



**industriales**  
etsii

**Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería  
Industrial**

# **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA**

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial**

**Comprobación de la eficacia de los  
sistemas de simulación dinámica de  
vuelco de tractores dotados de ROPS**

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**Autora:**

**Dolores Ojados González**

**Directora:  
Codirector:**

**Beatriz Miguel Hernández  
Bernardo Martín Górriz**



**Universidad  
Politécnica  
de Cartagena**

Cartagena, 26 de septiembre de 2016



## Comprobación de la eficacia de los sistemas de simulación dinámica de vuelco de tractores dotados de ROPS

### Dynamic simulation modelling of agricultural tractors with automatic deployment of ROPS

## CONTENIDO

### 1. INTRODUCCIÓN

#### 1.1. Antecedentes

#### 1.2. Naturaleza del problema

##### 1.2.1. Legislación relacionada

##### 1.2.2. Peligro de vuelco

##### 1.2.3. Medidas preventivas

#### 1.3. Dispositivos de seguridad

##### 1.3.1. Introducción

##### 1.3.2. Histórico de dispositivos de seguridad ensayados

##### 1.3.3. Descripción del sistema de seguridad desarrollado

###### 1.3.3.1. Sistema de control electrónico y eléctrico

###### 1.3.3.2. Sistema mecánico antivuelco

###### 1.3.3.3. Sistema hidráulico de accionamiento del arco

#### 1.4. Programas de diseño gráfico y simulación

##### 1.4.1. Modelado y diseño 3D

##### 1.4.2. Simulación de comportamiento mecánico

### 2. OBJETIVOS



### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Descripción de la maqueta de tractor empleada en los ensayos

3.2. Selección de programas para diseño y simulación

3.3. Modelado de un tractor a escala 1:16

3.4. Modelado de la superficie de ensayo

3.5. Construcción de la superficie de ensayo

3.5.1. Impresora 3D modelo Dimension bst 1200es

3.5.2. Fabricación de soportes para conformar la superficie de ensayo mediante impresión 3D

3.5.3. Materiales y procedimiento empleados para la construcción de la superficie de ensayo

3.6. Ensayo de vuelco real en maqueta y rampa

3.6.1. Cámara de alta velocidad

3.6.2. Medición del ángulo de vuelco en función de la velocidad

3.6.3. Medición de tiempos de vuelco con cámara de alta velocidad en ensayo real

3.6.4. Medición del ángulo de activación del arco con cámara de alta velocidad en ensayo real

3.7. Simulación del comportamiento del sistema en vuelco lateral

3.7.1. Preparación de la simulación

3.7.2. Criterios para la determinación del momento de inicio y la duración del vuelco

### 4. RESULTADOS

4.1. Maqueta modificada del tractor

4.1.1. Adaptación del sistema electrónico a la maqueta del tractor

4.1.1.1. Software para la activación automática del arco

4.1.2. Sistema mecánico del dispositivo de seguridad antivuelco para la maqueta a escala 1:16



## 4.2. Tractor modelado a escala 1:16

### 4.2.1. Fases del modelado con CATIA de la maqueta del tractor

#### 4.2.1.1. Piezas creadas

#### 4.2.1.2. Ensamblaje de las piezas creadas

### 4.2.2. Texturizado y render de la maqueta del tractor

### 4.2.3. Aplicación de propiedades físicas al modelo del tractor

## 4.3. Superficie de ensayo modelada

### 4.3.1. Fases del modelado con SolidWorks de la superficie de ensayo

#### 4.3.1.1. Modelado del elemento rampa

#### 4.3.1.2. Modelado de la superficie de 3mm sobre la rampa

#### 4.3.1.3. Aplicación de texturas a los dos sólidos modelados

#### 4.3.1.4. Cortes en rampa para obtención de soportes a prototipar

#### 4.3.1.5. Modificación del tamaño de la superficie

#### 4.3.1.6 División de los soportes en piezas a ensamblar

## 4.4. Superficie de ensayo construida

## 4.5. Resultados de los ensayos de vuelco lateral

## 4.6. Resultados de los ensayos de simulación

## 4.7. Comparación entre los resultados de vuelco real y los de simulación

# 5. CONCLUSIONES

# 6. BIBLIOGRAFÍA



## ÍNDICE DE FIGURAS:

- Figura 1. Gráfico disposición del sistema de seguridad.*
- Figura 2. Componentes, coordenadas y vectores del modelo Denny y Rehkugler.*
- Figura 3. Cortacésped real sobre rampa real. (Fuente: Scarlett et al., 2006).*
- Figura 4. Modelado de cortacésped en rampa. (Fuente: Scarlett et al., 2006).*
- Figura 5. Tractor New Holland TT55 utilizado en el ensayo de Silleli. (Fuente: Silleli et al., 2008).*
- Figura 6. Prototipo de tarjeta de control del dispositivo.*
- Figura 7. Módulo MPU6050 (Acelerómetro y giroscopio).*
- Figura 8. Cálculo del ángulo de inclinación obtenido del acelerómetro del MPU6050.*
- Figura 9. Velocidad angular y cálculo del ángulo de rotación obtenido del giroscopio del MPU6050.*
- Figura 10. Representación de la velocidad angular.*
- Figura 11. Envío de SMS con la posición GPS en caso de accidente.*
- Figura 12. Cuadro eléctrico para mando manual.*
- Figura 13. Montaje del subsistema de control electrónico y eléctrico en el prototipo real.*
- Figura 14. Estructura soporte del arco, cilindro hidráulico y arco de seguridad.*
- Figura 15. Vista en perspectiva del tubo del arco de seguridad.*
- Figura 16. Amarre arco-tractor.*
- Figura 17. Sistema hidráulico autónomo.*
- Figura 18. Conjunto hidráulico y sus conexiones.*
- Figura 19. Representación de las distintas fases de la ingeniería.*
- Figura 20. Tractor RC New Holland T6070.*
- Figura 21. Sistema de guiado incorporado a la rampa.*
- Figura 22. Impresora 3D modelo Dimension bst 1200es*
- Figura 23. Cabezal y boquillas de la Impresora 3D modelo Dimension bst 1200es*
- Figura 24. Cámara de alta velocidad empleada en los ensayos.*
- Figura 25. Objetivo de cámara de alta velocidad.*
- Figura 26. Foco de iluminación 1000W.*
- Figura 27. Modelo del conjunto rampa - tractor.*
- Figura 28: Contacto de la rueda trasera izquierda con la rampa.*
- Figura 29: Separación de la rueda trasera izquierda con la rampa.*
- Figura 30. Maqueta a escala 1:16 de Tractor New Holland T6070 R/C.*
- Figura 31. Maqueta a escala 1:16 de Tractor New Holland T6070 R/C con la cabina retirada.*
- Figura 32. Sistema de control para activación del arco de seguridad montado en maqueta.*
- Figura 33. Acelerómetro ADXL335.*
- Figura 34. Microcontrolador Arduino Nano (18,5mm x 43.2mm).*
- Figura 35. Unidad de medición inercial MPU6050.*
- Figura 36. Modulo con relés.*
- Figura 37. Circuito integrado regulador de tensión LM78xx.*
- Figura 38. Circuito regulador montado sobre el tractor a escala 1:16.*
- Figura 39. Solenoide empleado.*
- Figura 40. Montaje de la electrónica sobre el tractor a escala 1:16*
- Figura 41. Tractor a escala 1:16 con sistema de seguridad. 1- Alojamiento del microcontrolador. 2- Solenoide. 3- Arco de seguridad. 4- Muelle y tope del arco. 5- Zumbador y led de la alarma. 6- Estructura para garantizar el volumen de seguridad. 7- Alojamiento de la batería.*



- Figura 42. Montaje de prueba en placa de pruebas del circuito inclinómetro con alarma.
- Figura 43. Flujograma del código programado.
- Figura 44. Diseño del arco de seguridad con SolidWorks.
- Figura 45. Detalle del arco abatido y sujeto por el vástago alargado del solenoide.
- Figura 46. Detalle del elemento de espera (antirretorno) con el arco abatido.
- Figura 47. Detalle del elemento de espera (antirretorno) con el arco desplegado.
- Figura 48. Arco de seguridad prototipado con impresora 3D.
- Figura 49. Maqueta modificada con sistemas electrónico y mecánico implementados y con Arco de seguridad abatido.
- Figura 50. Maqueta modificada con sistemas electrónico y mecánico implementados y con Arco de seguridad elevado.
- Figura 51. Tractor a escala 1:16 modificado.
- Figura 52. Proceso de modelado del neumático delantero del tractor.
- Figura 53. Ensamblaje de ruedas (neumático-llanta).
- Figura 54. Ensamblaje del eje delantero.
- Figura 55. Ensamblaje del eje trasero.
- Figura 56. Secuencia de trabajo para obtener el ensamblaje completo del tractor.
- Figura 57. Ensamblaje del tractor.
- Figura 58. Ensamblaje del tractor completo.
- Figura 59. Tractor dividido en cuatro partes (una textura por sólido).
- Figura 60. Neumático antes y después de ser modificado.
- Figura 61. Subensamblajes del modelo completo de la maqueta del tractor.
- Figura 62. Texturas aplicadas a las piezas modeladas de la maqueta del tractor.
- Figura 63. Propiedades físicas del modelo de la maqueta del tractor.
- Figura 64. Modelo del tractor con ROPS. (a) ROPS abatido, (b) ROPS elevado.
- Figura 65. Croquis base para modelado de rampa.
- Figura 66. Conjunto de croquis base para soportes
- Figura 67. Saliente base por límite parcial.
- Figura 68. Saliente base por límite completo.
- Figura 69. Sólido correspondiente a la rampa.
- Figura 70. Croquis base para creación de superficie de 3mm
- Figura 71. Operación saliente base por límite para creación de superficie de 3mm
- Figura 72. Sólido correspondiente a superficie de ensayo
- Figura 73. Aplicación de material y apariencia a la superficie de ensayo.
- Figura 74. Superficie texturizada y aplicación de material y apariencia a la rampa.
- Figura 75. Superficie de ensayo y rampa con textura, material y apariencia aplicadas.
- Figura 76. Rampa con textura, material y apariencia.
- Figura 77. Superficie de ensayo con textura, material y apariencia.
- Figura 78. Disposición de los planos de corte para obtención de soportes.
- Figura 79. Corte-Extruir para extraer material de la inclinación 0 a 7,5 grados.
- Figura 80. Corte-Extruir para extraer material de la inclinación 7,5 a 15 grados.
- Figura 81. Proceso de Corte-Extruir para extraer material entre soporte y soporte de forma sucesiva hasta tener todos los soportes independientes.
- Figura 82. Modelado de soportes.



*Figura 83. Croquis para aligerar soportes.*

*Figura 84. Croquis para aligerar soportes*

*Figura 85. Resultado de los soportes aligerados.*

*Figura 86. Modificación de tamaño de la superficie de ensayo y los soportes.*

*Figura 87. División y ensamblaje de soporte en dos piezas.*

*Figura 88. División y ensamblaje de soporte en tres piezas.*

*Figura 89. Rampa con inclinación de 50 grados modelada*

*Figura 90. Rampa y superficie renderizadas.*

*Figura 91. Cuadernas de ABS Plus prototipadas mediante impresión 3D.*

*Figura 92. Piezas modeladas en 3D a partir de las que se ha construido la superficie de ensayo.*

*Figura 93. Superficie de ensayo modelada en 3D.*

*Figura 94. Desarrollo de la superficie de revolución modelada en 3D.*

*Figura 95. Montaje de bastidor de madera, cuadernas de ABS y chapa de DM.*

*Figura 96. Pinturas empleadas en el acabado de la superficie de ensayo.*

*Figura 97. Pinturas aplicadas a la superficie de ensayo.*

*Figura 98. Superficie de ensayo una vez terminada.*

*Figure 99. Tractor ensayado sobre la rampa construida.*

*Figura 100. Último fotograma de la escena de la simulación con el arco (ROPS) abatido.*

*Figura 101. Último fotograma de la escena de la simulación con el arco (ROPS) desplegado.*



## ÍNDICE DE TABLAS:

*Tabla 01. Condiciones de ensayo para la medida del ángulo y el tiempo de vuelco.*

*Tabla 02. Diseño experimental de las simulaciones.*

*Tabla 03. Especificaciones técnicas del microcontrolador ATmega328.*

*Tabla 04. Resultados de los ensayos de vuelco lateral con la maqueta del tractor y la rampa.*

*Tabla 05. Resultados de los ensayos de simulación.*

*Tabla 06. Error relativo entre los resultados de ambos ensayos. Simulación vs real.*





## Comprobación de la eficacia de los sistemas de simulación dinámica de vuelco de tractores dotados de ROPS

### Dynamic simulation modelling of agricultural tractors with automatic deployment of ROPS

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

El presente Proyecto Fin de Carrera se ha realizado en la Universidad Politécnica de Cartagena dentro del ámbito del proyecto de investigación “Nuevos Dispositivos de Seguridad en Máquinas” financiado por la Dirección General de Trabajo de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia y supone un avance en el desarrollo de un sistema de accionamiento automático del arco antivuelco de tractores.

En el contexto del proyecto de NDSM se están desarrollando trabajos de investigación relativos al desarrollo electrónico, mecánico e hidráulico del sistema de accionamiento antivuelco de tractores. De forma paralela y complementaria se están desarrollando trabajos de simulación dinámica del vuelco del tractor, que se exponen en el presente trabajo.

Este PFC se muestra cómo se ha validado el uso de técnicas de modelado y de simulación dinámica computacional para llevar a cabo ensayos del comportamiento ante el vuelco de un ROPS (Roll Over Protection Structure) desplegable automáticamente construido para tractores agrícolas.

Las etapas de este proyecto son:

1. Selección de un vehículo a escala 1:16.
2. Modelado del vehículo elegido.
3. Construcción de una superficie de revolución sobre la que practicar los ensayos de vuelco.
4. Modelado de la superficie de ensayo.
5. Realización de ensayos con la maqueta del tractor y la plataforma con la superficie de ensayo construida.
6. Simulación de los citados ensayos.
7. Comparación de resultados.

## 1.2. Naturaleza del problema

Cada año ocurren numerosos accidentes a causa del vuelco de tractores, causando heridos e incluso muertos, tal como nos indica el artículo “Propuestas para reducir los accidentes por vuelco de tractor de la Región de Murcia” (Martín-Górriz et al., 2010). Desde el año 2005 el Instituto de Seguridad y Salud Laboral de la Región de Murcia ha estado analizando y registrando este tipo de accidentes en el sector agrario para conocer el número real de accidentes por vuelco de tractor que se producen en la Región y sus causas. El 65,9% de los accidentes resultaron mortales, registrándose entre 2005 y marzo de 2012 un total de 44 muertos. De este análisis se pone de manifiesto una excesiva antigüedad de los vehículos siniestrados, ya que en un 54,5% de los casos la edad del vehículo era superior a veinte años. En lo que va del año 2016 se han producido en la región tres accidentes graves por vuelco de tractor, dos de ellos con consecuencia de muerte del agricultor.

La ausencia de estructuras de protección, o la anulación de éstas cuando se disponía de ellas (arcos abatidos) es un factor de riesgo decisivo a la hora de limitar el vuelco del tractor. El abatimiento del arco es necesario para aquellas prácticas que requieren el paso del tractor por zonas con obstáculos como las ramas en cultivos de arbolado y donde podría dañarse el arbolado o las frutas. El problema surge cuando por la repetitividad del tránsito por estas zonas, la activación y desactivación del arco supone una incomodidad o gasto de tiempo del conductor y éste decide suprimir esta protección. En la Figura 1 se aprecia como el 68,2% de los accidentes, los tractores no disponían de estructura de protección; y del 31,8% que si la portaban, siendo la mayoría protección tipo arco, en un 76,9% de los casos éste estaba abatido.

