

# **GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

# **TRABAJO FIN DE GRADO**

## ***PROYECTO DE DISEÑO Y CÁLCULO DE UN MECANISMO DE CARGA LATERAL DE CAMIONES PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS***

**Alumno: Moh-ladadih, Mokhtar, Malaenin**

**Directora: Martija, López, Itziar**

**Curso: 2017-2018**

**Fecha: viernes, 23, febrero, 2018**

# **GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

# **TRABAJO FIN DE GRADO**

## ***PROYECTO DE DISEÑO Y CÁLCULO DE UN MECANISMO DE CARGA LATERAL DE CAMIONES PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS***

### ***DOCUMENTO 3- MEMORIA***

**Alumno: Moh-ladadih, Mokhtar, Malaenin**

**Directora: Martija, López, Itziar**

**Curso: 2017-2018**

**Fecha: viernes, 23, febrero, 2018**

# Índice

3.1. Objeto .....	5
3.2. Alcance .....	6
3.3. Antecedentes .....	8
3.4. Normas y referencias .....	11
3.4.1. Normativas aplicables .....	11
3.4.2. Bibliografía consultada .....	11
3.4.2.1. Libros consultados .....	11
3.4.2.2. Monografías docentes consultadas .....	11
3.4.3. Referencias online.....	12
3.4.3.1. Manuales y catálogos consultados.....	12
3.4.3.2. Páginas webs consultadas.....	12
3.4.4. Programas informáticos utilizados.....	12
3.5. Abreviaturas y simbología .....	13
3.5.1. Abreviaturas .....	13
3.5.2. Simbología utilizada .....	13
3.6. Requisitos de diseño.....	15
3.6.1. Requisitos del cliente .....	15
3.6.2. Zonas de funcionamiento .....	17
3.7. Marco teórico .....	19
3.7.1. Análisis cinemático y dinámico.....	19
3.7.2. Método de elementos finitos .....	23
3.8. Conclusiones .....	28

## Índice Figuras

3.1. Aplicación del mecanismo.....	5
3.2. Mecanismo diseñado .....	6
3.3. Camión con mecanismo de carga trasera.....	8
3.4. Camión con mecanismo de carga lateral .....	8
3.5. Contenedores de carga lateral de 3.200 litros .....	9
3.6. Esquema de funcionamiento de la caja recolectora.....	9
3.7. Características de los contenedores de carga lateral .....	15
3.8. Características de los camiones de recogida.....	16
3.9. Barrio de Abando .....	17
3.10. Barrio de Indautxu.....	18
3.11. Barrio de Basurto .....	18
3.12. Ejemplo de mallado del brazo.....	23
3.13. Análisis de tensiones del brazo.....	24
3.14. Curva Tensión-Deformación del acero.....	25
3.15. Mecanismo final explosionado .....	29
3.16. Conjunto final ensamblado.....	29

# **Índice Tablas**

3.1. Abreviaturas utilizadas en el proyecto .....	13
3.2. Simbología utilizada en el proyecto .....	13

## DOCUMENTO 3: Memoria

### 3.1. Objeto

El objeto de este proyecto es el de diseñar un mecanismo de acceso lateral para los camiones encargados de la recogida de residuos urbanos en la población de Bilbao.

Dado el incremento de la producción de residuos, el ayuntamiento de Bilbao ha precisado para el próximo año la incorporación de cinco nuevas unidades de camiones de recogida de residuos de carácter urbano.



*Figura 3.1. Aplicación del mecanismo*

El ayuntamiento ha encargado el trabajo de diseño y cálculo del mecanismo a los alumnos de la Escuela de Ingeniería de Bilbao, para que de esta forma se puedan enfrentar a un caso real de un proyecto de ingeniería, y que mejor manera que vaya destinado a la ciudad en la que conviven los propios estudiantes.

De esta manera, el ayuntamiento pretende animar a los futuros ingenieros a realizar proyectos destinados a la mejora y desarrollo de la propia ciudad.

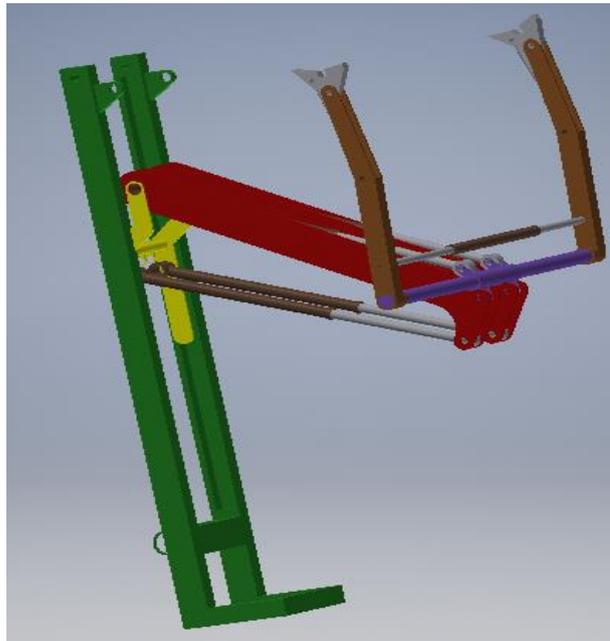
El diseño del mecanismo abarca a todos los elementos que lo conforman, así como el cálculo de los elementos mecánicos necesarios para el buen funcionamiento de este y por otra parte la correcta elección de los elementos normalizados que se puedan adquirir directamente desde los catálogos de los fabricantes.

En este proyecto, trabajarán ingenieros de distintas especialidades debido a que el mecanismo a diseñar se compone además de elementos mecánicos, de aparatos electrónicos y eléctricos que garantizan el buen funcionamiento del sistema automático de descarga.

Por último, hay que señalar que este proyecto sólo abarca la parte mecánica de diseño y cálculo de los elementos que componen el mecanismo. Los restantes aparatos electrónicos y eléctricos se elegirán, si es posible, de los catálogos correspondientes.

### 3.2. Alcance

En el diseño del mecanismo de carga lateral objeto del proyecto, se analizarán en profundidad todos sus elementos principales, los cuales son los brazos, la pluma y los ganchos. Además de estos, se deben analizar también el resto de los elementos que conforman el mecanismo como los bulones, los tornillos y el resto de piezas secundarias.



