA PALA CARGADORA FRONTAL

La principal clasificación para los distintos tipos de pala cargadora es según sus sistemas de auto nivelación.

Las palas cargadoras autonivelables están provistas de un sistema mecánico o hidráulico formado por un cuadrilátero el cual se encarga de mantener la herramienta o cazo con el mismo ángulo respecto al suelo durante el periodo de elevación de carga.

Los sistemas de auto nivelación pueden ser mecánicos con el cuadrilátero sobre el chasis principal, mecánicos con el cuadrilátero en el interior del chasis principal o sistema de auto nivelación hidráulico.

A continuación, se muestran diferentes modelos actuales de palas cargadoras.



Ilustración 1: Pala cargadora Tenías



Ilustración 2: Pala cargadora Quicke



Ilustración 3: Pala cargadora El León



Ilustración 4: Pala cargadora López Garrido

La característica principal de los sistemas de auto nivelación es que están provistos de un sistema mecánico o hidráulico formado por un cuadrilátero el cual se encarga de mantener el apero de la pala cargadora con la misma posición respecto al suelo.

En cuanto a la diferencia entre los distintos sistemas de auto nivelación existente es una evolución acorde con las necesidades de determinados usuarios los cuales necesitan una mayor visibilidad o precisión en los trabajos que realizan.

Esta mayor visibilidad se consigue eliminando elementos de la zona delantera del puesto de conducción que impiden la visión del operario.

Estos elementos son situados de forma que no interfieran en la visión del operario situándolos debajo del chasis principal en el caso de auto nivelación hidráulica o en el interior del chasis principal

Los cargadores frontales sin sistema de auto nivelación la principal característica es que hay que estar corrigiendo continuamente desde el puesto de control la posición de la herramienta, pues el ángulo que se mantiene constante no es con el suelo si no con el chasis del cargador. Por lo que la carga al llegar al punto más alto de su elevación se nos caerá hacia atrás y al descender se nos caerá hacia delante.

## 2.4 TIPOLOGÍA CAZOS O HERRAMIENTAS

Un cazo o herramienta se define como el apero que se acopla en la parte frontal de una pala cargadora frontal con características diferentes en función del uso al cual está destinado.

En la actualidad existe una gran cantidad de cazos u herramientas dependiendo de su aplicación. Por lo general cada fabricante de palas cargadoras fabrica también sus propios cazos u herramientas, aunque en la actualidad existe una tendencia a generalizar el tipo de enganche entre pala cargadora y apero.

Mediante el óptimo diseño de los enganches entre pala y cazo se ha conseguido que esta operación sea rápida y sencilla pudiéndose realizar de forma automática sin necesidad de bajar del tractor agrícola.



Ilustración 5: Cazo para áridos



Ilustración 6: Cazo para estiércol



Ilustración 7: Pinchos para balas



Ilustración 8: Pinza forestal

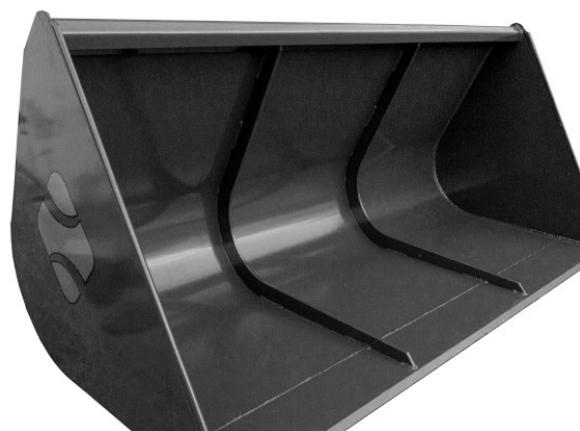


Ilustración 9: Cazo para cereal

### 3. CÁLCULOS ANALÍTICOS

Los cálculos analíticos realizados sobre la pala cargadora se han expuesto en el “Anexo I. Cálculos analíticos”. Mediante los diagramas de sólido libre de cada una de las piezas principales de la pala cargadora frontal se obtendrán las reacciones y así podremos obtener los esfuerzos a los que están sometidas cada una de dichas piezas.

Debido a que nuestra pala cargadora frontal es totalmente simétrica se va a analizar solamente uno de los dos brazos elevadores.

En primer lugar, se parte de un diseño comercial que es el modelo 603R de John Deere y se extraen las características básicas tales como dimensiones y geometrías, así como las carreras de los cilindros elevadores.

Después, se van a analizar tres posiciones de altura distintas y se seleccionara aquella posición que sea más desfavorable para su posterior dimensionado. La pala cargadora frontal es totalmente simétrica por lo que los esfuerzos analizados serán los que soportan uno de los brazos elevadores.

Los siguientes puntos son los que se van a analizar teniendo también en cuenta las propiedades mecánicas del material utilizado y los coeficientes de seguridad exigidos según la teoría de cortante máximo.