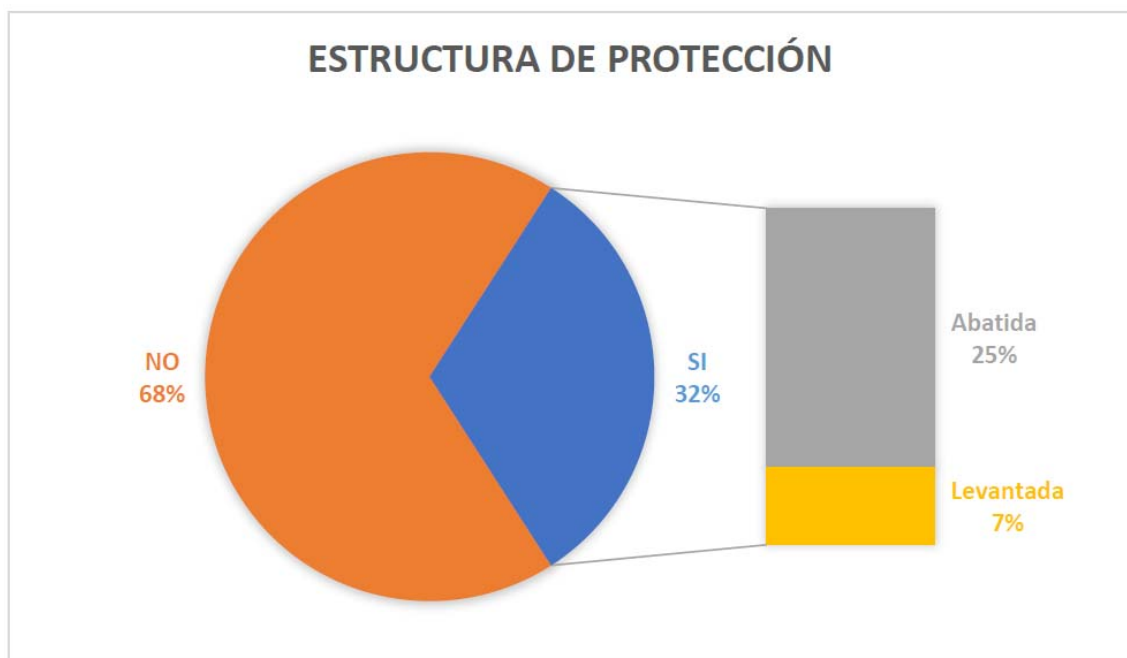


Figura 1. Gráfico disposición del sistema de seguridad.

### 1.2.1. Legislación relacionada

El uso de estructuras de seguridad para la protección del operario que maneje el tractor viene regulado por las siguientes normativas:



Ministerio de Trabajo y Seguridad Social:

- O.M. de 9 de marzo de 1971 por la que se aprueba la O.G.S.H.T. (B.O.E. 16 y 17.3.71)

Ministerio de Agricultura.

- O.M. de 30 de junio de 1973 (B.O.E. 24.07.73)
- O.M. de 27 de julio de 1979 (B.O.E. 11.08.79)
- Resolución del 15.1.81 (B.O.E. 22.01.81)

Ministerio de Trabajo.

- O.M. de 28 de enero de 1981 (B.O.E. 25.02.81)

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

- Resolución de 09.12.81 (B.O.E. 15.12.81)
- Resolución de 09.12.83 (B.O.E. 17.12.83)
- Resolución de 11.07.84 (B.O.E. 19.07.84)
- Resolución de 14.11.85 (B.O.E. 13.12.85)
- Resolución de 18.01.88 (B.O.E. 26.01.88)

Ministerio de Industria y Energía.

- O.M. de 10 de abril de 1989 (B.O.E. 22.04.89)

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

- Resolución de 18.07.89 (B.O.E. 22.07.89)

Ministerio de Industria y Energía.

- Orden de 24 de noviembre de 1989 (B.O.E. 16.12.89)

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

- Resolución de 01.03.90 (B.O.E. 02.03.90)

La legislación del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación regula, tanto la homologación de cuadros y cabinas de seguridad, como los requisitos que deben cumplir estos elementos de protección. Asimismo establece un calendario de fechas a partir de las cuales hace preceptivo para la inscripción de tractores nuevos, el que estén equipados con bastidores o cabinas oficialmente homologados.

De la legislación dictada por el Ministerio de Trabajo, se regula el equipamiento con estructuras de protección, homologadas o no, de los tractores en servicio a partir de un calendario de fechas derivado de lo establecido por el Ministerio de Agricultura.

### 1.2.2. Peligro de vuelco

Los factores asociados al tipo de tractor que influyen en el riesgo de que se produzca el vuelco son los siguientes:

- Anchura de los ejes (vuelco lateral).
- Distancia entre ejes (vuelco longitudinal).
- Altura del centro de gravedad.
- Velocidad.



Por lo tanto un tractor frutero que necesita ser estrecho para pasar entre los árboles es el más susceptible al vuelco, por contraposición, un tractor oruga presentará un riesgo mínimo por tener un centro de gravedad más bajo.

El riesgo, sin embargo, no viene definido sólo por el tipo o modelo de tractor, sino también por el entorno y condiciones en las que se está trabajando. El factor externo principal es la pendiente del terreno, por encima del 20% de pendiente el riesgo de vuelco en trabajos por curva de nivel es muy elevado, y por encima del 45% lo es el de deslizamiento y pérdida de control. También son significativos los efectos de bordes, lindes y la morfología del terreno de trabajo (piedras, humedad...).

### 1.2.3. Medidas preventivas

El Real Decreto 1215/1997 especifica las condiciones que deben cumplir los equipos de trabajo móviles (como los tractores agrícolas), y textualmente dice:

“En los equipos de trabajo móviles con trabajadores transportados se deberán limitar, en las condiciones efectivas de uso, los riesgos provocados por una inclinación o por un vuelco del equipo de trabajo, mediante cualesquiera de las siguientes medidas:

1. Una estructura de protección que impida que el equipo de trabajo se incline más de un cuarto de vuelta.
2. Una estructura que garantice un espacio suficiente alrededor del trabajador o trabajadores transportados cuando el equipo pueda inclinarse más de un cuarto de vuelta.
3. Cualquier otro dispositivo de alcance equivalente.

Estas estructuras de protección podrán formar parte integrante del equipo de trabajo. No se requerirán estas estructuras de protección cuando el equipo de trabajo se encuentre estabilizado durante su empleo o cuando el diseño haga imposible la inclinación o el vuelco del equipo de trabajo.”

Puesto que existen en la actualidad tractores antiguos sin el debido arco de protección (tractores anteriores a 1993, cuando se hizo obligatoria la implantación de estructuras de protección homologadas), la Comisión Nacional de Seguridad y Salud en el trabajo propuso las siguientes acciones para evitar accidentes mortales:

- Achatarrar los tractores sin cabina o arco de seguridad homologado (“Plan Renove”).
- Ampliar el “Plan Renove” con ayudas para poner arco de seguridad homologado (RD 1215/1997).
- Dotar de sistemas hidráulicos para alzar el arco de seguridad sin dejar el puesto del conductor.
- Dotar de sistemas automáticos para alzar el arco de seguridad a partir de un determinado grado de inclinación.
- Recomendar el uso del cinturón, no es obligatorio, pero ayuda a quedarse en el asiento.



## 1.3. Dispositivos de seguridad

### 1.3.1. Introducción

De entre las distintas acciones propuestas por la Comisión Nacional de Seguridad y Salud en el trabajo anteriormente mencionadas, se ha elegido un desarrollo que suscribe las acciones técnicas propuestas:

- Dotar de sistemas hidráulicos para alzar el arco de seguridad sin dejar el puesto del conductor.
- Dotar de sistemas automáticos para alzar el arco de seguridad a partir de un determinado grado de inclinación.

La primera de las acciones se puede resolver de una forma relativamente sencilla, aprovechando que el tractor está dotado de circuitos hidráulicos de alta capacidad destinados al uso de aperos necesarios para las tareas de labranza y cosecha. En contra de lo que se pudiera pensar, la principal dificultad que se presenta en esta acción no tiene que ver con aquellos tractores que no disponen de arco inicialmente, para los que se puede proponer una solución de conjunto. El verdadero problema radica en aquellos vehículos dotados de arco homologado, ya que en estos casos el arco no puede ser mecanizado puesto que perdería la homologación. El desarrollo está obligado a crear sistemas de unión y accionamiento de los dispositivos de seguridad que reproduzcan el accionamiento manual sin alterar el conjunto inicial ya que en el supuesto de que lo alterasen se perdería la homologación previa.

En cuanto a la segunda de las acciones recomendadas, tal como está planteada puede parecer sencilla, una vez alcanzado un cierto grado de inclinación, se daría la consigna al sistema hidráulico para que iniciase la elevación del arco de seguridad. Sin embargo, esta es una visión muy elemental y que se plantea desde la estática del problema por dos razones, la primera es que el vehículo, en sus rutinas de trabajo y desplazamiento, puede pasar por momentos de inclinación puntuales que superan la inclinación consignada pero que no son suficientes para que se produzca el vuelco lo que daría lugar a falsos positivos, la segunda es que la activación del arco desde que se recibe la consigna requiere un tiempo, que por más que se reduzca mediante sistemas de activación más potentes, tendrá que ser tenido en cuenta de modo que, el objetivo final de mantener el arco totalmente elevado en el momento de impacto contra el suelo, se consiga con seguridad.

Se podría deducir que la existencia de falsos positivos es aceptable puesto que la seguridad del operario debe quedar garantizada pero sería una simplificación que una vez más no tiene en cuenta todos los aspectos del problema planteado. La necesidad de una activación rápida va a implicar la utilización de un mecanismo actuador suficientemente violento que afectará al comportamiento mecánico del conjunto. De este modo, cada falso positivo, contribuye a un posible deterioro más rápido de la mecánica del conjunto y a un plan de mantenimiento más costoso.

Es por ello que todo el sistema debe optimizarse para que las activaciones del arco se produzcan cuando el riesgo de vuelco sea inminente y habilitar un sistema de activación hidráulica del arco a voluntad que, dado que se utilizará en situaciones de menor riesgo, propicie un desplazamiento del arco de un modo menos acelerado y violento.

La consigna de activación del arco se puede materializar mediante la incorporación en el dispositivo de un sistema para la medida continua de aceleración e inclinación pero la definición de los valores a consignar se ha de obtener mediante ensayos. Es evidente que ensayar el vuelco de un tractor no es tarea fácil, por ello se deben buscar alternativas útiles y que garanticen, sobre todo cuando de seguridad se trata, que el valor determinado es el que corresponde y resulte eficaz.

### 1.3.2. Histórico de dispositivos de seguridad ensayados

Existen distintos trabajos en los que se ensayó el vuelco de vehículos para uso agrícola, a continuación se enumeran y describen algunos de ellos:

Desde que se tomó conciencia de la gravedad de los accidentes por vuelco de tractores se han realizado numerosos estudios para comprender y estimar la estabilidad y situaciones críticas de riesgo para los tractores. Algunos autores como Geoering et al. (1967), Grevis-James et al. (1971), Mitchell et al. (1972) y Smith et al. (1972) describieron modelos matemáticos para describir la dinámica del tractor durante el movimiento de vuelco.

Denny y Rehkugler (1974) formularon su propio modelo (Fig. 2), ya que los desarrollados hasta ese momento restringían su aplicación a algunos problemas determinados. El modelo y la contrastación que se realizó quedan reflejados en el artículo "Agricultural Wheel-Tractor Overturns". El objetivo de su modelo fue la predicción del movimiento general de vuelco cuando el arco del tractor golpee el suelo.

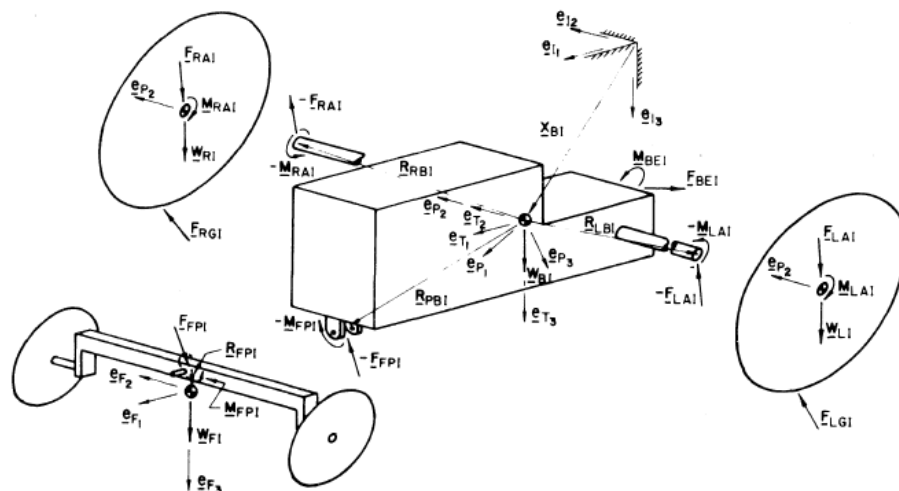


Figura 2. Componentes, coordenadas y vectores del modelo Denny y Rehkugler.

Para contrastar su modelo utilizó una maqueta a escala, debido a la complejidad de utilizar un modelo real. El modelo del tractor fue colocado al comienzo de una rampa y después se le hizo descender y acelerar hasta una velocidad predeterminada antes de cruzar la zona de test y volcar.

La contrastación del modelo matemático fue realizada mediante ordenadores, puesto que el sistema estaba formado por ecuaciones diferenciales de orden veintiuno. El grado de similitud entre el modelo matemático y la experimentación con la maqueta determinaría la validez del modelo matemático desarrollado.

Los resultados obtenidos mostraban similitud entre el experimento y la simulación matemática, pero las diferencias aparecían y aumentaban conforme aumentaba el tiempo. Según Davis y Rehkugler estas discrepancias deberían disminuir si el experimento se llevaba a cabo con tractores verdaderos atravesando un terreno real.

Se han realizado también estudios del comportamiento ante el vuelco lateral con vehículos pequeños, un grupo de investigadores del Silsoe Research Institute realizaron ensayos de vuelco de vehículos agrarios de pequeño tamaño (masa inferior a 600 Kg) para analizar la necesidad de arcos de protección en ellos. Dichos estudios están reflejados en el artículo "Operator roll-over protection on small vehicles" (Scarlett et al., 2006).

Para analizar la estabilidad dinámica realizaron un modelo CAD 3D de un cortacésped que sometieron a simulaciones con CosmosMotion (predecesor de SolidWorks Motion). La simulación se llevó a cabo en una rampa en espiral de 8,5 m de longitud y cuyo ángulo variaba entre 18 y 55° imponiendo al sistema de gravedad y contactos con máxima adherencia.

Tanto el vehículo real como el modelo fueron modificados, puesto que requerían de un armazón donde sujetar el arco protector que evitara daños en el chasis durante el ensayo.

Finalmente el cortacésped real (Fig. 3) y el modelo 3D (Fig. 4) se sometieron a ensayos de vuelco para estudiar las fuerzas y deformaciones sufridas en el choque.



Figura 3. Cortacésped real sobre rampa real. (Fuente: Scarlett et al., 2006).

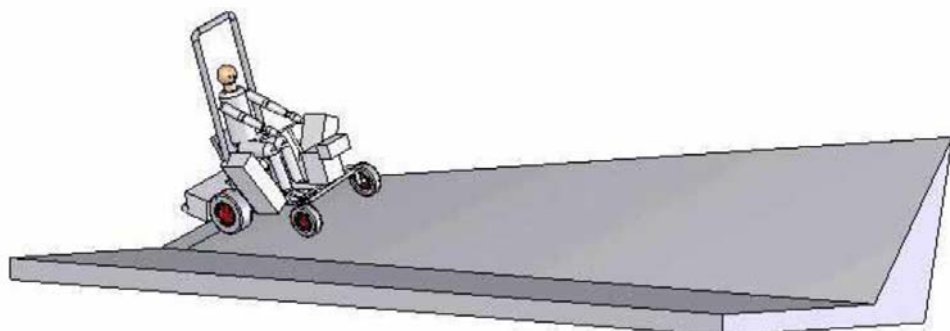


Figura 4. Modelado de cortacésped en rampa. (Fuente: Scarlett et al., 2006).





Posteriormente, En 2008 un grupo de investigadores (Silleli et al., 2008) realizaron experimentos donde se sometió a un tractor real a situaciones de vuelco estático y dinámico para analizar las fuerzas a las que quedaba sometido el arco al chocar con el suelo y determinar así la zona de seguridad garantizada.

El ensayo estático fue realizado únicamente con el arco, que fue sometido a una fuerza para simular el golpe y determinar la fuerza del arco y los elementos de bloqueo.