*Figura 3.2. Mecanismo diseñado*

Para poder empezar el proyecto es imprescindible dimensionar todos los elementos que componen el mecanismo. Debido a que el sistema está formado por elementos móviles de grandes dimensiones y por lo tanto de grandes masas e inercias, es fundamental realizar un estudio dinámico de los diferentes subsistemas que componen el conjunto a dimensionar.

El mecanismo opera con tres grados de libertad y está formado por cuatro grupos de actuadores hidráulicos. El primer grupo, formado por cuatro cilindros hidráulicos, se encarga de posicionar los brazos en la recogida y descarga del contenedor. El segundo grupo, formado por dos actuadores de pequeñas dimensiones, se encarga de anclar los brazos al contenedor para que no derrame el residuo durante el proceso de descarga. El tercer grupo, formado por un actuador, se responsabiliza de levantar el conjunto del mecanismo hasta la altura necesaria para realizar la correcta descarga del contenedor. Y, por último, el cuarto grupo, formado también por un actuador hidráulico, se encarga de acercar y alejar horizontalmente el conjunto del mecanismo al contenedor para su correcta recogida.

Una vez dimensionado el conjunto del mecanismo se generará un modelo, gracias al cual se podrán obtener los centros de gravedad, las masas y los momentos de inercia de los elementos principales del mecanismo de estudio.

A continuación, se procederá a realizar un estudio cinemático de todos los elementos que conforman el mecanismo, que nos permitirá obtener las velocidades y aceleraciones de cada elemento.

Una vez finalizado el estudio cinemático, se obtendrán las fuerzas dinámicas a las que se ve sometido el conjunto del mecanismo. Para ello, será necesario obtener los momentos de inercia y las masas, los cuales se obtendrán mediante el modelizado y análisis en el programa GIM.

Finalmente, conocidos todos los esfuerzos que debe soportar el mecanismo, se procederá a realizar los cálculos pertinentes a la resistencia de los elementos principales del conjunto. El material a utilizar para dicho estudio será acero estructural (acero al carbono) debido a las buenas propiedades que presenta en este tipo de mecanismos y aplicaciones.

Para los cilindros hidráulicos, se realizará un estudio hidráulico para conocer el caudal que deben suministrar para poder soportar los esfuerzos a los que se verán sometidos.

Para llegar al modelo óptimo final, se crearán diferentes modelos iniciales que se mejorarán sucesivamente a medida que se avanza para buscar la respuesta óptima u aceptable que el mecanismo debe responder para garantizar su buen funcionamiento. Para ello, se utilizarán diferentes programas como Inventor, SolidWorks, GIM, etc.

### 3.3. Antecedentes

Este sistema de recogida de residuos utiliza recipientes normalizados que generalmente están ubicados en la vía pública. Estos recipientes son vaciados en el camión mediante un sistema automático, sin esfuerzo para los operarios. Este sistema tiene tres variantes, en función de cuál sea el lado del compactador por el que se eleve el contenedor. Estos sistemas o variantes se denominan:

- ✓ Carga trasera: el contenedor es elevado por la parte trasera del compactador.
- ✓ Carga frontal: el contenedor es elevado por la parte frontal del compactador.
- ✓ Carga lateral: el contenedor es elevado por la parte derecha del compactador (en algunas ocasiones por la izquierda).



*Figura 3.3. Camión con mecanismo de carga trasera*



*Figura 3.4. Camión con mecanismo de carga lateral*

## 1. Recogida con carga trasera:

Es el más habitual en Europa y sobre todo en España. La dotación del vehículo es de un conductor y dos operarios, siendo estos últimos los que acercan y retiran los contenedores para su vaciado con la ayuda del elevador mecánico. La capacidad de los contenedores suele ser de 800 a 1.100 litros.

## 2. Recogida con carga frontal:

Utiliza sólo un conductor con un recolector que lleva la tolva de carga encima de la cabina y el único operario puede ver perfectamente la operación de descarga. Admite una variante del elevador que coge por un lado y vacía frontalmente el contenedor. Los contenedores suelen ser de gran capacidad (de 3.000 a 5.000 litros).

Presenta el inconveniente de la dificultada maniobrabilidad que tiene que realizar el camión para la recogida de los contenedores.

## 3. Recogida con carga lateral:

Esta es la última tecnología existente, desarrollada en Italia e implantada experimentalmente en España desde el año 1995 en Córdoba y Sevilla. Se basa en que los contenedores son recogidos lateralmente por un elevador que controla el conductor del camión con la ayuda de 4 o 5 cámaras y un televisor de una o dos pantallas.



Figura 3.5. Contenedores de carga lateral de 3.200 litros

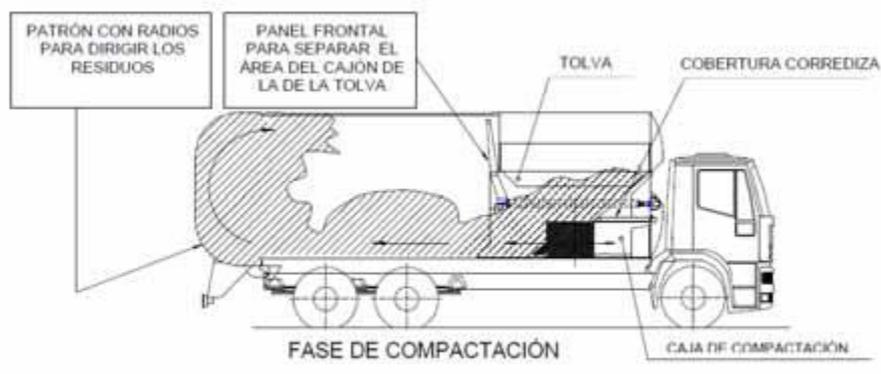


Figura 3.6. Esquema de funcionamiento de la caja recolectora

Una vez explicados los diferentes tipos de mecanismos que existen hoy en día en el mercado para la recogida de contenedores de residuos, se ha optado por el diseño de un mecanismo de carga lateral por la eficiencia que presenta y porque solamente necesita de un solo operario, el propio conductor, para la descarga de los contenedores en la tolva del camión.