- Fuerzas en cada una de las uniones para cada posición
- Diámetro de cada uno de los bulones en las uniones
- Espesores de piezas
- Dimensionamiento de los cilindros

FUERZA(N)	POSICIÓN 1	POSICIÓN 2	POSICIÓN 3
<b>F1</b>	15124	21497	21497
<b>F2</b>	21261	21865	21865
<b>FcIL3</b>	42521	43730	43730
<b>F4</b>	21261	21865	21865
<b>FcIL6</b>	-285210	-2438	10976
<b>F7</b>	279323	19408	34667

Tabla 1: Fuerzas en las uniones



PIEZA	BULÓN	DIÁMETRO(mm)
ACOPLE ÚTILES	1	15,32
	2	15,45
BARRA UNION	2	15,45
	3	15,45
ÁNGULO	3	15,45
	4	15,45
AGUILÓN	1	15,32
	4	15,45
	5	21,85
	6	55,79
	7	55,21

Tabla 2: Diámetros de los bulones

PIEZA	BULÓN	ESPESOR(mm)
ACOPLE ÚTILES	1	6,014
	2	6,014
BARRA UNION	2	6,014
	3	6,065
ÁNGULO	3	6,065
	4	6,065
AGUILÓN	1	6,014
	4	6,014
	5	6,065
	6	21,91
	7	21,68

Tabla 3: Espesores de las piezas

## 4. SISTEMA HIDRÁULICO

Los cálculos del sistema hidráulico realizados sobre la pala cargadora se han expuesto en el “Anexo II. Sistema hidráulico”.

Se define el sistema hidráulico de una pala cargadora al conjunto de actuadores, tales como los cilindros hidráulicos, tuberías de presión, empalmes y al propio fluido de trabajo.

La hidráulica es la rama de la ciencia que estudia el comportamiento de los fluidos en función de sus propiedades específicas o lo que es lo mismo estudia las propiedades mecánicas de los líquidos dependiendo de las fuerzas a las que están sometidos.

Este sistema es el encargado de dotar a la pala cargadora tanto de movimiento como de fuerza de trabajo. El sistema hidráulico de la pala está conectado directamente al sistema hidráulico del tractor. Dicho tractor debe poseer una bomba hidráulica que trabaje a una presión de 200 bares y con un caudal de funcionamiento de 114 l/min.

Los cilindros hidráulicos de la pala cargadora frontal trabajan con la presión y caudal de aceite determinados por el tractor agrícola al cual están montados. En este apartado se van a realizar los cálculos analíticos necesarios para el dimensionado de los cilindros hidráulicos tanto del mástil como del acople de útil teniendo en cuenta los datos de presión y caudal de aceite propios del modelo de tractor analizado.

La pala cargadora consta de un par de cilindros hidráulicos principales y otro par de cilindros hidráulicos secundarios.

**Cilindros hidráulicos principales:** Este par de cilindros hidráulicos son los encargados de proporcionar el movimiento requerido al chasis principal del cargador frontal y así poder elevar la carga. Esta unido mediante pasadores en un extremo al subchasis y en el otro a los brazos de elevación que forman el chasis principal. Estos cilindros están alimentados por el sistema hidráulico del tractor agrícola.

**Cilindros hidráulicos secundarios:** Este par de cilindros hidráulicos son los encargados de proporcionar en movimiento al cazo o herramienta del cargador frontal. Con este movimiento se puede variar el ángulo de la herramienta con respecto a la horizontal. Estos cilindros hidráulicos están unidos mediante pasadores al chasis principal del cargador frontal en un extremo y en el otro al acoplamiento de las herramientas. Estos cilindros hidráulicos están alimentados por el sistema hidráulico del tractor.

PIEZA	DIÁMETRO PISTÓN(mm)	DIÁMETRO VÁSTAGO(mm)
Cilindro Mástil	200	125
Cilindro Útil	80	45

Tabla 4: Dimensiones cilindros

## 5. SIMULACIÓN SOLIDWORKS

El modelado y cálculo realizado sobre la pala cargadora se han expuesto en el “Anexo III. Modelado en SolidWorks”.

El software CAD SolidWorks es una aplicación de automatización de diseño mecánico que permite a los diseñadores croquizar ideas con rapidez, experimentar con operaciones y cotas, y producir modelos y dibujos detallados.