El ensayo dinámico se llevó a cabo para determinar las fuerzas a las que se expone el arco al chocar con el suelo mediante galgas colocadas en el mismo.



Figura 5. Tractor New Holland TT55 utilizado en el ensayo de Silleli. (Fuente: Silleli et al., 2008).

El ensayo se llevó a cabo a una velocidad fija y además de las fuerzas se midieron el ángulo a partir del cual comenzó el vuelco del tractor, el tiempo de vuelco, la penetración del arco en el terreno y la deformación.

### 1.3.3. Descripción del sistema de seguridad desarrollado

El sistema desarrollado sometido al presente estudio, está formado a su vez por otros tres subsistemas, el sistema de control electrónico, el sistema de accionamiento hidráulico y el sistema mecánico de anclaje del arco al vehículo.

#### 1.3.3.1. Sistema de control electrónico y eléctrico

La parte electrónica de este sistema de control está diseñada para dos modos de funcionamiento: (1) accionamiento manual por pulsador (2) accionamiento automático por sensor de inclinación. En el segundo modo de funcionamiento, se han definido dos niveles de señal según el ángulo de inclinación que mide dicho sensor, (2a) en un primer nivel se activa una señal de alarma acústica y/o luminosa cuando se sobrepasa un determinado ángulo de inclinación preestablecido y (2b) en un segundo nivel, para un mayor ángulo de inclinación, se activa una señal de accionamiento automático del arco de seguridad. El valor de los ángulos de inclinación del accionamiento automático es ajustable por software y por lo tanto adaptable a distintos tipos de tractor/vehículo.



El sistema de control utiliza un microcontrolador (ATmega2560) programado en lenguaje C, con una unidad de medición inercial (acelerómetro y giroscopio), una tarjeta de memoria microSD y un módulo GSM/GPS (Fig. 6). El software desarrollado permite almacenar un histórico de las actuaciones manuales y automáticas del dispositivo de seguridad.

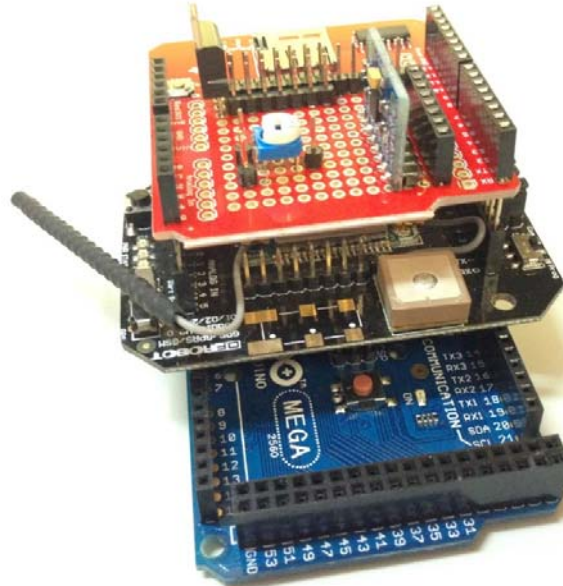


Figura 6. Prototipo de tarjeta de control del dispositivo.

La unidad de medición inercial MPU6050 (Fig. 7) mide la velocidad, orientación y fuerza gravitacional por medio del uso del acelerómetro y del giroscopio que la componen.

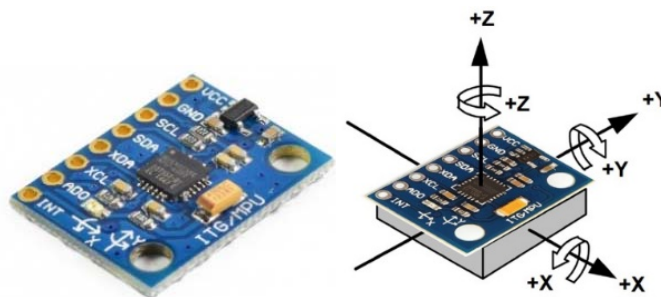


Figura 7. Módulo MPU6050 (Acelerómetro y giroscopio).

El módulo Acelerómetro MPU incorpora un giroscopio de tres ejes con el que se puede medir velocidad angular y un acelerómetro también de 3 ejes con el que se miden los componentes X, Y y Z de la aceleración. La dirección de los ejes está indicada en el módulo que hay que tener en cuenta para no equivocarnos en el signo de las aceleraciones.

Para el cálculo del ángulo de inclinación con el acelerómetro del MPU6050, se considera que la única fuerza que actúa sobre el sensor es la fuerza de la gravedad, por lo que los valores obtenidos en las componentes del acelerómetro corresponden a la misma y los ángulos de la resultante representan la inclinación del plano del sensor, puesto que la gravedad siempre es vertical. Para una mejor explicación, si se parte de un plano X-Z y se inclina el sensor (MPU6050) un ángulo  $\theta$ , dicho ángulo se calcula como se muestra en la Figura 8.

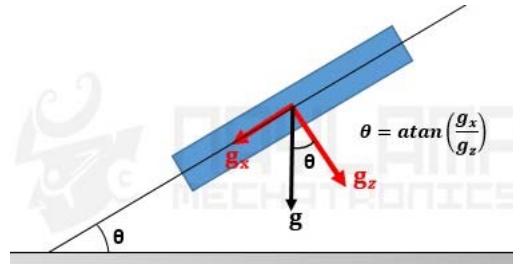


Figura 8. Cálculo del ángulo de inclinación obtenido del acelerómetro del MPU6050.

Con la información obtenida anteriormente se puede calcular el ángulo en un plano 2D, pero es necesario calcular los ángulos de inclinación en un espacio 3D tanto en X como en Y para lo que se emplean las siguientes formulas:

$$\theta_x = \tan^{-1} \left( \frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \right)$$

$$\theta_y = \tan^{-1} \left( \frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}} \right)$$

En el cálculo del ángulo de rotación con el giroscopio del MPU6050, el dato obtenido por el giroscopio es la velocidad angular ( $\vec{\omega}$ ), para calcular el ángulo correspondiente a esa velocidad angular, es necesario integrar esta velocidad y conocer el ángulo inicial. La fórmula resultante se muestra en la Figura 9:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

$$\theta_x = \theta_{x_0} + \omega_x \Delta t$$

$$\theta_y = \theta_{y_0} + \omega_y \Delta t$$

Figura 9. Velocidad angular y cálculo del ángulo de rotación obtenido del giroscopio del MPU6050.

En las expresiones anteriores,  $\theta_x$  representa el ángulo que gira el eje X sobre su propio eje al igual que  $\theta_y$  es el ángulo que gira el eje Y sobre sí mismo.

En la Figura 10 se observa que la velocidad angular es perpendicular al plano de rotación.

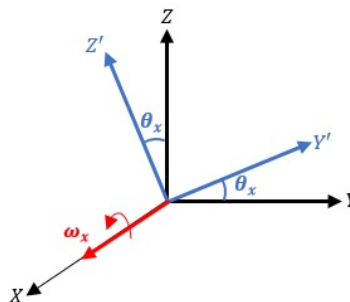


Figura 10. Representación de la velocidad angular.



La medida no es exacta, incluso en ausencia de movimiento el ángulo varía, o si se gira cierto ángulo y luego se regresa a la posición original el ángulo que resulta no es el inicial, esto se debe a que al integrar la velocidad angular y sumar el ángulo inicial hay un error, producto de la mala medición del tiempo o del ruido en la lectura del MPU, el error por más pequeño que sea, se va acumulando en cada iteración y creciendo, este error es conocido con el término inglés DRIFT.

Respecto al Error en las medidas, queda definido por dos problemas muy importantes que, como se ha descrito, se producen en el proceso de la lectura del MPU: el ruido y los errores.

El ruido son todas aquellas interferencias que afectan a los dispositivos electrónicos. El acelerómetro es capaz de medir cualquier ángulo, sin embargo sus lecturas son ruidosas y tienen un cierto margen de error. Por si esto fuera poco, el acelerómetro también detecta cualquier aceleración que no sea la de la gravedad. Por tanto, si se mueve la IMU (unidad de medición inercial compuesta por el acelerómetro y el giroscopio) sin girarla, al aplicar una aceleración en otro eje, la IMU lo detectará como un cambio de rotación generando errores de medición.

Por otra parte, el giroscopio, a diferencia del acelerómetro, da medidas con mucha precisión. Pero al realizar los cálculos del ángulo es inevitable que se produzca un pequeño error, que con el tiempo va acumulándose hasta desviar en gran medida la lectura real, éste es el error acumulado o drift. Para disminuir el fenómeno drift existen varios métodos, la mayoría consisten en aplicar filtros para eliminar el ruido de las lecturas del sensor. También se pueden usar otros sensores como magnetómetros o acelerómetros y con los ángulos calculados con estos mejorar el cálculo del giroscopio.

Uno de los mejores filtros para eliminar el drift, reducir el ruido de la señal y obtener el valor del ángulo de inclinación es el filtro Kalman, este filtro a su vez necesita una buena capacidad de procesamiento computacional, haciéndolo difícil implementar en Arduino.

En el caso que nos ocupa, la señal es filtrada utilizando un filtro simplificado Kalman.

El filtro Kalman funciona produciendo una estimación estadísticamente óptima del estado del sistema en base a las medidas realizadas por el acelerómetro y el giroscopio. Para ello se necesitará no solo saber el ruido de la entrada al filtro llamado "ruido de medición", sino también el ruido del propio sistema llamado "ruido del proceso". El ruido tiene que ser gaussiano distribuido y con una Media de cero para que sea viable el efecto del filtro, por suerte, el ruido aleatorio tiene esta característica.

En el modo de accionamiento automático de despliegue del arco de seguridad anclado al tractor, en el caso de que se produzca la activación automática del arco de seguridad cuando se sobrepasa el grado de inclinación establecido y/o se alcanzan las condiciones definidas para el cálculo del valor de activación consignado, se activa el módulo GSM y se envía al Teléfono de Emergencias un mensaje SMS con las coordenadas geográficas del lugar donde se encuentra el

tractor. Esto permite que los Servicios de Urgencia localicen el lugar del accidente de forma inmediata (Fig. 11). Además, en este modo de accionamiento, cuando se produce la activación automática del arco no es posible rearmarlo manualmente; es necesario reiniciar el sistema actuando en la caja de conexiones, de este modo se impide la manipulación del dispositivo que podría tener como objetivo ocultar que se ha producido un accidente debido al vuelco del vehículo.

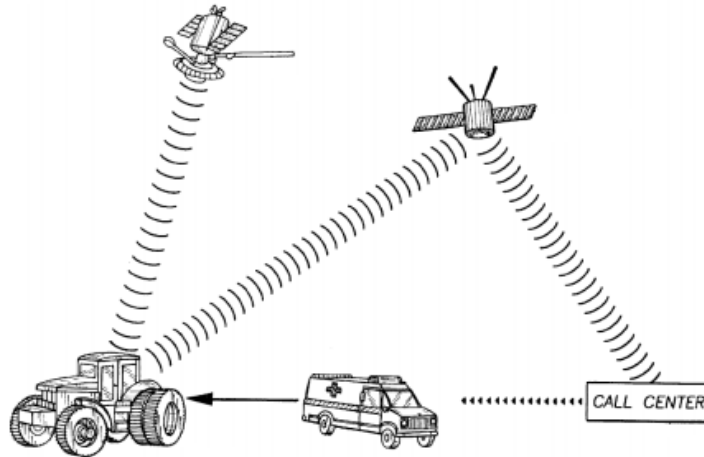


Figura 11. Envío de SMS con la posición GPS en caso de accidente.

Para el accionamiento manual del arco a voluntad del operario del tractor se dispone de un armario eléctrico normalizado montado sobre el tractor con sistema de doble mando (Fig. 12). Este armario contiene además otros componentes como relés de estado sólido, alarma y todo el cableado para la activación de las electroválvulas encargadas del accionamiento del arco tanto manual como automático.



Figura 12. Cuadro eléctrico para mando manual.

Estas dos partes de este subsistema, sistema electrónico de control y caja eléctrica de accionamiento para mando manual, están conectados entre sí tal y como se muestra en la Figura 13.



Figura 13. Montaje del subsistema de control electrónico y eléctrico en el prototipo real.

Para activación de las electroválvulas que accionan el arco de seguridad tanto en modo automático como manual y la activación de la alarma se han empleado relés de estado sólido ya que son más robustos y rápidos que los relés convencionales (electromecánicos).

Se llama relé de estado sólido a un circuito híbrido, normalmente compuesto por un optoacoplador que aísla la entrada, un circuito de disparo, que detecta el paso por cero de la corriente de línea y un triac o dispositivo similar que actúa de interruptor de potencia. Su nombre se debe a la similitud que presenta con un relé electromecánico; este dispositivo es usado generalmente para aplicaciones donde se presenta un uso continuo de los contactos del relé que en comparación con un relé convencional generaría un serio desgaste mecánico, además de poder conmutar altos amperajes que en el caso del relé electromecánico destruirían en poco tiempo los contactos. Estos relés permiten una velocidad de conmutación muy superior a la de los relés electromecánicos.

### 1.3.3.2. Sistema mecánico antivuelco

El sistema mecánico antivuelco implementado en el dispositivo de seguridad, consiste en la utilización de un arco abatible manualmente al que se le han incorporado unas abrazaderas que lo unen al sistema hidráulico, el motivo de este sistema de unión por medio de abrazaderas es porque la normativa de homologación de este tipo de vehículos no permite la existencia de uniones roscadas o soldadas a la estructura de partida.

En la Figura 14 se puede ver como la estructura de amarre soporta tanto al cilindro hidráulico como al arco de seguridad. Los dos cilindros hidráulicos están colocados a 45° de la horizontal, lo que permitirá cambiar el arco de posición desde la horizontal (reposo) a la vertical (trabajo). El sistema, una vez activado no podrá cambiar de posición por causa del vuelco.

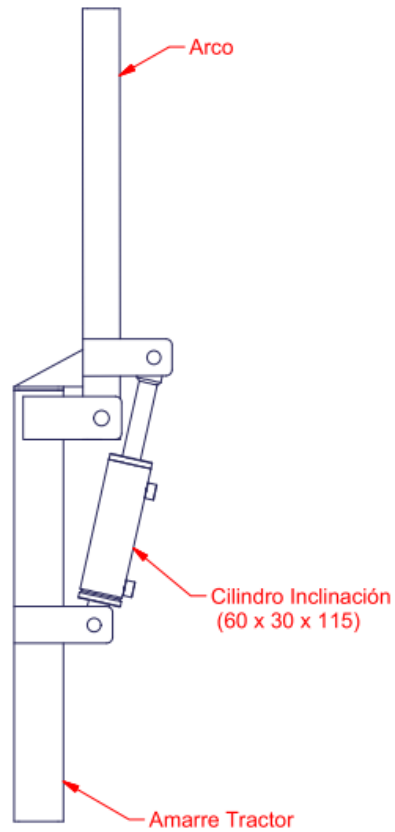


Figura 14. Estructura soporte del arco, cilindro hidráulico y arco de seguridad.

En las Figuras 15 y 16 se muestran dos esquemas de detalle de los componentes del arco de seguridad y su sistema de anclaje al tractor.

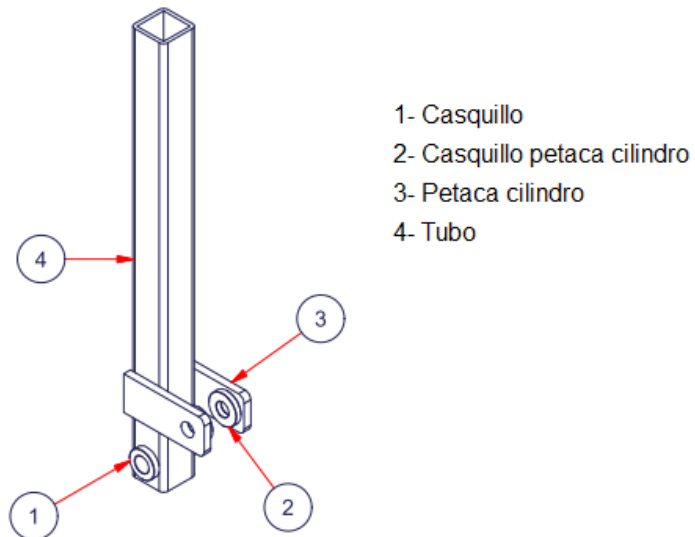


Figura 15. Vista en perspectiva del tubo del arco de seguridad.