Las tecnologías que incorporan los camiones hoy en día hacen posible la descarga de los contenedores con la supervisión del conductor solamente con total seguridad, gracias a las cámaras que lleva incorporadas el vehículo que controlan todo el proceso de descarga en la tolva y la puesta de nuevo del contenedor en su lugar de origen.

### 3.4. Normas y referencias

En este apartado se van a enunciar todas aquellas normativas, referencias online y bibliografías consultadas durante el desarrollo del proyecto.

#### 3.4.1. Normativas aplicadas

- *UNE 13861:2003* Seguridad de las máquinas.
- *UNE-ISO 1808:2016* Requisitos de seguridad para mecanismos suspendidos.
- *UNE 12574-1/2/3* Elevacontenedores lateral con sistemas de brazos a bulón de enganche.

#### 3.4.2. Bibliografía consultada

##### 3.4.2.1. Libros consultados

- [1] Hernández, A. “Cinemática de mecanismos. Análisis y diseño. Edición revisada”; Editorial Síntesis, 2004.
- [2] Abasolo, B. “Diseño de máquinas”; Editorial Síntesis, 2011.

##### 3.4.2.2. Monografías docentes consultadas

- [1] Martija, I. Apuntes asignatura “Cinemática y dinámica de máquinas”.
- [2] Macho, E. Apuntes asignatura “Mecánica aplicada”; Temas: Movimiento plano de un sólido rígido y dinámica del movimiento plano.
- [3] Abasolo, M. Diapositivas asignatura “Diseño mecánico mediante elementos finitos”.
- [4] Apuntes asignatura “Elasticidad y Resistencia de Materiales”.

### 3.4.3. Referencias online

#### 3.4.3.1. Manuales y catálogos consultados

- [1] SMC; Catálogo “Cilindros hidráulicos”. Disponible en: [https://www.smc.eu/portal\\_ssl/WebContent/local/ES/cilindros\\_hidraulicos/CH\\_cat\\_es.pdf](https://www.smc.eu/portal_ssl/WebContent/local/ES/cilindros_hidraulicos/CH_cat_es.pdf)
- [2] STS; Catálogo “Cilindros hidráulicos”. Disponible en: <http://www.sts.es/archivos/PRODUCTOS/CATALOGO/CILINDROS%20HIDRAULICOS.pdf>
- [3] Ind tornillería; Catálogo “Industrial de tornillería y elementos mecánicos” Disponible en: [http://indtornilleria.com/Catalogo\\_general\\_web.pdf](http://indtornilleria.com/Catalogo_general_web.pdf)

#### 3.4.3.2. Páginas webs consultadas

- [1] Geesink B.V. Sucursal en España. Disponible en: [http://www.interempresas.net/Equipamiento\\_Municipal/FeriaVirtual/Contacto-Geesink-B-V-Sucursal-en-Espana-88258.html](http://www.interempresas.net/Equipamiento_Municipal/FeriaVirtual/Contacto-Geesink-B-V-Sucursal-en-Espana-88258.html)
- [2] RosRoca. Disponible en: <http://www.rosroca.es/es/productos/cargalateral/elevadores-carga-lateral/>

#### 3.4.4. Programas informáticos utilizados para el desarrollo del proyecto

Los programas informáticos que han servido tanto para realizar el diseño como realizar los planos del conjunto son los siguientes:

- ✓ Gim: para la realización de los análisis cinemáticos y dinámicos de los elementos principales que componen el mecanismo.
- ✓ Autodesk Inventor Professional 2016: programa utilizado para realizar el diseño de las diferentes piezas que componen el mecanismo.
- ✓ AutoCAD 2016: programa utilizado para la realización de los planos normalizados de las diferentes piezas que componen el mecanismo objeto de estudio.
- ✓ Workbench 18.0: programa utilizado para la comprobación del análisis de elementos finitos (tensiones y deformaciones) de las piezas principales del mecanismo.

### 3.5. Abreviaturas y simbología

#### 3.5.1. Abreviaturas

Las abreviaturas utilizadas durante el desarrollo de este proyecto son las siguientes:

Tabla 3.1. Abreviaturas utilizadas en el proyecto

<b>GDL</b>	Grados de libertad
<b>CDG</b>	Centro de gravedad
<b>CIR</b>	Centro instantáneo de rotación
<b>SR</b>	Sólido rígido
<b>UNE</b>	Una Norma Española
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>MEF</b>	Método de los Elementos Finitos
<b>PR</b>	Posición de recogida
<b>ERM</b>	Elasticidad y Resistencia de Materiales
<b>PIR</b>	Posición intermedia de recogida
<b>CL</b>	Carga lateral

### 3.5.2. Simbología utilizada

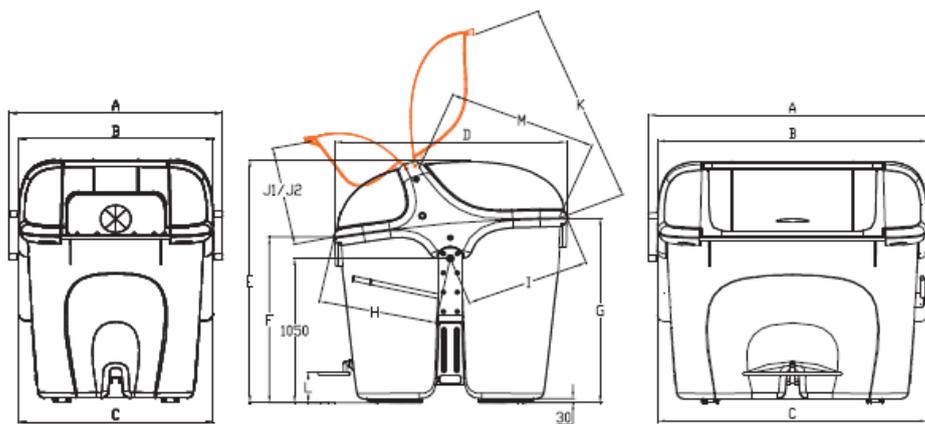
Tabla 3.2. Simbología utilizada en el proyecto