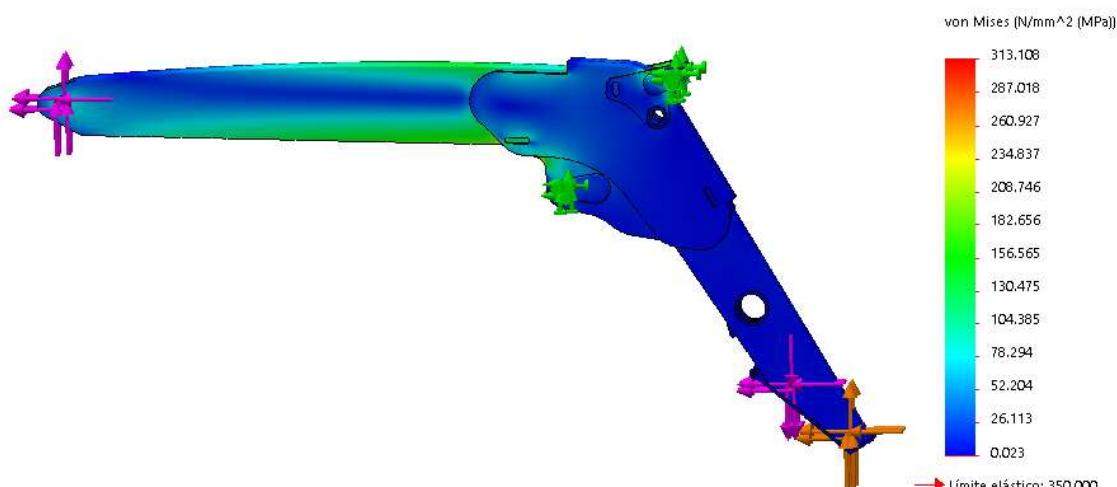


Ilustración 10: Simulación 3D



## 6. CONCLUSIONES

### 6.1 CONCLUSIONES DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto es el análisis, cálculo y modelado de los componentes fundamentales de un cargador frontal agrícola tanto de forma analítica como con la integración de herramientas CAD / CAE en el proceso de diseño.

Partiendo de la información proporcionada por diversos fabricantes, una vez analizados los diferentes tipos de modelos, se ha seleccionado un modelo concreto de la marca John Deere mediante el cual se ha deducido el funcionamiento del sistema.

En primer lugar, se han realizado una serie de cálculos analíticos analizando varias posiciones de trabajo y determinando cuál de ellas es la más desfavorable. Seleccionando la posición más desfavorable como punto de análisis se han calculado las fuerzas que actúan sobre los elementos del sistema, así como su dimensionamiento.

En segundo lugar, se ha modelado mediante el software “SolidWorks” los elementos que componen el sistema tomando como referencia las medidas obtenidas en los cálculos analíticos. El fabricante John Deere dispone de un catálogo online para la identificación de las piezas. No obstante, este catálogo no aporta dimensiones ni funcionalidades de los elementos. Para resolver esta carencia se ha procedido a la toma de medidas de varias máquinas y mecanismos similares logrando un conjunto que permitiría la fácil instalación en la maquinaria agrícola actual.

El modelado en tres dimensiones del cargador frontal agrícola en el programa SolidWorks, ha permitido realizar el análisis de tensión de Von Mises, desplazamientos y factor de seguridad del sistema. Gracias a la herramienta Simulation del programa SolidWorks nos ha permitido conocer cuáles son los puntos de mayor tensión por lo tanto más solicitados de cada uno de los componentes de la pala cargadora.

### 6.2 APORTE AL AUTOR

La realización presente trabajo de fin de grado ha supuesto un nuevo reto a nivel personal, así como una experiencia novedosa de aprendizaje. Desde el comienzo se han realizado numerosos cambios debido a imprevistos o pequeños factores que no se han tenido en cuenta y han obligado a rehacer partes del proyecto ya que muchas de ellas están interconectadas y un pequeño cambio en un apartado puede suponer un gran cambio en otro. Un aspecto importante ha sido la gestión de tanta información disponible, tanto en las redes como en documentos físicos, la labor de filtrar toda esa información ha sido esencial y muy útil para el futuro.

Como conclusión final, el desarrollo del presente me ha aportado una visión más técnica y detallada del conocimiento previo que ya poseía sobre la maquinaria agrícola, así como de las dificultades que surgen a lo largo de la elaboración de un proyecto tan complejo y las posibles soluciones a dichos problemas.



## 7. ANEXO I. CÁLCULOS ANALÍTICOS

- Documento adjunto a la memoria.

## 8. ANEXO II. CÁLCULOS SISTEMA HIDRÁULICO

- Documento adjunto a la memoria.

## 9. ANEXO III. SOLIDWORKS. MODELADO 3D

- Documento adjunto a la memoria.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- ABAD BLASCO, JAVIER – CANALÍS MARTINEZ, PAULA – MALÓN LITAGO, HUGO.

Apuntes de la asignatura “Criterios de diseño de máquinas” (2016)

Zaragoza: Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.

- CANALÍS MARTINEZ, PAULA – MALÓN LITAGO, HUGO.

Apuntes de la asignatura “Cálculo y selección de elementos de máquinas” (2016)

Zaragoza: Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.

- GERE, JAMES. TIMOSHENKO: Resistencia de materiales. (2004) Madrid: S.A. Ediciones Paraninfo

- AUTOCAD EDUCATION. Guía del estudiante para el aprendizaje del software AutoCAD. (2006)

[<http://www.formacionprofesional.info/descargas-manuales-tuto-autocad>]

- SOLIDWORKS EDUCATION. Guía del estudiante para el aprendizaje del software SolidWorks. (2010)

[[https://www.solidworks.com/sw/docs/Student\\_WB\\_2011\\_ESP.pdf](https://www.solidworks.com/sw/docs/Student_WB_2011_ESP.pdf)]