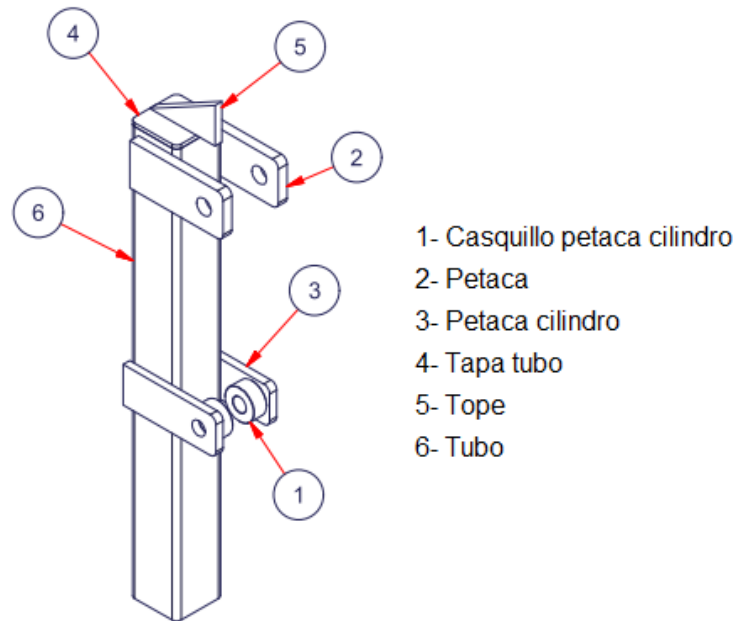


Figura 16. Amarre arco-tractor.

### 1.3.3.3. Sistema hidráulico de accionamiento del arco

Por último se describe el desarrollo del sistema hidráulico para accionamiento del arco. El sistema hidráulico de un tractor es uno de los elementos más importantes que lo componen, ya que, por una parte, permite un control preciso de los aperos que se enganchan en el tripuntal, auxilia el control de la dirección y otros elementos del tractor, mientras que, por otra, ofrece una energía que puede ser utilizada en máquinas y aperos accionados por el tractor, simplificando considerablemente la transmisión del movimiento respecto a lo que ofrecen los sistemas mecánicos.

En todos los vehículos tractores en los que sea posible se aprovechará el sistema hidráulico ya existente para el accionamiento del arco mediante el dispositivo de seguridad implementado, en casos particulares en los que bien el tractor sea muy antiguo y la potencia escasa o bien las demandas de potencia estén colmadas por otras actividades previstas para el equipo, se plantea una solución autónoma que incluye una central de presión independiente como se muestra en la Figura 17.



Figura 17. Sistema hidráulico autónomo.

Las características del grupo hidráulico los las siguientes:

- Tensión: 12v
- Potencia: 800w
- Capacidad del depósito: 2,5 litros
- Caudal máximo: 16 l/min
- Presión máxima: 180 bar

Este grupo hidráulico, como unidad de alimentación, proporciona la energía requerida por la instalación hidráulica para accionar el dispositivo de seguridad. Sus componentes más importantes son el tanque, el motor eléctrico, la bomba hidráulica, la válvula limitadora de presión, el filtro y el refrigerador, y también puede ser el soporte de otros dispositivos como manómetros o válvulas distribuidoras si fuera necesario.

En este caso se trata de un grupo hidráulico compacto para su posible inclusión en cualquier montaje. Se ha optado por este montaje ya que ofrece multitud de ventajas a la hora de hacer una instalación de cara a una posible industrialización ya que permite conocer de antemano el comportamiento del sistema independientemente del modelo, marca o versión de vehículo en el que se pretenda instalar. En contraposición cabe señalar que hay una pérdida sustancial de cauda en el sistema y que ocupa un volumen no muy alto pero al que el resto de componentes ha de adaptarse puntualmente en cada instalación independientemente.

El funcionamiento del sistema se basa en que el caudal impulsado por la bomba vence la resistencia que oponen a su paso los cilindros del sistema hidráulico, siempre que la presión no supere un determinado límite impuesto, por lo que puede ser una válvula de seguridad o dispositivo equivalente, y suministra la potencia hidráulica para accionarlos.

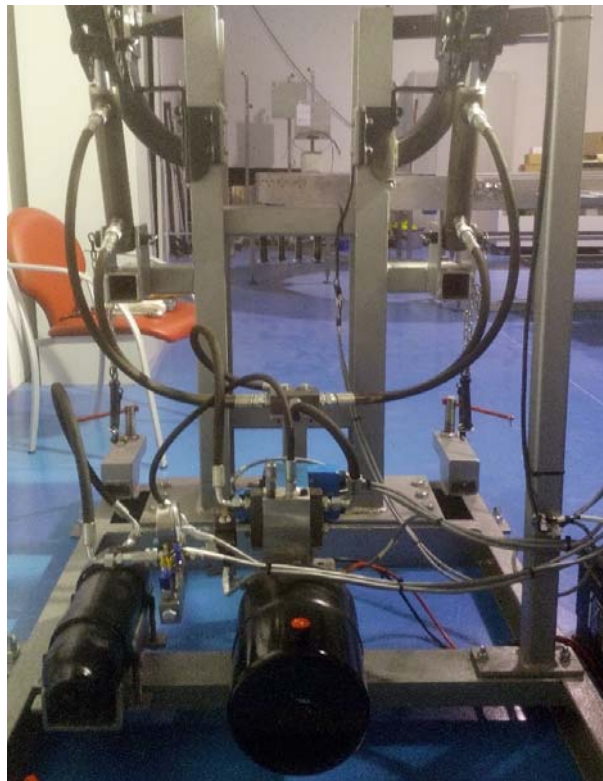
El producto del caudal de la bomba por la presión a la que trabaja el sistema es lo que se denomina potencia hidráulica, que lógicamente es una transformación de la potencia mecánica que procede del motor. La potencia hidráulica aumenta a



medida que lo hace el caudal que impulsa la bomba, pero también con la presión máxima que lo hace trabajar.

La solución cuenta con un depósito que contiene el aceite, el cual puede ser autónomo o estar integrado en el diseño previo del tractor, en cuyo caso también se puede utilizar para la lubricación de los engranajes, una bomba impulsora, que puede ser de engranajes o de pistones axiales o radiales, accionada por un eje en conexión directa con el motor, o con la transmisión de la toma de fuerza, una válvula limitadora de la presión máxima del aceite en el sistema, o un dispositivo equivalente que modifica el caudal de impulsión de la bomba en función de la presión, un conjunto de válvulas para controlar la apertura y cierre de los pasos de aceite a los cilindros. Electroválvula de 3 posiciones para subida y bajada del arco de seguridad y electroválvula de 2 posiciones para carga de un sistema acumulador, un presostato o interruptor de presión que cierra o abre un circuito eléctrico dependiendo de la lectura de presión del fluido.

El fluido ejerce una presión sobre un pistón interno haciendo que se mueva hasta que se unen dos contactos. Cuando la presión baja un resorte empuja el pistón en sentido contrario y los contactos se separan. Un tornillo permite ajustar la sensibilidad de disparo del presostato al aplicar más o menos fuerza sobre el pistón a través del resorte. Usualmente tienen dos ajustes independientes: la presión de encendido y la presión de apagado y un actuador formado por uno o varios cilindros de simple o doble efecto. En este caso dos cilindros de doble efecto.



*Figura 18. Conjunto hidráulico y sus conexiones.*

Es de vital importancia en este diseño la seguridad. Ésta se consigue con dos elementos:



- a) Un acumulador que es un depósito capaz de almacenar una cierta cantidad de fluido con presión, para auxiliar al circuito hidráulico en caso de necesidad. Los supuestos casos de necesidad para este diseño son:
1. Restituir. Compensar pequeñas pérdidas de fluido en el circuito.
  2. Reserva. Al poder mantener una presión, pueden servir de reserva de energía.
  3. Seguridad. Para evitar accidentes por interrupciones súbitas del generador de potencia.

El fluido al entrar dentro de un acumulador comprime un gas, el acumulador puede almacenar el fluido bajo una presión. Existen varios tipos de acumuladores, los más usados son los de membrana y los de vejiga.

- b) Una válvula antirretorno con doble pilotado que se ha utilizado para bloquear en posición los cilindros de doble efecto en ambas direcciones y que éstos sean insensibles a las fuerzas externas una vez el arco de seguridad esté levantado (con esto se impide que el conductor del tractor sea atrapado bajo el mismo una vez haya volcado).

El estudio de los requerimientos hidráulicos de cada sistema es de gran importancia en términos de seguridad, ya que el momento de accionamiento del arco ha de ser anterior al momento en el que el vuelco alcance 90 grados. Por esto se viene desarrollando en paralelo a este trabajo un proyecto en el que se ensayan distintas configuraciones (Cilindro - central hidráulica – acumulador) para medir en cada caso el tiempo necesario de activación.

#### 1.4. Programas de diseño gráfico y simulación

La expresión gráfica ha sido una herramienta necesaria para el desarrollo del diseño industrial. En los últimos 30 años ha protagonizado cambios sustanciales en lo técnico, lo tecnológico y en lo metodológico.

El diseño es un proceso analítico, técnico y creativo que nos lleva a determinar un producto concreto.

La expresión gráfica es de relevancia especial para el diseño en la ingeniería. Una definición muy extendida del término que recoge muy bien su concepto es: “disciplina que comprende todas las técnicas de comunicación gráfica usadas para transmitir ideas y conceptos, básicamente en el contexto de la ingeniería”.

En la Figura 19 se muestra la distribución de las tareas en ingeniería y vemos la gran importancia que tiene la parte gráfica en el proceso global.

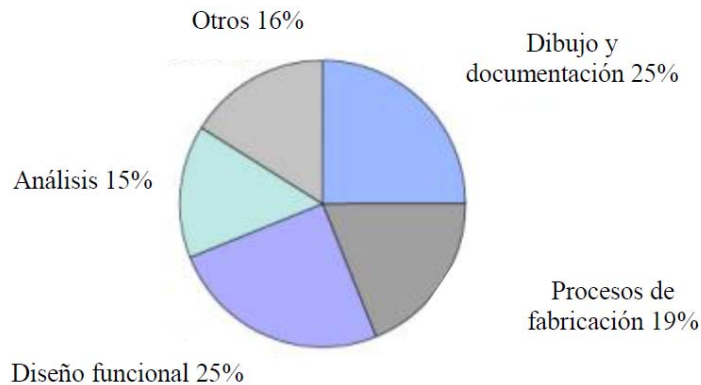


Figura 19. Representación de las distintas fases de la ingeniería.

La principal tecnología que ha impulsado la expresión gráfica, ha sido el desarrollo de programas informáticos CAD (Computer Aided Design, diseño asistido por ordenador).

Ya es una realidad la existencia de modelos que conciben el producto como susceptible de ser gestionado de forma digital en todo el transcurso de su proceso, desde la generación hasta la puesta en el mercado.

#### 1.4.1. Modelado y diseño 3D

Existen numerosos programas de diseño utilizados en distintos ámbitos de la ingeniería, tales como CATIA, SolidWorks, AutoCAD, SolidEdge o Blender. El primer paso ha sido por tanto establecer cuál de ellos es el más adecuado para satisfacer el objeto del proyecto. El problema de la elección ha estribado en la necesidad de que estos softwares permitan la parametrización y sean capaces de realizar las simulaciones o en caso contrario sean fácilmente exportables a otro software que las realice.

Para el modelado de cada una de las piezas que conforman el tractor y su posterior ensamblaje, se ha utilizado el software de la compañía Dassaults Systemes, CATIA V5, aunque el modelado y ensamblaje se pueden llevar a cabo con cualquier software de diseño, éste responde adecuadamente a las necesidades de modelado 3D de conjunto planteadas.

CATIA (computer-aided three dimensional interactive application) es un programa de diseño integral cuyo objetivo es crear una solución de diseño de productos a todos sus niveles: CAD, CAM, CAE, KBE, PDM (diseño, mecanizado, cálculo de estructuras, gestión del conocimiento, gestión del producto).

CATIA se ofrece al usuario en un entorno modular que intenta satisfacer las necesidades de todos sus clientes. La configuración más empleada está formada por los módulos:

- Sketcher (generación de perfiles 2D).
- Part Design (creación de sólidos).
- Assembly (realización de ensamblajes).
- Wireframe and Surface Design (creación de superficies).
- Drafting (elaboración de planos).

El programa permite parametrizar fácilmente los productos, pero carece de módulo de simulación dinámico propio.



Por ello, tras el modelado con Catia V5, el software escogido para la realización posterior de las simulaciones estudiadas en este trabajo ha sido SolidWorks.

SolidWorks pertenece a la misma empresa que CATIA, pero ofrece una interfaz más moderna e intuitiva y por tanto más sencilla de utilizar. Además en su versión Premium incluye un módulo para la simulación dinámica, SolidWorks Motion (en las versiones anteriores a SolidWorks 2008 este módulo era llamado CosmosMotion).

Este módulo de simulación fue utilizado en el estudio del vuelco en vehículos pequeños realizado por Silsoe Research Institute (Operator roll-over protection on small vehicles).

Al haberse utilizado CATIA como software de diseño y SolidWorks Motion para la simulación, se ha prestado especial atención a la prevención y solución de problemas que se hayan podido presentar por compatibilidades entre los programas en cuestión.

#### 1.4.2. Simulación de comportamiento mecánico

La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias - dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos - para el funcionamiento del sistema.

En la actualidad hay una búsqueda constante de simular lo real. «Copiar el mundo para conseguir trabajar sin el mundo, reduciendo las complejidades de nuestro entorno a un modelo que lo represente pero que sea al mismo tiempo manejable».

La simulación de procesos de producción puede llevarse a cabo con la intención de volver a utilizar los procesos de conocimiento y optimizar antes de que los productos se fabriquen. Por ejemplo, la fabricación digital también permite la retroalimentación de las operaciones de producción real al ser incorporadas en el proceso de diseño del producto, permitiendo a las empresas aprovechar las realidades de la planta durante la etapa de planificación. La fabricación digital permite ejecutar los procesos de producción con acceso en tiempo real a los datos del ciclo de vida.

El fin de este proyecto es elaborar una simulación que permita obtener datos dinámicos para analizar las condiciones de vuelco y la influencia de los sistemas de seguridad en el vuelco, así como el estudio de la efectividad de estos sistemas como medida de protección.

SolidWorks Motion es un software de simulación y análisis cinemático y dinámico de mecanismos totalmente integrado a SolidWorks, ya que se ejecuta desde su misma interfaz.

Dicho software permite dotar a los ensamblajes de:

- Gravedad.
- Contactos entre componentes con diferentes propiedades de fricción y choque elástico.
- Motores.
- Fuerza.
- Amortiguadores y resortes.



De esta forma SolidWorks Motion permite crear un modelo virtual de su sistema mecánico y verificar el correcto funcionamiento del mismo antes de su construcción. Esto significa una reducción importante en el número de prototipos físicos a construir y acelera el ciclo de desarrollo del producto. Además, permite entender el funcionamiento de su diseño sin necesidad de crear ningún prototipo físico.

El análisis de movimiento de SolidWorks Motion utiliza ADAMS como motor de cálculo, un software de análisis dinámico y cinemático utilizado para vehículos, lo cual es muy útil para el proyecto. El motor de ADAMS puede analizar el complejo comportamiento de ensamblajes mecánicos, realizando cálculos precisos de fuerzas, momentos, fuerzas de contacto...

Para su ejecución, en primer lugar han de definirse las relaciones de posición, contactos, fuerzas y actuadores. A continuación ha de ejecutarse el cálculo del movimiento y finalmente podrá obtenerse una animación de la simulación obtenida y los gráficos y datos de la simulación, como:

- Posición.
- Velocidad lineal y angular.
- Aceleración lineal y angular.
- Fuerzas de contacto.

Todo ello permite recrear un entorno en el que es posible observar al tractor en movimiento en diferentes situaciones hasta que se produzca el vuelco.

Por todos estos motivos se ha considerado este software como el más apropiado para el proceso de simulación del presente trabajo.



## 2. OBJETIVOS

Este trabajo tiene como objetivo validar el uso de técnicas de modelado y de simulación dinámica computacional para llevar a cabo ensayos del comportamiento ante el vuelco de un ROPS desplegable automáticamente construido para tractores agrícolas.