$t$	Tiempo
$v$	Velocidad lineal
$\omega$	Velocidad angular
$a$	Aceleración lineal
$\alpha$	Aceleración angular
$F$	Fuerza
$I_G$	Momento de inercia del elemento en el centro de gravedad
$H$	Momento angular en el centro de gravedad
$E$	Módulo de Young
$\nu$	Coefficiente de Poisson

### 3.6. Requisitos de diseño

#### 3.6.1. Requisitos del cliente

En este apartado se van a explicar todos aquellos requisitos de diseño impuestos por el cliente para hacer posible el diseño del mecanismo objeto de este proyecto. Antes de empezar, conviene tener en cuenta las características dimensiones y de peso que deben de tener los contenedores de carga lateral para poder adaptar el diseño del conjunto a las características de estos contenedores:



MODELO		2.200	3.200
Capacidad nominal (litros)		2.200	3.200
Carga nominal (Kg)		880	1.280
Anchura total contenedor (mm)	A	1.380	1.880
Anchura máxima en la zona superior del contenedor (mm)	B	1.260	1.760
Anchura entre cajas laterales (mm) (dispositivo elevación)	C	1.260	1.760
Profundidad total contenedor (mm)	D	1.520	1.520
Altura total contenedor (mm)	E	1.755	1.755
Altura del borde de carga del lado usuario (mm)	F	1.200	1.200
Altura del borde de carga del lado calle (mm)	G	1.340	1.340
Distancia eje elevación al borde de carga lado usuario (mm)	H	770	770
Distancia eje elevación al borde de carga lado calle (mm)	I	815	815
Altura del pedal estándar al suelo (mm)	L	223 <sup>(1)</sup>	223 <sup>(1)</sup>
Apertura mínima tapa usuario accionamiento pedal (mm)	J1	500	500
Apertura máxima tapa lado usuario (mm)	J2	550	550
Apertura máxima tapa lado calle (mm)	K	1.425	1.425
Boca de descarga mínima (mm)	M	980	980
Peso total en vacío del contenedor (Kg)		120	150

<sup>(1)</sup> Altura del pedal estándar. Existe una versión de pedal elevado 150 mm para montaje del contenedor bajo nivel.

Figura 3.7. Características de los contenedores de carga lateral

Una vez especificadas las características de los contenedores de carga lateral, se va a proceder con la especificación de los requisitos principales impuestos por el cliente:

- Capacidad de los contenedores de 2.200 a 3.200 litros.
- Tiempo de ciclo de cada contenedor: 30 s.
- Ángulo de vuelco: superior a 60 grados para garantizar un vaciado completo del contenedor en la tolva del camión.
- Las dimensiones generales del tipo de camión en el que va montado este tipo de mecanismos son las siguientes:



Figura 3.8. Características de los camiones de recogida

Especificados los requisitos de diseño impuestos por el cliente, se han realizado una serie de diseños del mecanismo objeto de estudio hasta llegar a la solución óptima que cumple con los requisitos impuestos, como con las capacidades tensionales y de resistencia de materiales que garantizan el buen funcionamiento de éste durante su aplicación en la vida real.

### 3.6.2. Zonas de funcionamiento

Los trabajos que van a realizar los camiones que incorporan los mecanismos de carga lateral se van a desarrollar íntegramente en la ciudad de Bilbao. Las zonas de funcionamiento más concurridas, debido a la gran carga de recogida, son las que se detallan a continuación:

- Barrio de Abando:



Figura 3.9. Barrio de Abando

## ➤ Barrio de Indautxu:



Figura 3.10. Barrio de Indautxu

## ➤ Barrio de Basurto:



Figura 3.11. Barrio de Basurto

### 3.7. Marco teórico

#### 3.7.1. Análisis cinemático y dinámico

- **Análisis cinemático**

La cinemática es la rama de la física que describe el movimiento de los objetos sólidos sin considerar las causas que lo originan (las fuerzas) y se limita, principalmente, al estudio de la trayectoria en función del tiempo. Para ello utiliza velocidades y aceleraciones, que describen cómo cambia la posición en función del tiempo.

El análisis cinemático constituye una etapa fundamental dentro del proceso de diseño de un mecanismo. La obtención de fuerzas de inercia, necesarias para la realización del posterior análisis dinámico, requiere el conocimiento de las aceleraciones, las cuales solo estarán disponibles una vez realizado el correspondiente análisis cinemático.

En general, los problemas que se resuelven con el análisis cinemático son:

- ✓ Problema de posición.
- ✓ Cálculo de velocidades y aceleraciones.
- ✓ Análisis en posiciones sucesivas.

La primera tarea del análisis cinemático consiste en resolver el problema de posición. Éste consiste en obtener la posición de todos los elementos del mecanismo, del cual se conocen todas sus dimensiones, la posición del elemento fijo y las posiciones de los elementos de entrada.

El siguiente paso del análisis cinemático, y que requiere de la resolución previa del problema de posición, es el del cálculo de velocidades y aceleraciones. El cálculo de velocidades y aceleraciones consiste en conocida la posición de un mecanismo, y para una(s) velocidad(es) y aceleración(es) del (de los) elemento(s) de entrada, calcular las velocidades y aceleraciones de los restantes elementos y puntos del mecanismo. Constituye el paso inmediato anterior al análisis dinámico de mecanismos.

El último de los problemas del análisis cinemático puede considerarse una combinación del problema de desplazamientos finitos y el cálculo de velocidades y aceleraciones.

El análisis en posiciones sucesivas consiste en calcular las posiciones, velocidades y aceleraciones de todos los elementos y puntos del mecanismo a lo largo de un ciclo de movimiento. Los métodos analíticos son los más adecuados para la resolución de este problema ya que se adecuan fácilmente a su implementación por ordenador.

De este modo, el comportamiento del mecanismo puede estudiarse a través de la representación de sus variables cinemáticas a lo largo de un ciclo del movimiento.

- **Análisis dinámico**

La cinemática de mecanismos estudia el movimiento de los diferentes elementos sin tener en cuenta las acciones que lo provocan. En cuanto a la síntesis dimensional de mecanismos, los parámetros de la función objetivo son también requisito de tipo cinemático donde no aparecen en ningún momento variables como las fuerzas resistentes que deben de vencer los elementos de salida o las acciones motoras (fuerzas o momentos) que deben suministrar a los elementos de entrada.

Sin embargo, a la hora de abordar el estudio de un sistema mecánico desde el punto de vista dinámico, aparece una nueva magnitud, la masa, que interviene en variables vectoriales como fuerzas o momentos y que en el análisis cinemático no se había tenido en cuenta. De esta manera, se puede abordar completamente el problema de la dinámica de maquinaria o dinámica del sólido rígido. Asimismo, el análisis dinámico de un mecanismo, incluye el cálculo de las reacciones que aparecen en los pares cinemáticos que unen sus elementos. Por lo tanto, sirve como base para el cálculo resistente que permitirá la obtención de las dimensiones secundarias (geometría y dimensiones de las secciones) de dichos elementos.

A continuación, se exponen los teoremas y principios para su aplicación en el análisis de sistemas mecánicos, en los cuales el efecto de las fuerzas de inercia no es despreciable.

Teoremas fundamentales de la dinámica:

1. La segunda ley de Newton:

La segunda ley de Newton establece que: “La resultante de las fuerzas exteriores que actúan sobre un sólido rígido origina una variación de su cantidad de movimiento”.

Suponiendo, de acuerdo con la Mecánica Clásica, que la masa se mantiene constante a lo largo del tiempo, la resultante de las N fuerzas exteriores es igual al producto de la masa del sólido por la aceleración del centro de gravedad:

$$\sum_{i=1}^N F_{ext}^i = \frac{dp}{dt} = \frac{d}{dt} \cdot (m \cdot v_G) = m \cdot a_G \quad (1)$$

Donde  $a_G$  es la aceleración de su centro de gravedad y p la cantidad de movimiento sólido.

## 2. El teorema del Momento Cinético:

“El momento de las fuerzas exteriores que actúan sobre un sólido rígido respecto de un punto cualquiera O, es igual a la derivada respecto del tiempo del momento cinético respecto a ese punto, más el producto vectorial de la velocidad de dicho punto por la cantidad de movimiento del sólido”.

$$N_O = \frac{dH_O}{dt} + v_O \wedge p \quad (2)$$

Donde  $N_O$  es el momento de fuerzas exteriores respecto del punto O,  $H_O$  el momento cinético respecto de O y  $v_O$  la velocidad de dicho punto. El momento cinético  $H_O$  es igual al momento respecto de O que originan los vectores aplicados en los puntos A de que consta el sólido, definidos como el producto diferencial de masa de cada punto por su velocidad. Es decir:

$$H_O = \int OA \wedge (dm \cdot v_A) = \rho \cdot \int_{vol} (OA \wedge v_A) d_{vol} \quad (3)$$

Que, para el caso de un sólido rígido plano con movimiento plano, de masas M, momento de inercia respecto al punto O,  $I_O$ , velocidad angular  $\omega$ , se convierte en:

$$H_O = M \cdot OG \wedge v_O + I_O \cdot \omega \quad (4)$$

En el caso de que O sea fijo o coincida con el centro de masas G del sólido rígido, el término  $v_O \wedge p$  se anula. En este último caso, la ecuación se transforma en:

$$N_G = \frac{dH_G}{dt} \quad (5)$$

Dado que el sistema tiene movimiento plano, la velocidad angular  $\omega$  es siempre constante en dirección y perpendicular al plano que lo contiene. En este caso:

$$H_G = I_G \cdot \omega \quad (6)$$

Y, por lo tanto:

$$N_G = I_G \cdot \alpha \quad (7)$$

Para la obtención de las fuerzas de inercia es necesario el conocimiento del momento de inercia de los diferentes elementos. Es decir, para sistemas discretos el momento de inercia se define como:

$$I = \sum_1^N m_i \cdot r_i^2 \quad (8)$$

Donde  $r_i$  es la distancia de la partícula al eje de rotación.

Los cuerpos reales están formados por tal cantidad de pequeñas partículas que se les suponen continuos. El momento de inercia de cuerpos reales continuos donde se supone una distribución continua de masa es:

$$I = \int_M r^2 dm \quad (9)$$

Si la distribución de masa es continua y volumétrica:

$$I = \int_v r^2 \rho dv \quad (10)$$

Donde  $dm$  es un elemento de masa situado a una distancia  $r$  del eje de rotación.

### 3.7.2. Método de elementos finitos

Tradicionalmente el proceso de un producto se ha basado en un “intuitivo” diseño conceptual e innumerables ensayos en prototipos. Se partía de un diseño conceptual a partir del cual se desarrollaba un diseño detallado. A continuación, se construía uno o varios prototipos, que se ensayaban repetidamente simulando las condiciones de servicio a las que la pieza o elemento iba a estar sometida durante su vida útil.

Actualmente el proceso o desarrollo de un producto trata de minimizar el conocimiento del producto y el coste de desarrollo de este con el objetivo de reducir gastos y tiempo de desarrollo, y asimismo generar productos mejores.

La herramienta básica para ello es el análisis por ordenador, que permite entender el comportamiento del producto con mayor rapidez y versatilidad y menos coste que los ensayos de prototipos en los que se basaba el modelo tradicional. En efecto, se pueden estudiar muchos casos de carga, probar diseños alternativos, etcétera de una manera ágil y económica en términos de tiempo y dinero.

El método se basa en dividir el cuerpo o geometría a validar en múltiples partes de pequeño tamaño denominados “Elementos”. Los elementos comparten entre ellos puntos comunes de intersección denominados “Nodos”.