Para ello se han tenido que desarrollar, empleando técnicas de modelado, el tractor en sí y la superficie de ensayo donde éste se desplaza para posteriormente proceder a la simulación dinámica por ordenador de escenas cuya consecuencia final sea el vuelco lateral del tractor. Se han realizado las mismas experiencias con ensayos de vuelco real utilizando una maqueta del tractor y la superficie de ensayo construida a escala 1:16.

El objetivo principal del trabajo se concreta en los siguientes objetivos particulares:

1. Desarrollar simulaciones que permitan obtener datos dinámicos para analizar las condiciones que llevan al vuelco del vehículo.
2. Desarrollar escenas reales de desplazamiento del tractor por una superficie de revolución.
3. Comprobar la influencia de los sistemas de seguridad, así como el estudio de la eficacia de estos sistemas como una medida de protección del conductor.
4. Comparar los resultados obtenidos por ambos métodos de ensayo.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Descripción de la maqueta de tractor empleada en los ensayos

Existe una gran variedad de maquetas de tractores agrícolas en el mercado. La mayoría de estas maquetas están construidas a escala 1:32. Es menos frecuente encontrar modelos a escala 1:16. Se ha elegido esta escala ya que es mucho más favorable para abordar los objetivos planteados en este trabajo debido a que el tractor a ensayar ha tenido que ser modificado con el fin de incorporarle los distintos desarrollos presentados en la introducción y esto es mucho más factible cuanto mayor sea el tamaño.

Entre la amplia variedad de máquinas que se ofrecen es frecuente encontrar modelos estáticos y no lo es tanto disponer de modelos dinámicos y menos aún teledirigidos.

El modelo de tractor susceptible de vuelco y que da lugar a este tipo de accidentes es un tractor sin cabina que, debido a su ausencia, debe contar a cambio con otra estructura de seguridad antivuelco, concretamente un arco. Pues bien, dentro de la diversidad de maquetas disponibles en el mercado, desde el momento del inicio de este trabajo y hasta la fecha no se ha encontrado ninguna que cumpliera con estas características: modelo suficientemente grande, mínimo a escala 1:16, teledirigido, que disponga de arco antivuelco y que se le pueda incorporar el desarrollo de accionamiento patentado.

Dado que ninguna maqueta cumplía con las especificaciones mencionados, tras analizar las distintas posibles alternativas existentes se ha optado por un modelo New Holland T6070 R/C original a escala 1:16. Este modelo de tractor, se acciona por radiocontrol pero se comercializa con cabina. En la Figura 20 se muestra el modelo de tractor comercial adquirido.



Figura 20. Tractor RC New Holland T6070.

A partir de esa máquina, se ha procedido a desmontar la cabina, se han incorporado el arco antivuelco y todo el conjunto mecanismo de accionamiento automático antivuelco.





### 3.2. Selección de programas para diseño y simulación

Uno de los métodos más poderosos y útiles para el estudio de la estabilidad y el comportamiento dinámico del tractor es la simulación por ordenador, esta herramienta es particularmente útil en la predicción de cómo un tractor responderá a las perturbaciones externas provenientes de la interrelación entre sus condiciones de trabajo impuestas (velocidad, giro, aceleración) y las condiciones del terreno por el que transite. La simulación también es considerada el mejor método para el análisis de la influencia de los parámetros del tractor sobre la seguridad y el rendimiento (Kim y Rehkugler, 1987).

De entre los programas de diseño que se presentaron en la introducción, como allí se expuso, se ha elegido CATIA V5 para el modelado de la maqueta del tractor, por otra parte, debido a que para el proceso de simulación el software empleado ha sido SolidWorks, se ha modelado en él la superficie de ensayo y se ha importado el modelo de la maqueta del tractor por ser aquella solución capaz de integrar todas las necesidades planteadas en los objetivos del proyecto.

El modelo de simulación desarrollado para este trabajo se ha basado en la utilización del programa SolidWorks 3D, una vez importado a él el modelo de tractor a escala realizado en CATIA y modelada la superficie de ensayo directamente, en combinación con el software de simulación dinámica SolidWorks Motion. Para el análisis de movimiento se ha utilizado ADAMS como motor de cálculo como también se ha indicado en la introducción.

La combinación de los distintos software ha permitido realizar las tareas de:

- (1) modelar las piezas.
- (2) ensamblar las piezas.
- (3) parametrizar piezas y conjuntos.
- (4) modelar superficies.
- (5) representar imágenes y animaciones (incluyendo simulaciones) y así.
- (6) obtener las propiedades físicas de las piezas y conjuntos (masa, centro de gravedad y momento de inercia).
- (7) modificar estas propiedades de acuerdo con las necesidades planteadas.

SolidWorks Motion es una herramienta de análisis de cuerpo rígido; por lo que se ha interpretado cada parte mecánica o subconjunto producido en el modelador de SolidWorks como un cuerpo rígido.

ADAMS es un software de análisis dinámico y cinemático utilizado para investigar la estabilidad del vehículo, que es particularmente útil para este proyecto. El motor de cálculo de ADAMS puede analizar el comportamiento complejo de conjuntos, la mecánica, la realización de cálculos precisos de las fuerzas, momentos, las fuerzas de contacto, etc.

### 3.3. Modelado de un tractor a escala 1:16

El modelo se ha construido mediante la definición de tantos grupos como se han considerado necesarios para que se cumplieran las restricciones entre ellos de forma que permitieran describir correctamente la manera en la que pueden moverse unos elementos del tractor respecto a los otros.

Los pesos, fuerzas, movimientos y el centro de gravedad se han calculado e introducido después de construir el modelo.

En este trabajo de modelado, se han consignado las condiciones del movimiento y los criterios para la animación de la simulación.





Con estos criterios bien desarrollados se han podido plantear métodos de trabajo en los que se han podido obtener resultados e información gráfica sobre:

- (1) ubicación relativa en cada instante.
- (2) velocidad lineal y velocidad angular.
- (3) aceleración lineal y angular.
- (4) fuerzas de contacto.

El control y la medida de estos parámetros hace posible crear tantos escenarios como sea necesario para observar el tractor en movimiento en muy diversas situaciones y comprobar su comportamiento hasta el instante del vuelco y posterior al mismo, lo cual es muy interesante para verificar la eficacia del arco de seguridad ROPS.

### 3.4 Modelado de la superficie de ensayo

Para el ensayo, se han tomado como fuente de inspiración las aportaciones del trabajo de (Scarlett et al., 2006) y se ha decidido construir una superficie de revolución tal que, partiendo de una posición horizontal, se ha ido elevando un grado de inclinación por cada metro lineal de avance en la dirección del movimiento, de modo que transcurridos  $x$  metros de desplazamiento, el tractor se encontraría inclinado lateralmente  $x$  grados.

Como los ensayos reales se han realizado con una maqueta a escala 1:16, se ha sometido también a la maqueta de la superficie de ensayo a las mismas condiciones de escala 1:16.

Para el modelo de tractor real, la longitud de la rampa modelada resultó de 60 metros y el ángulo final de 60 grados mientras que la superficie necesaria para realizar el ensayo con la maqueta del tractor a escala se ha tomado como punto de partida una longitud de 50 metros de esa rampa que ha sido escalada a 1:16 resultando su longitud total de 3,125 metros y siendo la elevación de la rampa de un grado por cada 6,25cm ( $1\text{m}=100\text{cm} /16=6,25\text{cm}$ ), por tanto la elevación total es de 50 grados.

Con el objetivo de que la superficie de ensayo modelada represente fielmente a la rampa construida como maqueta donde ensayar el recorrido y vuelco del tractor real a escala 1:16, se ha incorporado a la misma un sistema de guiado (Fig. 21) para evitar el desplazamiento lateral que previsiblemente se produciría en el ensayo.

El sistema de guiado que ha sido añadido a la rampa, consiste en un rail intermedio para evitar el vuelco prematuro del tractor a escala, debido al deslizamiento entre las ruedas del lateral izquierdo y la base de la superficie.

En ensayos realizados en proyectos previos, este rail seguía la curvatura de la superficie de ensayo, pero en las simulaciones, el lateral izquierdo giraba del mismo modo que la rampa, dando lugar a fallos, por lo que se ha modificado el rail para que sea recto y esto no ocurra.

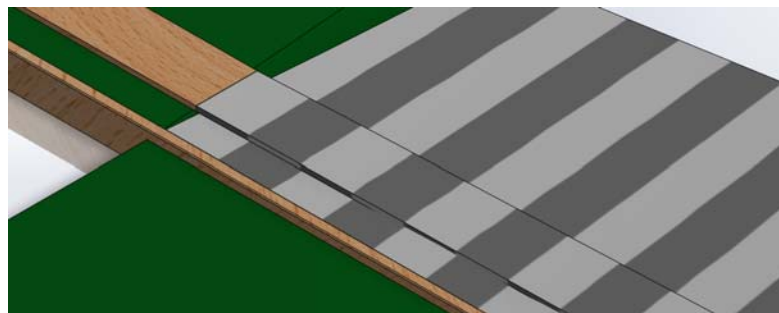


Figura 21. Sistema de guiado incorporado a la rampa.



### 3.5. Construcción de la superficie de ensayo

Para construir la superficie del ensayo, se han empleado materiales clásicos en la construcción de maquetas. La principal dificultad de la fabricación de esta plataforma ha radicado en que se trata de una superficie de revolución que, como se ha comentado en el apartado anterior, partiendo desde la horizontal, aumenta su inclinación un grado por cada 6,25 cm que se avanza en la dirección del ensayo con el único fin de producir en algún punto el vuelco lateral del tractor. La información disponible de los ensayos estáticos y la procedente de los ensayos de simulación hacía sospechar que el vuelco se habría de producir antes de que la inclinación superase los 50 grados. Por ello la maqueta de esta superficie se ha limitado a los 50 grados que se traducen en una longitud de 312,5 cm. La superficie de revolución se debía acompañar a todo lo largo de una superficie horizontal suficientemente ancha para recoger el tractor en su caída, además de poder visualizar el vuelco y, una vez éste se produjera, los puntos de contacto entre el tractor y la horizontal, algo que es totalmente necesario para comprobar la eficacia del dispositivo de seguridad ensayado. Antes de la superficie de ensayo también es necesario disponer de un tramo de superficie horizontal para que el tractor alcance, antes de iniciar el experimento, la velocidad deseada, este espacio es de 24,5 cm lo que supone que la maqueta tenga un largo de 337 cm y un ancho de 100 cm de longitud.

Dada la dificultad para fabricar esta superficie con técnicas tradicionales de conformado de chapa o fabricación mecánica y conocida la idoneidad de las técnicas de fabricación aditiva para este tipo de sólidos, en un primer momento se pensó en la posibilidad de prototipar mediante esta técnica, en material ABS plus, todo el sólido resultante del modelo de plataforma creado. La idea fue descartada de inmediato al calcular los costes de material y el tiempo de fabricación necesarios para la construcción.

Decidido lo anterior, se ha optado por otra forma de construcción que aprovecharse las ventajas de la fabricación aditiva reduciendo sus costes. Así mismo, se ha decidido construir el sólido en tres partes: una estructura horizontal sobre la que se apoyarían, cada cierta distancia, unas cuadernas con la base plana y con la forma de la superficie de revolución adecuada al lugar en la que se encontrasen dentro del conjunto diseñado y una lámina de material suficientemente flexible para que, una vez unido a las cuadernas, adoptase la forma descrita y lo bastante rígido para soportar el peso del tractor sin deformarse en los tramos al aire entre cuaderna y cuaderna.

Para el acabado del conjunto se han empleado revestimientos de pintura de dos colores que han servido para medir e identificar mejor el momento del vuelco, de forma semejante a lo realizado en el modelo y de materiales que aportasen rugosidad a la superficie para facilitar el contacto con las ruedas del tractor. Puesto que la conducción del vehículo ha sido teledirigida y la dirección es muy difícil de mantener en esas condiciones se ha incluido sobre la superficie inicial elementos de guiado, también en consonancia con lo realizado en el modelado de esta superficie de ensayo.

#### 3.5.1. Impresora 3D modelo Dimension bst 1200es

La impresora 3D Dimension bst 1200es (mostrada en la Figura 22) basa su sistema de trabajo en la tecnología de construcción aditiva FDM (Fused Deposition Modeling) ó deposición de material fundido, se trata de una técnica de construcción aditiva de las más sencillas entre las opciones que existen para hacer prototipos.



Las características de esta impresora 3D quedan resumidas de la siguiente forma:

- Área de trabajo: 254 x 254 x 305mm (efectiva 250 x 250 x 300mm)
- Material empleado: ABSplus
- Color de Material: Blanco, marfil, rojo, azul, negro, gris, naranja, amarillo y verde
- Soporte: Breakaway (BST). Se desprende por medios mecánicos.
- Espesor de capa: 0,254mm ó 0,330mm
- Interfaz: LAN/Ethernet TCP/IP
- Sistema Operativo: Windows XP/Vista/Seven



Figura 22. Impresora 3D modelo Dimension bst 1200es

Estos sistemas calientan un hilo de termoplástico que puede ser de diferentes materiales (ABS, PC, PLA, PCABS...), en el caso de la Dimension bst 1200es, el material utilizado es el ABS Plus (acrilonitrilo-butadieno-estireno con mejora de sus características mecánicas y térmicas, de ahí la denominación Plus) y lo extruyen por aumento de temperatura a través de una boquilla situada en un cabezal (Fig. 23). Este cabezal va depositando el material extruido por la boquilla en capas de espesor variable según la resolución de la máquina, la empleada en este trabajo puede depositar capas desde 0,254mm en su mejor resolución a 0,33mm en resoluciones que no precisen grandes tolerancias. Capa por capa, la máquina va imprimiendo aumentando la altura de las piezas en fabricación hasta completar los prototipos.

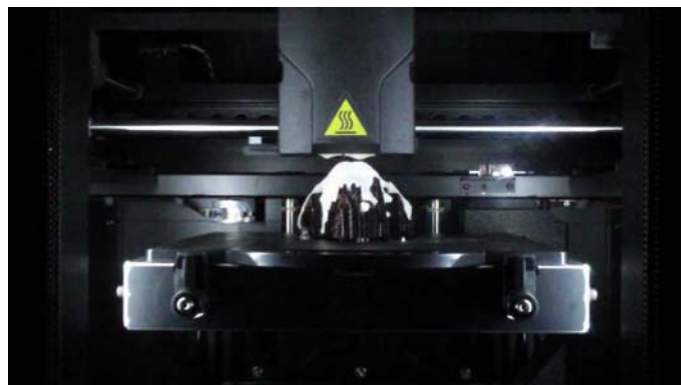


Figura 23. Cabezal y boquillas de la Impresora 3D modelo Dimension bst 1200es



Para sustentar las zonas en voladizo de la pieza, la máquina deposita un segundo material de soporte que se elimina por medios mecánicos en el caso de esta impresora 3D, pero que puede ser soluble en otras máquinas que también funcionan con esta misma tecnología.

De esta forma se obtienen prototipos funcionales realizados en materiales termoplásticos, excelentes para ensayos y montajes e incluso algunos materiales, como es el caso que nos ocupa, con una resistencia a altas temperaturas (200°C), y que dependiendo de la función del objeto prototipado a cumplir dentro de su ensamblaje o posición de funcionamiento, puede comportarse como pieza final. Tal y como ha ocurrido con las piezas obtenidas por tecnología FDM, con la impresora 3D bst 1200es en ABS Plus, mediante la impresión de los archivos .stl generados a partir del diseño de modelado de los soportes de la superficie de ensayo que se ha empleado para la realización de las simulaciones necesarias para alcanzar el objetivo de este proyecto.

El posible uso de las piezas creadas con impresión 3D como piezas funcionales, se denomina técnicamente Direct Digital Manufacturing (Fabricación Directa Digital).

Este término surge debido a que en los últimos años, la tecnología de fabricación aditiva ha migrado de su uso en el prototipado rápido para convertirse en una solución completa de fabricación (DDM). Si bien el concepto general de fabricación aditiva es el mismo que cuando se introdujo hace 20 años, el cambio es en su uso previsto: producción, no sólo prototipos. Así, mientras el concepto ha existido durante un tiempo, el DDM es algo nuevo y un poco más difícil de entender.

DDM es el proceso de utilización de CAD o de otros datos (por ejemplo, datos de un escáner 3D) para manejar una pieza de fabricación aditiva que fabrique piezas usables. Con esta técnica se elimina el moldeo, mecanizado, fundición, etc. Gracias a ello, el DDM puede reducir en grandes cantidades el coste de un proyecto.

Para ser más exactos, el DDM es un proceso, no una tecnología que elimina:

- La inversión en maquinaria.
- El tiempo de retraso entre el diseño y la producción.
- Las restricciones de diseño.
- El perjuicio económico de un rediseño.
- Los mínimos de tamaño del lote.

Es adecuado para una producción de bajo volumen, y no para producción en masa, pero facilita la producción masiva produciendo herramientas para la manufactura, como plantillas, dispositivos, accesorios, medidores y herramientas de mano.

Las piezas creadas por fabricación aditiva como soporte de la superficie de ensayo, exceden las dimensiones máximas de la máquina disponible (250 x 250 x 300mm) por lo que han tenido que rediseñarse en forma de ensamblaje de dos o tres piezas que incorporan huecos y salientes para facilitar su posterior montaje y unión y ser de esta forma más operativas.

### 3.5.2. Fabricación de soportes para conformar la superficie de ensayo mediante impresión 3D

El aspecto más determinante de la construcción de la maqueta ha sido conseguir que, a partir de una superficie plana se conformase la superficie de revolución anteriormente descrita. Para ello se ha optado por la fabricación de unas cuadernas obtenidas



seccionando el sólido formado en dirección perpendicular a la del ensayo y extrayendo de él algunos tramos de 3 cm de ancho.

De todas esas nuevas piezas obtenidas se han elegido las que corresponden con las inclinaciones de 7,5 – 15 – 22,5 – 30 – 37,5 – 40 - 45 y 50 grados.

Antes de su construcción, dado que sus dimensiones excedían de las máximas posibles (25cm x 25cm x 30cm) de la impresora 3D disponible, se han tenido que dividir a su vez las citadas piezas con el fin de que pudieran ser construidas en la misma. Esta división ha supuesto también un cambio de su diseño para que las piezas resultantes pudieran encajar unas con otras perfectamente. Las cuadernas con inclinación nominal de 7,5 a 30 grados se han construido en dos piezas y las siguientes se han tenido que construir en tres piezas. Todas ellas tienen 3 cm de ancho, la inclinación en su parte central se corresponde con la nominal y tiene 14,4 minutos menos de inclinación en su inicio y 14,4 minutos más al final de los 3 cm, por tanto de un modo estricto debería decirse que cada pieza fabricada presenta una inclinación que va desde X grados-14,4' hasta X grados+14,4' siendo X el valor nominal en grados de cada cuaderna.

Una vez impresas las piezas se han ensamblado con ayuda de adhesivo y tornillos para construir cada una de las cuadernas de ABS plus que han servido como soporte de la superficie de ensayo.

La fabricación aditiva ha sido de gran importancia en este caso ya que, el acabado de la superficie superior, la que estaría en contacto con la superficie de revolución, habría sido muy complicado con cualquier otra técnica convencional.

### 3.5.3. Materiales y procedimiento empleados para la construcción de la superficie de ensayo

Para la construcción del bastidor horizontal sobre el que van apoyadas las cuadernas o piezas soporte que dan forma a la superficie de revolución que se ha usado como base para deslizar la maqueta del tractor en los ensayos, se ha empleado listón de madera de pino Canadá de sección cuadrada 40x40mm.

El bastidor tiene unas dimensiones totales de 337cm de largo (dirección de desplazamiento del tractor) y 100cm de ancho.

En dirección perpendicular al desplazamiento se han situado unas traviesas del mismo material de modo que sirvan de soporte para apoyar las cuadernas prototipadas mediante impresión 3D a las que vamos haciendo referencia. Las traviesas se colocaron a la distribución de distancias definidas desde el origen (base plana) a 71,4cm, 118,3cm, 165,2cm, 212,1cm, 259cm, 274,6cm y 305,8cm.

Para dar forma a la superficie de revolución donde desarrollar los ensayos, se ha elegido un tablero de material DM o también denominado MDF. Éste material consiste en un aglomerado elaborado con fibras de madera (que previamente se han desfibrado y eliminado la lignina que poseían) aglutinadas con resinas sintéticas mediante fuerte presión y calor en seco hasta alcanzar una densidad media, lo que le confiere las propiedades de flexibilidad y rigidez óptimas para este uso.



El modo de diseño de la maqueta ha consistido en, una vez seleccionados unos y otros materiales y construidas las piezas necesarias con cada uno de ellos, se ha procedido al ensamblaje de todo el conjunto.

En primer lugar, sobre una mesa de grandes dimensiones se ha construido el bastidor de madera utilizando tornillos para las uniones de los distintos listones, posteriormente sobre ellos se han anclado las cuadernas fabricadas en ABS, a continuación se ha atornillado sobre las cuadernas una lámina de MDF, definido anteriormente, de 3 mm de espesor, esta lámina tratada en su acabado será donde se desarrollen los ensayos, por lo que es importante que no queden resaltes ni discontinuidades en la misma, por ello, se ha avellanado su superficie para que los tornillos queden embutidos en ella y se ha enmasillado para conseguir una superficie lo más homogénea posible.

Tras ello, una vez creada la superficie en sí, se le ha unido el sistema de guiado y se ha realizado el acabado superficial final que ha consistido en la aportación de materiales que dieran color y adherencia.

### 3.6. Ensayo de vuelco real en maqueta y rampa

Una vez que se ha dispuesto de la maqueta del tractor modificada y de la superficie de ensayo construida se han programado los distintos ensayos de operación del tractor sobre la citada superficie, para ello el primer paso ha consistido en elegir cuatro velocidades distintas de desplazamiento del tractor que fueran representativas de un rango amplio de trabajo.

Para conseguir que los ensayos se pudieran desarrollar a velocidad constante ha sido necesario modificar el mando teledirigido fijando puntos en los que se suministrase la misma potencia sin que hubiera influencia del operador, este hecho ha obligado a jugar con los límites de potencia de la maqueta.

Resolver este aspecto y disponer, además del reposo, de tres velocidades constantes de ensayo ha sido determinante para poder repetir los ensayos y disponer de un valor medido tras sucesivas repeticiones.

En la Tabla 01 se muestra el diseño experimental planteado. Las velocidades ensayadas y el número de repeticiones.

Tabla 01. Condiciones de ensayo para la medida del ángulo y el tiempo de vuelco.

Parámetros	Ensayos			
	A	B	C	D
Velocidad del tractor a escala 1:16 (km/h)	0	1,25	1,88	2,50
Velocidad real (km/h)	0	20	30	40
Número de repeticiones	3	3	3	3



### 3.6.1. Cámara de alta velocidad

La cámara que se ha usado para la filmación en alta velocidad de los ensayos realizados es la disponible en el Servicio de Apoyo a la Investigación Tecnológica de la UPCT.

Se trata de una cámara de alta velocidad para uso industrial y de investigación, es marca y modelo Faster Imaging TroubleShooter TSHRMS (Fig. 24) y posee una capacidad para captar imágenes de hasta 1000 fotogramas por segundo.



Figura 24. Cámara de alta velocidad empleada en los ensayos.

Para poder captar imágenes con mayor definición esta cámara incluye un objetivo modelo Computar TV Lens de 12.5mm 1:1,3 (Fig. 25).



Figura 25. Objetivo de cámara de alta velocidad.

En la filmación de alta velocidad es de gran importancia disponer de una buena iluminación, la velocidad con la que el obturador del objetivo tiene que abrir y cerrar para la captación de imágenes hace necesario una gran cantidad de luz a parte de la luz natural o artificial que normalmente pueda existir en el lugar de la grabación. Es por ello que se hace necesario el uso de un foco de iluminación extra.

El empleado en las grabaciones realizadas en los ensayos es un foco Kaiser Videolight 6 de 1000W (Fig. 26) y se orienta para iluminar la zona que se precisa filmar con la cámara de alta velocidad.



Figura 26. Foco de iluminación 1000W.

La Cámara de alta velocidad del SAIT, obtiene archivos muy pesados con mucha información, ya que contienen muchos fotogramas y por lo tanto ocupan mucha memoria. Por ello, de forma alternativa, también se han realizado grabaciones con la cámara de video incluida un dispositivo móvil S7, que dispone de opciones de grabado a mayor velocidad que la convencional. Aunque no puede llegar a considerarse de alta velocidad, estas grabaciones captan suficientes fotogramas por segundo como para poder analizarlos y evaluar lo sucedido en los ensayos ayudando a ilustrar y conocer el comportamiento del conjunto rampa-tractor durante el desarrollo de los ensayos.

La Cámara de video del dispositivo móvil modelo S7, consta de Autofocus, flash LED con ISOCELL, foco táctil, estabilizador de imagen, HDR, captura simultánea y sus características Técnicas son:

- Resolución de Grabación de Vídeo UHD 4K (3840 x 2160) a 30fps (16:9)
- Sensor de 16 Megapíxeles CMOS (S5K2P2) con un tamaño de 1/2,6 pulgadas (el tamaño de píxeles es de 1,1 $\mu$ m). En cuanto a la óptica es equivalente a 31 milímetros, y su apertura máxima es de f/2,2.

La función denominada Slow Motion (cámara lenta) aun refiriéndose a una funcionalidad de grabación a alta velocidad (al menos más alta que los 30fps habituales en cámaras convencionales), de esta cámara de video del dispositivo móvil modelo S7, ha permitido obtener videos con las siguientes características:

- SLOW MOTION
- Velocidad de Grabación: 120 Fps (4 veces más frames que los que el ojo humano es capaz de ver en un segundo)
- Resolución 1280x720
- Velocidad de reproducción: 1/4 de la velocidad real





### 3.6.2. Medición del ángulo de vuelco en función de la velocidad

Para la medición del ángulo de vuelco se ha filmado cada uno de los ensayos situando la cámara de alta velocidad descrita en el apartado 3.6.1 en posición perpendicular a la dirección del desplazamiento. Se ha elegido una velocidad de grabación de 120 fps.

Se ha realizado cada uno de los experimentos a las cuatro velocidades ensayadas por triplicado y se ha analizado el video resultante para identificar el momento exacto en que se inició el vuelco.

La escala representada en la maqueta sirvió para determinar el momento exacto del inicio del vuelco.

### 3.6.3. Medición de tiempos de vuelco con cámara de alta velocidad en ensayo real

Para la medición del tiempo de vuelco se ha procedido del mismo modo que en apartado 3.6.2, filmando cada uno de los ensayos con la cámara de alta velocidad en posición perpendicular a la dirección del desplazamiento a una velocidad de grabación de 120 fps.

Se ha realizado cada uno de los experimentos a las cuatro velocidades ensayadas por triplicado y se ha analizado el video resultante para identificar el momento exacto en que se inició el vuelco. La velocidad real de los ensayos se ha recalculado tras el análisis de los videos tomados.

Para determinar el momento final del vuelco se ha elegido el primer fotograma en que se ha apreciado el contacto entre el arco de seguridad desplegado y la superficie horizontal contigua a la superficie de revolución.

### 3.6.4. Medición del ángulo de activación del arco con cámara de alta velocidad en ensayo real

Para la medición del ángulo de activación del dispositivo automático de despliegue del arco, se ha procedido del mismo modo que en los apartados 3.6.2 y 3.6.3, filmando cada uno de los ensayos con la cámara de alta velocidad en posición perpendicular a la dirección del desplazamiento a una velocidad de grabación de 120 fps.

Se ha realizado cada uno de los experimentos a las cuatro velocidades ensayadas por triplicado y se ha analizado el video resultante para identificar el momento exacto en que se inició la activación. La activación del arco estaba programada según se describió en el apartado 1.3.3.1. Esta medición ha sido de gran importancia puesto que ha permitido someter a la maqueta con el controlador electrónico para verificar la utilidad del dispositivo de seguridad desarrollado.

Para determinar el ángulo de activación del arco se ha elegido el primer fotograma en que se ha apreciado el desplazamiento del arco de su posición de reposo. La finalización de la activación se ha determinado identificando el primer fotograma en el que se aprecia el arco de seguridad desplegado. Conocidos los números de ambos fotogramas y la velocidad de grabación se determinó el tiempo empleado por la maqueta para el despliegue del dispositivo de seguridad.

### 3.7. Simulación del comportamiento del sistema en vuelco lateral

Finalizado el diseño en SolidWorks del tractor y de la superficie de ensayo descritos en los apartados 3.3 y 3.4 respectivamente, se han programado las simulaciones de modo que se recogieran situaciones virtuales semejantes a las descritas en el apartado 3.6 con el fin de poder comparar los comportamientos reales y las simulaciones. Por tanto, se han elegido tres valores de velocidad de desplazamiento del tractor virtual semejantes a las de la maqueta.

Fijados los distintos parámetros necesarios para llevar a cabo cada ensayo se han lanzado las simulaciones con tiempos de cálculo que, en todos los casos superaron las 24 horas, soportadas en un equipo dotado con un procesador i7.

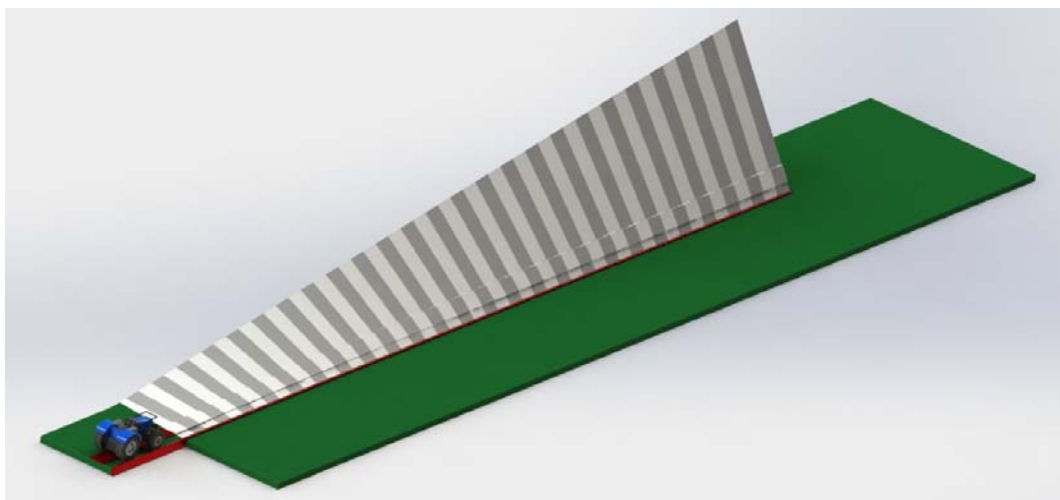
Se han elegido las velocidades de ensayo de modo que se asemejaran lo más posible a los planteados en el apartado 3.6. En cualquier caso, dado que las velocidades de ensayo con la maqueta fueron fijadas de nuevo tras la modificación realizada sobre el mando teledirigido se han lanzado las simulaciones a valores lo más semejantes posible a aquellos con el fin de poder comparar posteriormente ambos procedimientos.

En la Tabla 02 se muestra el diseño experimental planteado y las velocidades ensayadas.

*Tabla 02. Diseño experimental de las simulaciones.*

Parámetro	Ensayo		
	A	B	C
Velocidad a escala 1:16 (km/h)	1.46	1.88	2.53
Velocidad Real (km/h)	23.44	29.62	39.47
Número de repeticiones	3	3	3

Para los ensayos virtuales siempre se han utilizado los dos elementos, rampa y tractor (Fig. 27). En cada uno de los ensayos de simulación, el tractor se ha colocado en el extremo de pendiente nula de la rampa de vuelco y se le ha impuesto un desplazamiento a la velocidad constante establecida a lo largo de la rampa hasta el lugar que ha podido alcanzar después de que se produzca el vuelco del vehículo.



*Figura 27. Modelo del conjunto rampa - tractor.*



### 3.7.1. Preparación de la simulación

Para preparar la simulación se ha contado con la experiencia previa descrita con mayor detalle en el TFG: “Modelado y Simulación Mecánica de Vuelco de Vehículo: Influencia de los Sistemas de Protección”, (Guasp Alburquerque, A, 2015).

Se ha adaptado todo lo descubierto y desarrollado en el citado trabajo a este nuevo caso de estudio.