*Figura 3.12. Ejemplo de mallado del brazo*

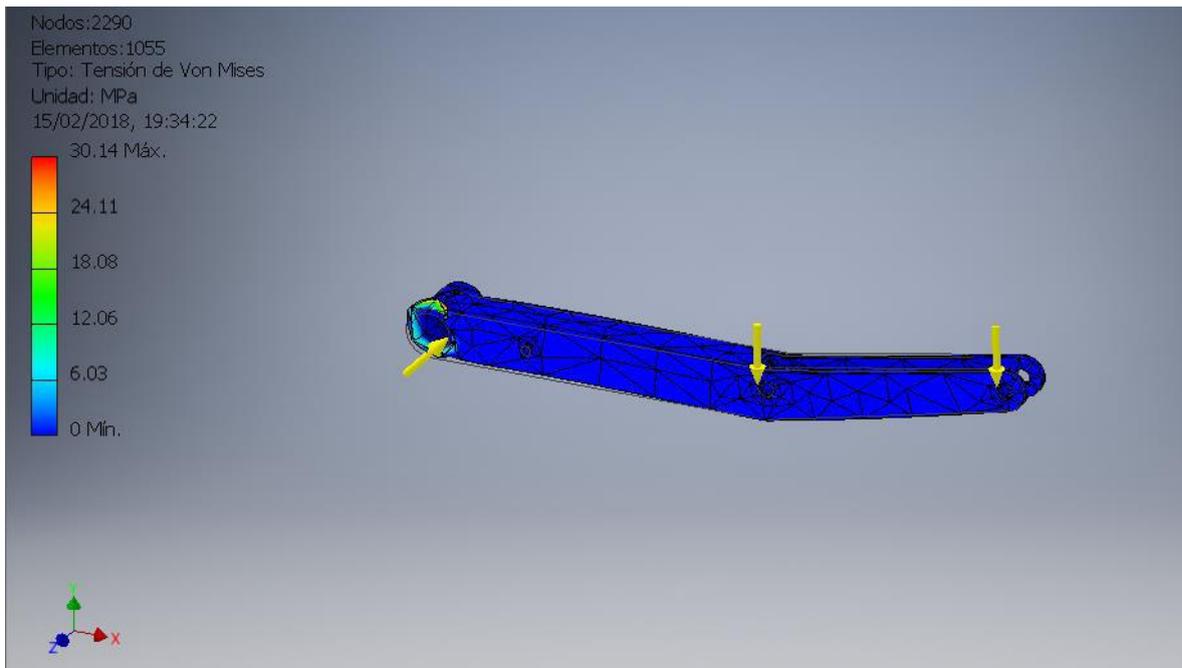


Figura 3.13. Análisis de tensiones del brazo

Los programas basados en MEF formulan ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento de cada uno de los Elementos teniendo en cuenta su conectividad con los demás elementos a través de los nodos. Las ecuaciones matemáticas empleadas definen los desplazamientos de cada uno de los nodos en las direcciones X, Y y Z en función de la carga, las restricciones de movimiento y las propiedades mecánicas del material empleado. El desplazamiento de cada uno de los nodos permite al programa calcular las deformaciones y las tensiones resultantes. Finalmente, el post-proceso representa el modelo tridimensional con una gama de colores que indican las tensiones y deformaciones sufridas bajo las condiciones de contorno definidas (restricciones, material y cargas).

El análisis estático lineal efectuado por “Inventor” realiza tres suposiciones que se deben conocer y tener en cuenta a la hora de realizar el ensayo y validar su modelo: linealidad, elasticidad y suposición estática.

✓ Suposición de linealidad:

La respuesta del modelo es proporcional a la carga aplicada. El incremento de la carga incrementa los desplazamientos, deformaciones unitarias y tensiones de forma proporcional.

Esta simplificación no debe importar cuando se ensaya el modelo bajo tensiones que se encuentren en el intervalo lineal de la curva tensión-deformación (figura 3.14), es decir, en la zona elástica. En esta zona, las deformaciones son proporcionales a la tensión aplicada según el Módulo de elasticidad o Módulo de Young del material seleccionado y, por lo tanto, el comportamiento puede ser representativo. Sin embargo,

el empleo de tensiones superiores a la del límite elástico requiere el uso de aplicaciones no lineales que tenga en cuenta las posibles deformaciones plásticas del material.

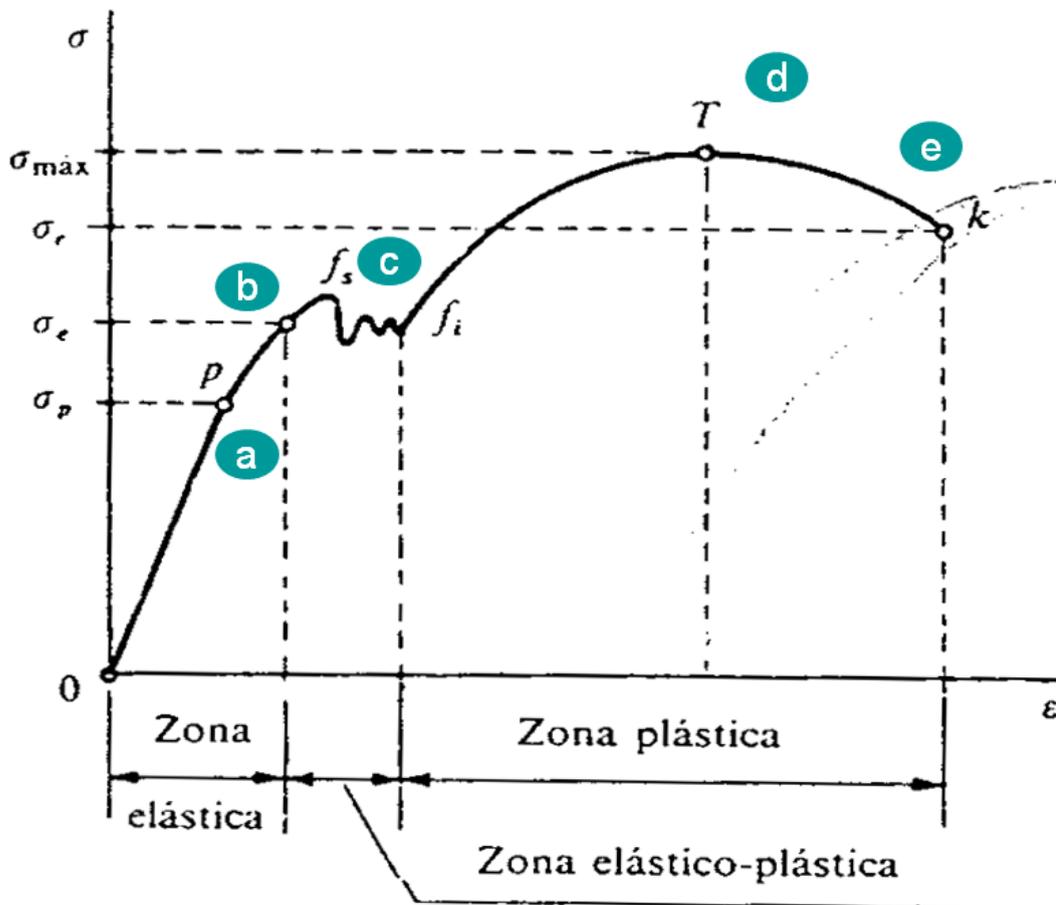


Figura 3.14. Curva Tensión-Deformación del acero

✓ Suposición de elasticidad:

Los cálculos realizados suponen que las tensiones aplicadas se encuentran dentro de la zona de elasticidad de material empleado y que la eliminación o el cese de tensiones provocan la recuperación de las dimensiones iniciales del modelo ensayado. La suposición de elasticidad excluye los comportamientos debidos a deformaciones plásticas permanentes.

En el caso de que el modelo vaya a estar sometido a tensiones superiores a la del límite elástico y prevea que va a sufrir deformaciones plásticas permanentes deberá utilizar aplicaciones de análisis no lineal.

- ✓ Suposición estática:

El modelo ensayado debe soportar las cargas aplicadas de forma lenta y gradual hasta alcanzar la magnitud definida. En los casos en que el modelo deba soportar las cargas de forma repentina, las deformaciones unitarias y las tensiones sufridas serán mayores y deberá usar aplicaciones de análisis dinámico.

### **Características del material para realizar el análisis de tensiones y deformaciones:**

Los materiales pueden ser isotrópicos, anisotrópicos o ortotropicos en función del comportamiento mecánico del modelo en las diferentes direcciones del espacio.

Cuando las propiedades mecánicas son las mismas en todas las direcciones del espacio se dice que el comportamiento es isotrópico (acero). Los materiales anisotrópicos tienen diferente comportamiento mecánico en las diferentes direcciones del espacio mientras que los ortotropicos tienen propiedades mecánicas únicas y diferentes por cada una de las direcciones del espacio (madera, muchos cristales y metales laminados).

“Inventor” emplea el Módulo Elástico, el Coeficiente de Poisson y el Limite elástico en la realización del análisis de tensiones y deformaciones. Los materiales isotrópicos son definidos con el Módulo de Elasticidad y el Coeficiente de Poisson.

El Módulo Elástico es la relación entre el esfuerzo ( $\sigma$ ) y deformación ( $\epsilon$ ) cuando esta es únicamente elástica. Es una medida de la rigidez del material. También se conoce como Modulo de Young (E). En la curva Tensión-Deformación es la pendiente de la zona elástica. La expresión que la define es:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (11)$$

Donde  $\sigma$  es la tensión cuyas unidades son el Mega Pascal (MPa),  $\epsilon$  es la deformación (adimensional, cm/cm o m/m) y E es el Módulo Elástico o Modulo de Young (MPa o GPa).

El Coeficiente de Poisson es la relación negativa de las deformaciones laterales y axiales que resultan de aplicar un esfuerzo axial en la deformación elástica. Relaciona la deformación elástica longitudinal producida por una tensión de tracción o compresión, con la deformación que se produce en la dirección perpendicular a la aplicación de la carga.

Cuando un sólido está sometido a un esfuerzo en la dirección X el Coeficiente de Poisson definido por “Inventor” relaciona la división de la tensión lateral en la dirección Y con la tensión longitudinal en la dirección X. Los coeficientes son adimensionales.

El Límite Elástico es el esfuerzo requerido para producir una deformación plástica muy pequeña del orden de 0,002. En un diagrama de tracción (Tensiones-Deformaciones), el Límite elástico divide la gráfica en deformaciones elásticas y deformaciones plásticas o permanentes.

### 3.8. Conclusiones

En un principio el ayuntamiento de Bilbao ha encargado el diseño y cálculo de cinco unidades de mecanismos de carga lateral para camiones de recogida de residuos urbanos de diferente procedencia. El diseño y cálculo de los mecanismos estaba sujeto a una serie de requisitos que nuestro cliente nos ha pedido.

Tras realizar una serie de modelos del mecanismo pedido, se han podido cumplir con éxito las condiciones impuestas desde principio. Este éxito se ha logrado gracias a un diseño aceptable mediante el empleo de diferentes programas de diseño y cálculo.

Para el diseño de los diferentes elementos que componen el conjunto se ha usado el programa Inventor, un programa que facilita el diseño de las piezas de una forma muy sencilla con unos resultados finales muy satisfactorios. Una vez concluido el diseño de las diferentes piezas, se ha realizado un estudio cinemático y dinámico de las diferentes posiciones que puede adquirir el conjunto durante un ciclo de descarga del contenedor en la tolva del camión, el programa usado para este estudio es el Gim.

En lo que respecta a la parte de resistencia de materiales del conjunto diseñado, se ha optado por realizar un análisis de elementos finitos de las piezas principales esenciales para el funcionamiento del conjunto. Este análisis ha incluido un estudio de las tensiones y deformaciones de los diferentes elementos fruto de las solicitaciones que soportan en un caso de aplicación real.

Por último, concluir que se ha obtenido un resultado más que aceptable después de haber probado varios modelos iniciales. El modelo final cumple con las exigencias impuestas por nuestro cliente con un presupuesto adecuado al proyecto realizado, lo que nos garantizará en el futuro la confianza de cara a realizar más proyectos con otros clientes.