Para preparar la simulación primero se ha realizado el ensamblaje que contiene todos los elementos. En primer lugar se ha insertado el ensamblaje “rampa+rail” haciendo coincidir los orígenes de ambos ensamblajes. El tractor no ha de insertarse como un único ensamblaje, puesto que ello impediría realizar correctamente el renderizado. Para solucionarlo se ha insertado como distintos sub-ensamblajes rígidos (Chasis, Ruedas traseras, 2 x Rueda delantera, Dirección) y las piezas que componen el arco individualmente. A continuación se ha ensamblado el tractor mediante relaciones de posición, tal y como se ha indicado en los apartados 3.3. y 4.2.

Una vez ensamblado el tractor, éste se ha colocado en su posición inicial, al comienzo de la rampa en la plataforma de salida. Esto se ha conseguido mediante una relación de coincidencia de la parte frontal del tractor con el plano vertical de la plataforma lateral y con relaciones de tangencia entre una de las ruedas traseras y las dos delanteras con la plataforma de salida. Estas relaciones se han eliminado posteriormente para permitir el desplazamiento del tractor.

Una vez que se ha comprobado que el comportamiento del ensamblaje elegido es adecuado, se ha activado el módulo SolidWorks Motion desde la pestaña “Productos Office”, lo que permite acceder a “Análisis de movimiento” dentro del estudio de movimiento.

Con dichas opciones activadas se ha procedido a aplicar las condiciones para el movimiento de la simulación. En primer lugar se ha aplicado la gravedad, activando esta opción en el icono de la manzana. Esta función ya tiene preestablecido un valor ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ), aunque puede ser modificado. También se ha elegido la dirección y sentido que tiene dicha fuerza, en este caso se ha escogido el vector Y.

A continuación se han establecido los contactos. Para ello se han seleccionado las distintas superficies y el tipo de contacto deseado entre ellas. El tipo de contacto puede ser elegido de un menú de SolidWorks donde existen tipos preestablecidos.

Los contactos aplicados han sido los siguientes:

- Rueda delantera derecha con la rampa (Rueda\_del\_der – Rampa).  
Tipo de contacto: Rubber (Dry) – Rubber (Dry).
- Rueda delantera izquierda con la rampa (Rueda\_del\_izq – Rampa).  
Tipo de contacto: Rubber (Dry) – Rubber (Dry).
- Rueda trasera derecha con la rampa (Rueda\_tra\_der – Rampa).  
Tipo de contacto: Rubber (Dry) – Rubber (Dry).
- Rueda trasera izquierda con la rampa (Rueda\_tra\_izq – Rampa).  
Tipo de contacto: Rubber (Dry) – Rubber (Dry).
- Rueda delantera derecha con el rail (Rueda\_del\_der – Rail).



- Tipo de contacto: Coeficiente de fricción dinámico y estático nulos.
- Rueda trasera derecha con la rail (Rueda\_tra\_der – Rail).  
Tipo de contacto: Coeficiente de fricción dinámico y estático nulos.
- Carrocería y guardabarros con la rampa (Tractor).  
Usar grupo de contactos.  
Tipo de contacto: Aluminum (Dry) – Rubber (Dry).
- Arco trasero con la rampa (Arco tra).  
Tipo de contacto: Steel (Dry) – Rubber (Dry).
- Arco delantero con la rampa (Arco del).  
Tipo de contacto: Steel (Dry) – Rubber (Dry).
- Eje delantero con el soporte de dirección (Dirección).  
Tipo de contacto: Steel (Greasy) – Steel (Greasy).

Los contactos de las ruedas con la rampa se han establecido como contacto de goma sobre goma seca (coeficiente de fricción dinámico = 0,55, coeficiente de fricción estático = 0,7), por su similitud con el caucho sobre el asfalto.

Por último ha de establecerse la velocidad de desplazamiento del tractor. Para ello se ha creado un motor que hace girar las ruedas.

Se ha seleccionado el eje de las ruedas traseras y la velocidad de giro depende de la velocidad que se ha impuesto al tractor siguiendo la siguiente relación:

$$n(\text{rpm}) = \frac{V (\text{Km/h}) \cdot 10^6}{60 \cdot \pi \cdot D_{\text{tra}} \cdot 1,608}$$

Por lo tanto, para las dimensiones originales de este modelo se han calculado las velocidades de rotación que se corresponden con las velocidades de ensayo (la velocidad de 40 Km/h es la máxima que permite la DGT para vehículos agrícolas que tengan señalización de frenado, no lleven remolques y el terreno no sea completamente llano).

En último lugar en “Propiedades de estudio de movimiento” se ha activado la opción de “contacto preciso” y en las opciones avanzadas se ha escogido WSTIFF como tipo de integrador. El tipo de integrador afecta a la forma de cálculo utilizada por SolidWorks.

El integrador por defecto tiene un número de iteraciones para el cálculo fijo y si no se llega a una solución en dichas iteraciones, la simulación se ve interrumpida, esto se soluciona escogiendo WSTIFF, ya que tiene un número de iteraciones flexible.

### 3.7.2. Criterios para la determinación del momento de inicio y la duración del vuelco

En todas las simulaciones se han tomado dos criterios para percibir el comienzo del vuelco:

- El vuelco comenzará a producirse en el momento en que la fuerza de la rueda trasera izquierda se hace nula y por lo tanto ya no permanece en contacto con la rampa. (Fig. 28).

- Mediante la observación y el análisis de fotogramas de la animación de la simulación hasta que se perciba la separación entre la rueda y la rampa. (Fig. 29).

El criterio de fuerza permite identificar cuando el contacto entre la rueda en cuestión y la rampa es inestable, pero se ha considerado como comienzo del vuelco el momento y posición en los que este contacto toma un valor nulo permanente. Este criterio no es posible aplicarlo sin la activación de la opción de contacto preciso de la simulación, puesto que los resultados proporcionados serían demasiado caóticos e imprecisos para analizarlos.

El criterio utilizado para determinar el final del vuelco se ha percibido mediante la observación y el análisis de fotogramas de la animación de la simulación hasta que se produce el contacto entre el arco y la horizontal.

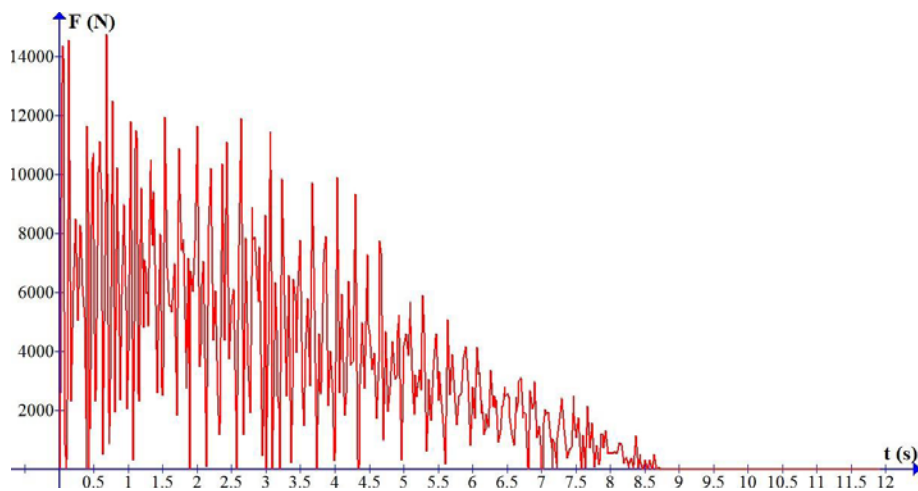


Figura 28: Contacto de la rueda trasera izquierda con la rampa.

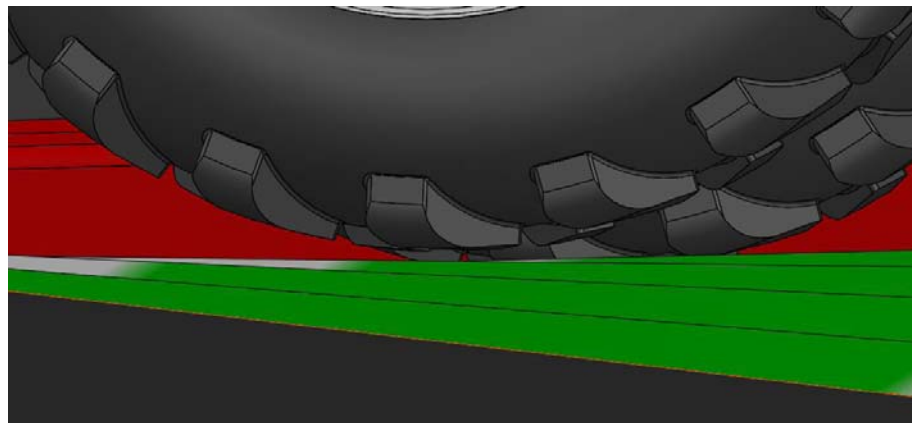


Figura 29: Separación de la rueda trasera izquierda con la rampa.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Maqueta modificada del tractor

La modificación sobre la maqueta ha supuesto el trabajo de incorporar a un tractor a escala 1:16 un sistema electrónico y mecánico de accionamiento del arco de seguridad que ha permitido estudiar la viabilidad técnica del proyecto de implantación de este dispositivo de seguridad en tractores agrícolas reales.

El primer paso ha sido adaptar la maqueta desde sus condiciones iniciales donde ésta disponía de cabina (Fig. 30) a un estado donde esa cabina es inexistente y por lo tanto queda justificada la necesidad del arco de seguridad que se accionaría con el dispositivo automático a incorporar.



Figura 30. Maqueta a escala 1:16 de Tractor New Holland T6070 R/C.

El tractor con la cabina retirada se muestra en la Figura 31.





Figura 31. Maqueta a escala 1:16 de Tractor New Holland T6070 R/C con la cabina retirada.

Los Modos de funcionamiento posibles del dispositivo de seguridad antivuelco en la maqueta son:

- Manual (accionamiento a voluntad soltando el resorte que contiene al arco sin necesidad de la caja eléctrica con botón de accionamiento).
- Automático por sensor de nivel o inclinómetro. En función del ángulo de inclinación detectado por el sensor se definirán dos niveles de señal, (1) alarma sonora cuando se sobrepase un determinado ángulo de inclinación y (2) accionamiento automático del arco de seguridad junto a la alarma anterior cuando se sobrepase un segundo ángulo de inclinación. Estos niveles de señal deberán ser regulables a elección por el técnico de montaje. El accionamiento automático debe ser muy rápido, para garantizar la eficiencia del sistema.

Las características y necesidades técnicas del sistema de accionamiento automático del arco de seguridad en la maqueta, se describen a lo largo de este capítulo.

En el caso de la maqueta hay que desarrollar por una parte el sistema electrónico de control antivuelco y por otra el sistema mecánico antivuelco, el sistema hidráulico solo es aplicable en el caso de un tractor real.

#### 4.1.1. Adaptación del sistema electrónico a la maqueta del tractor

El sistema electrónico usado en la maqueta del tractor es exactamente el mismo que el utilizado en el tractor real y está descrito en el apartado 1.3.3.1 (Fig. 32).

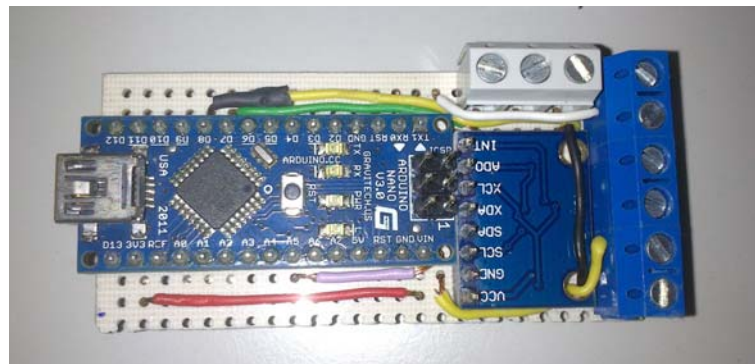


Figura 32. Sistema de control para activación del arco de seguridad montado en maqueta.

No obstante la activación del arco en este caso no es producida por el sistema hidráulico, ya que la maqueta carece de él, por lo que se ha optado por una solución capaz de hacer desplegar el arco cuando éste reciba la señal de activación.

Para el caso del tractor a escala 1:16 la activación del arco se produce cuando se activa un solenoide consignado por un software para una inclinación determinada medida por un inclinómetro, de manera que cuando se activa este solenoide, su vástago se retrae dejando el camino libre al arco, que en estado de reposo se encuentra con los muelles de su base cargados, produciéndose de este modo su rápida elevación.

Como el microcontrolador no tiene suficiente potencia en sus salidas como para activar el solenoide se ha hecho necesario el uso de relés para tener un circuito auxiliar con más potencia que alimente dicho solenoide.



El sistema electrónico cumplirá las siguientes funciones:

- a) Controlará el accionamiento de una alarma.
- b) Controlará la activación automática del arco, según el grado de inclinación.
- c) Impedirá el rearme en caso de activación automática del arco.

Para que el sistema electrónico sea a la medida de las necesidades de la maqueta, primero se ha realizado la elección de un acelerómetro adecuado dependiendo de características del sensor como son los márgenes de valores de la aceleración que admite, la capacidad para medir en continua o sólo en alterna o la máxima frecuencia a la que puede trabajar, pero sobre todo, la elección del acelerómetro adecuado se ha hecho en función de los siguientes criterios:

- Frecuencia de trabajo o margen de frecuencias de uso.
- Valores máximos y mínimos del nivel de la señal que esperamos.
- Consideraciones acerca de la forma de montaje, el espacio disponible y salida de los cables.
- Otras consideraciones tales como la temperatura de trabajo, aspectos ambientales y de compatibilidad química o la necesidad de seguridad intrínseca.

Finalmente se ha optado por un acelerómetro capacitivo de Analog Devices, en concreto por el modelo ADXL335 (Fig. 33), que se ajusta a las prestaciones de diseño, con un rango de aceleración adecuado, una sensibilidad suficiente para la aplicación, un encapsulado superficial en placa y una tensión de alimentación igual a la del microcontrolador elegido lo que evitará tener que alimentar la placa con dos tensiones diferentes, simplificando el diseño de la misma.

Las características de este acelerómetro son:

- N° de ejes: 3
- Rango: +/-3g
- Voltaje: 2-3.6V
- El eje X y el Y tienen un ancho de banda de 0,5Hz a 1600Hz
- El eje Z tiene un ancho de banda de 0,5Hz a 550Hz
- Herméticamente sellado para resistir a la temperatura y a la humedad
- Tolerante a golpes de 10.000 g
- Tamaño: 1.8cmx1.8cm

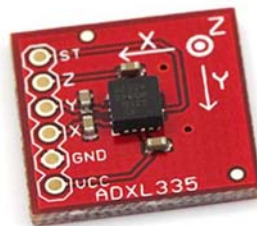


Figura 33. Acelerómetro ADXL335.

Tras la elección del acelerómetro se ha realizado la elección del microprocesador a integrar, las líneas de entrada/salida de este computador dedicado soportan el conexionado de los sensores y actuadores del dispositivo a controlar, y todos los recursos complementarios disponibles tienen como única finalidad atender sus requerimientos. Una vez programado y configurado el microcontrolador solamente sirve para gobernar la tarea asignada.

Las características del microprocesador elegido se muestran en la Tabla 03, y éste se puede ver en la Figura 34.

Tabla 03. Especificaciones técnicas del microcontrolador ATmega328.

Microcontrolador	Atmel ATmega328
Tensión de Operación (nivel lógico)	5 V
Tensión de Entrada (recomendado)	7-12 V
Tensión de Entrada (límites)	6-20 V
Pines E/S Digitales	14 (de los cuales 6 proveen de salida PWM)
Entradas Analógicas	8
Corriente máx por cada PIN de E/S	40 mA
Memoria Flash	16 KB (ATmega168) o 32 KB (ATmega328) de los cuales 2KB son usados por el bootloader
SRAM	1 KB (ATmega168) o 2 KB (ATmega328)
EEPROM	512 bytes (ATmega168) o 1 KB (ATmega328)
Frecuencia de reloj	16 MHz

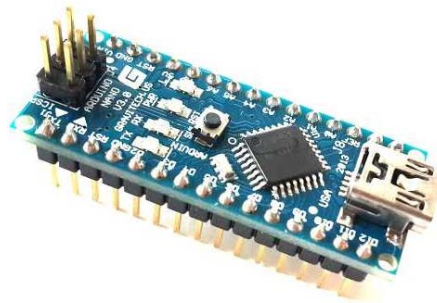


Figura 34. Microcontrolador Arduino Nano (18,5mm x 43.2mm).