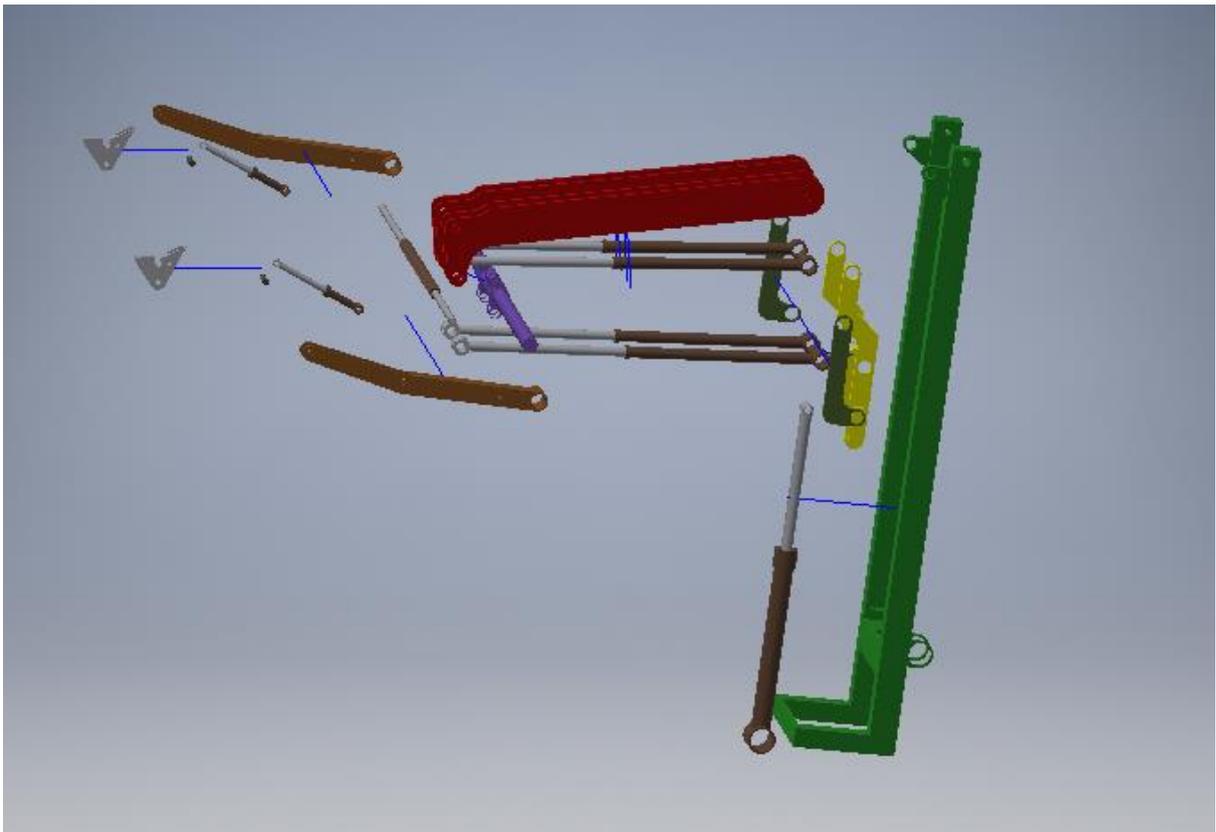


Figura 3.15. Mecanismo final explosionado

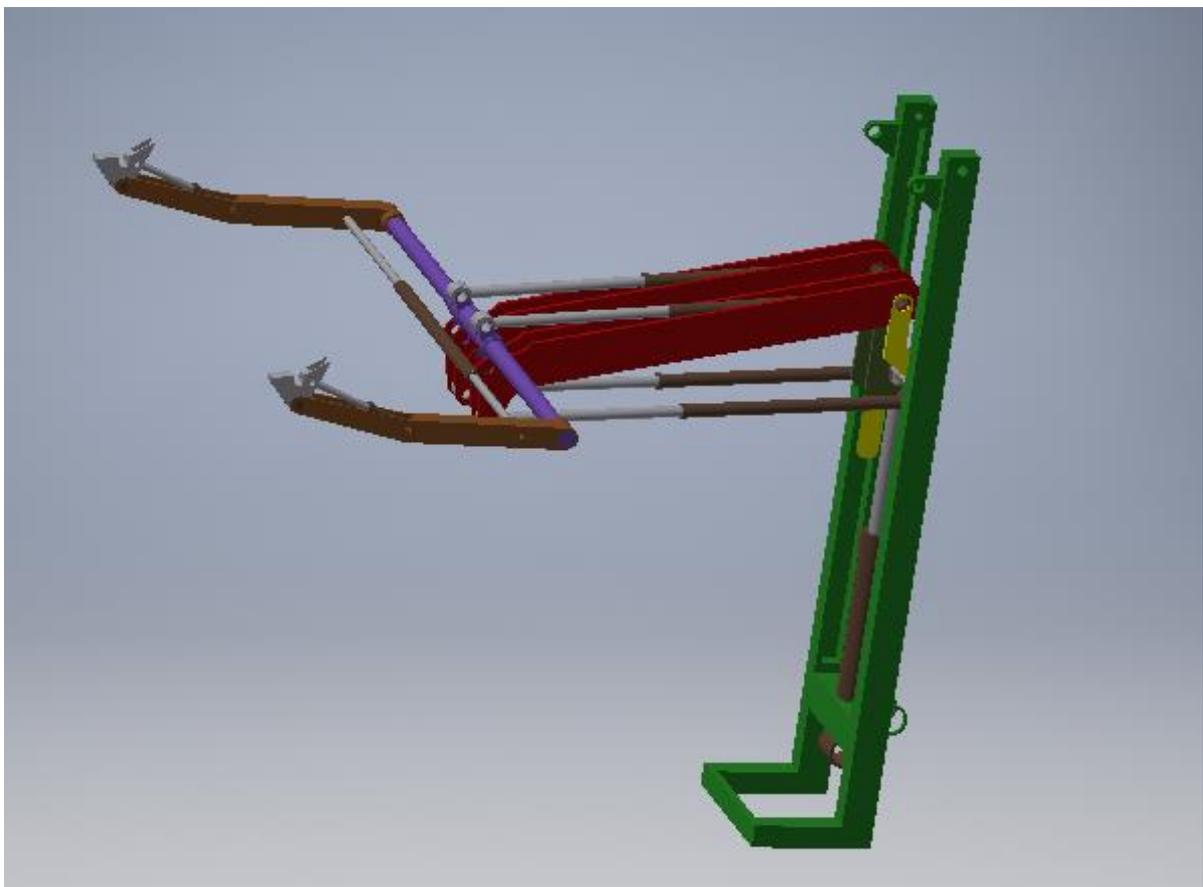


Figura 3.16. Conjunto final ensamblado