La Unidad de Medición Inercial, es la definida en el apartado 1.3.3.1 y puede verse en la Figura 35, sus características son:

- Chip: MPU-6050.
- Alimentación: 3-5V.
- Modo de comunicación: Protocolo de comunicación IIC estándar.
- Chip integrado convertidor AD de 16 bits, salida de datos de 16 bits.
- Giroscopios rango:  $\pm 250$   $500$   $1000$   $2000$  grados/segundo.
- Rango de aceleración:  $\pm 2$  g,  $\pm 4$  g,  $\pm 8$  g,  $\pm 16$  g.
- Inmersión del PCB para chapado en oro, proceso de soldadura de la máquina para asegurar la calidad.
- Espaciamento Pin: 2,54 mm.
- Dimensiones: 20mm x 16mm x 3mm.
- Peso: 30 g.



Figura 35. Unidad de medición inercial MPU6050.

En las salidas del microcontrolador se tienen señales muy bajas insuficientes para alimentar componentes externos, en este caso el solenoide, que es otro componente de este sistema, con la suficiente corriente como para que se retraiga y realice la función para la que se ha colocado que queda explicada más adelante en su definición. Por ello se ha utilizado el módulo de relés, para alimentar este solenoide con un circuito independiente, activado por el microcontrolador.

Los relés que se han utilizado son específicos para las placas arduino (Fig. 36). Funciona a 5Vcc conectado directamente a la placa electrónica, su potencia es de 10Amp a 250Vac y sus niveles de trabajo son a "0" relé activo.

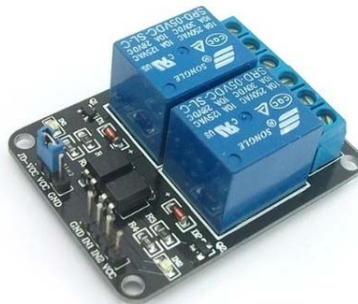


Figura 36. Modulo con relés.

La alimentación del microcontrolador así como del solenoide y del módulo de relés se realiza a partir de una pila de 9V. El sensor acelerómetro se alimenta a través de una salida del microcontrolador a 3,3V. Ya que tanto el solenoide como el módulo de relés van alimentados con una tensión de 5V se necesita pasar de los 9V de la pila a los 5V necesarios.

El circuito electrónico básico para cumplir esta tarea consiste en obtener una tensión estable de 5V a partir de una pila de 9V. Para ello se ha utilizado un clásico circuito integrado, el LM7805 (Fig. 37) para un rango de tensión de entrada de 7 a 20 V que ofrece a su salida una tensión de 5 V, y por tanto capaz de realizar esta función.

La Figura 38 muestra este sistema regulador montado en la maqueta.

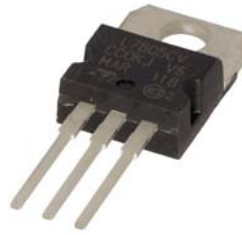


Figura 37. Circuito integrado regulador de tensión LM78xx.



Figura 38. Circuito regulador montado sobre el tractor a escala 1:16.

Un elemento fundamental en el funcionamiento de la activación del arco en el caso de la maqueta es el solenoide mostrado en la Figura 39 que se puede definir como una bobina de forma cilíndrica que cuenta con un hilo de material conductor enrollada sobre sí a fin de que, con el paso de la corriente eléctrica, se genere un intenso campo eléctrico. Cuando este campo magnético aparece comienza a operar como un imán. Cuando el solenoide está desactivado su vástago está alargado impidiendo al arco instalado que gire sobre su eje. En el momento que se activa el solenoide (con el paso de corriente) el vástago se retrae dejando que el arco se eleve gracias a los muelles en tensión que tiene instalados sobre su eje.



Figura 39. Solenoide empleado.

Los solenoides se suelen usar para empujar, tirar o pulsar diferentes pulsadores. El solenoide que se ha utilizado para este proyecto (Fig. 39) funciona a 5V por lo que es ideal para proyectos con microcontroladores integrados, como es el caso. Tiene un eje que puede salir hasta 6mm desde su centro y también dispone de dos agujeros de sujeción de M2.

En la Figura 40 se puede ver el resultado del montaje de la electrónica sobre la maqueta del tractor.

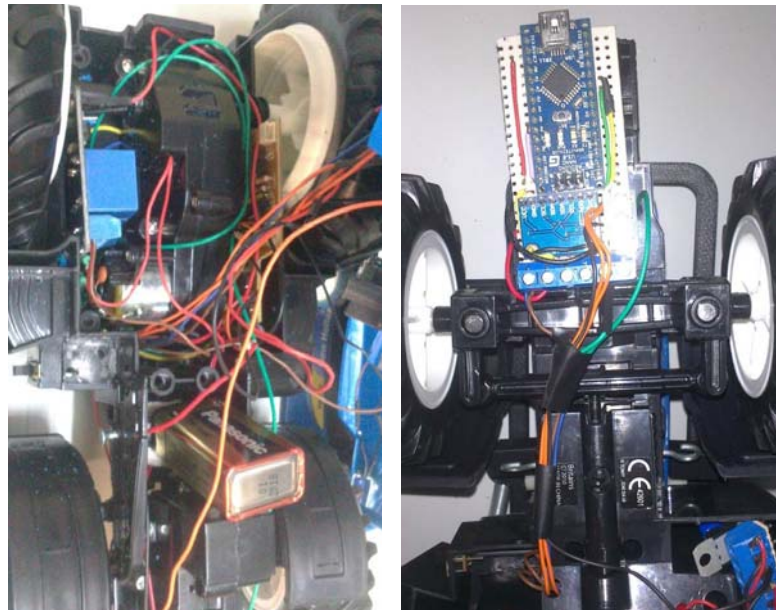


Figura 40. Montaje de la electrónica sobre el tractor a escala 1:16

La Figura 41 recoge una imagen de la maqueta del tractor a escala modificada con el sistema de control electrónico donde se distinguen todos los componentes que se acababan de describir.



Figura 41. Tractor a escala 1:16 con sistema de seguridad. 1- Alojamiento del microcontrolador. 2- Solenoide. 3- Arco de seguridad. 4- Muelle y tope del arco. 5- Zumbador y led de la alarma. 6- Estructura para garantizar el volumen de seguridad. 7- Alojamiento de la batería.



Además de la instalación del arco de seguridad y del sistema de control electrónico para accionamiento del mismo, se ha instalado sobre el tractor un led y un zumbador a modo de alarma para que se dé un aviso cuando la inclinación del mismo esté alcanzando valores que se consideren peligrosos. Todos estos parámetros son programables desde el código de programación.

#### 4.1.1.1. Software para la activación automática del arco

Tanto para la activación del arco en el caso del tractor real como para el caso del tractor a escala 1:16 se procede de la misma manera. Cuando se sobrepasa la inclinación programada se manda una señal de activación a los relés que comandan las diferentes partes del circuito según el caso. Antes de proceder al montaje sobre el tractor se realizaron numerosas pruebas con los componentes electrónicos sobre una placa de pruebas (protoboard) como puede verse en la Figura 42.

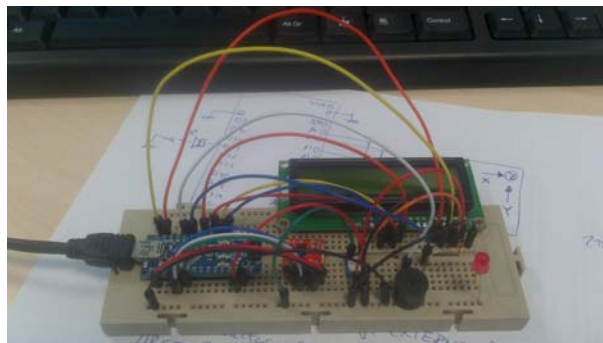


Figura 42. Montaje de prueba en placa de pruebas del circuito inclinómetro con alarma.

La programación del microcontrolador se ha hecho mediante lenguaje C. El código del programa se basa en el flujograma de la Figura 43.

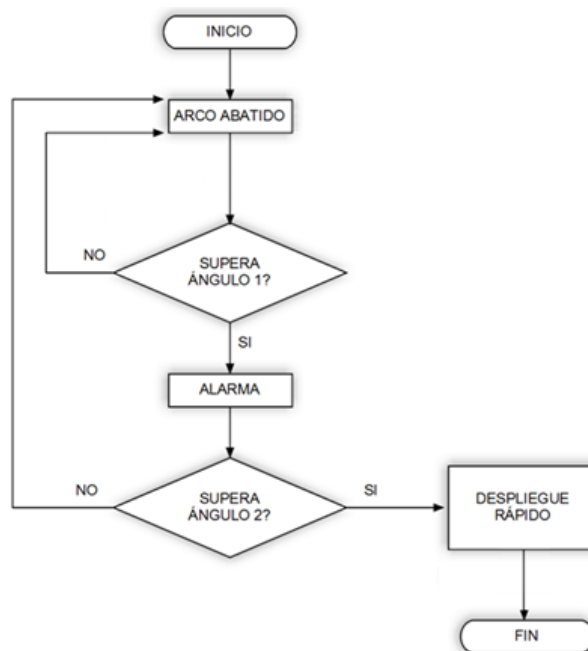


Figura 43. Flujograma del código programado.

#### 4.1.2. Sistema mecánico del dispositivo de seguridad antivuelco para la maqueta a escala 1:16

En las especificaciones de diseño para el arco de seguridad, los requisitos exigibles al sistema son:

- a) El arco se accionará automáticamente a alta velocidad. Si es posible debería accionarse en menos de 1 segundo.
- b) El arco no podrá debilitarse. Los cilindros deberán quedarse en carga.

Esto ha de cumplirse también en la fase maqueta, por ello, el arco de seguridad, la estructura trasera para garantizar el volumen de seguridad y el sistema antirretorno acoplados al tractor a escala 1:16 han sido diseñados previamente con el programa de diseño asistido por ordenador SolidWorks (Fig. 44) y prototipados en impresora 3D con material ABS.



Figura 44. Diseño del arco de seguridad con SolidWorks.

El accionamiento del arco se realizará por medio de un muelle en tensión anclado en la base del arco y un solenoide en la parte delantera del tractor.

En el estado de reposo el arco está abatido sobre el frontal del tractor, es decir, no se ha activado el sistema de seguridad y no se ha accionado dicho arco. El arco estará sujeto en su parte superior con el vástago alargado de un solenoide colocado en la parte frontal del tractor que en reposo impedirá el giro y abatimiento del arco (Fig. 45). Los muelles de la parte inferior del arco estarán en tensión en esta posición, de forma que cuando se dé la señal de activación desde el microcontrolador (cuando se haya superado la inclinación programada) se imantará y retraerá el vástago del solenoide, dejando libre el arco y por tanto éste girará sobre su eje mediante la recuperación de los muelles instalados en la base del mismo.





*Figura 45. Detalle del arco abatido y sujeto por el vástago alargado del solenoide.*

En el montaje, se incluye un sistema antirretorno del arco que sirve para que una vez que el arco ha llegado a su posición de trabajo, éste se quede entrabado y no pueda moverse, evitando así un posibles daños si el arco se desplegara y elevara mientras se manipula o cuando el sistema de control no ha dado la orden de activación del mismo (Fig. 46).



*Figura 46. Detalle del elemento de espera (antirretorno) con el arco abatido.*

Para este “antirretorno” en el tractor a escala 1:16, se ha diseñado un dispositivo de espera a la vez que se ha dado mayor longitud al arco de seguridad en la parte inferior, de manera que cuando el arco de seguridad se libere, no pueda pasar más allá del elemento de espera y permanezca levantado. Se asegura así el volumen de seguridad del conductor. Esto se puede ver en detalle en la Figura 47.



Figura 47. Detalle del elemento de espera (antirretorno) con el arco desplegado.

La construcción del arco de seguridad que se ha instalado en el tractor se ha realizado en material Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS Plus concretamente) mediante prototipado rápido en la impresora 3D descrita en el apartado 3.5.1 correspondiente a materiales y métodos.

El ABS es un plástico denominado de ingeniería debido a que su elaboración y procesamiento es más complejo que los plásticos comunes, como son las polioleofinas, es muy resistente al impacto (golpes) por lo que suele ser muy utilizado en automoción y otros usos tanto industriales como domésticos.

Por ello y otras características como su gran tenacidad, incluso a baja temperatura (sigue siendo tenaz a  $-40^{\circ}\text{C}$ ) y su dureza y rigidez que le confieren una resistencia química aceptable con baja absorción de agua, una buena estabilidad dimensional, alta resistencia a la abrasión y posibilidad de ser recubierto con una capa metálica con facilidad o de ser mecanizado, resulta ser idóneo para la cumplir la función a la que se ha sometido dentro de su montaje en esta modificación del tractor a escala 1:16.

En la Figura 48 se muestra el arco de seguridad y los elementos accesorios de unión fabricados en material ABS Plus para ser montados en el tractor a escala 1:16.



Figura 48. Arco de seguridad prototipado con impresora 3D.



Finalmente, la maqueta modificada con la implementación de los sistemas electrónicos y mecánicos adaptados queda tal y como se puede ver en las Figuras 49 y 50.



*Figura 49. Maqueta modificada con sistemas electrónico y mecánico implementados y con Arco de seguridad abatido.*



*Figura 50. Maqueta modificada con sistemas electrónico y mecánico implementados y con Arco de seguridad elevado.*

## 4.2. Tractor modelado a escala 1:16

El procedimiento seguido para el modelado en 3D de la maqueta del tractor a escala 1:16 ha quedado definido en el apartado 3.3 de Materiales y Métodos, el resultado del mismo se expone a continuación, desarrollando las fases del modelado en CATIA, el ensamblaje de las piezas creadas en este Software, el proceso de texturizado y render seguido desde el Software al que se ha exportado el modelo en CATIA, SolidWorks y la aplicación de propiedades físicas al modelo de la maqueta del tractor a escala 1:16.

### 4.2.1. Fases del modelado con CATIA de la maqueta del tractor

Se ha usado el software integral de CAD/CAM/CAE CATIA V5(r21) para el modelado de cada una de las piezas del tractor y se ha procedido a su ensamblaje.

El tractor ha sido modelado a partir de la modificación de la maqueta a escala 1:16 del modelo New Holland T6070 R/C original mostrada en la Figura 20 del apartado 3.1 de Materiales y Métodos.

La maqueta modificada se muestra en la Figura 51.



Figura 51. Tractor a escala 1:16 modificado.

El modelado 3D, tanto del tractor como del sistema antivuelco se ha desarrollado siguiendo la secuencia de trabajo descrita a continuación.

Los módulos del software que se han utilizado son: Sketcher, Part design y Assembly design. Cada uno de ellos posee sus propias herramientas, el módulo Part design contiene las herramientas que conforman la geometría tridimensional del diseño, el Sketcher ya configurado en su geometría y dimensiones da forma plana 2D y el módulo Assembly design dispone de herramientas para ensamblar todas las piezas creadas e imponer restricciones de posición y contacto entre ellas. Por lo tanto, el primer paso ha sido modelar todos y cada uno de los componentes del tractor posteriormente se ha llevado a cabo su ensamblaje.



#### 4.2.1.1. Piezas creadas

Se han modelado un total de 17 componentes:

1. Neumático delantero
2. Llanta delantera
3. Neumático trasero
4. Llanta trasera
5. Eje trasero
6. Eje delantero móvil
7. Eje delantero fijo
8. Pasador
9. Chasis
10. Capó
11. Guardabarros trasero
12. Escaleras
13. Reposabrazos
14. Cerramiento
15. Asiento
16. Salpicadero
17. Volante

De esta manera, siguiendo la secuencia: creación de croquis 2D (sketch en ese caso), creación de sólido (part) a partir del sketch, modificación del part mediante operaciones basadas al tiempo en nuevos perfiles 2D, se obtiene el modelado final de cada una de las 17 piezas que conformarán el ensamblaje del tractor.

En la Figura 52 se muestra, a modo de ejemplo, el modelado del neumático delantero del tractor, que es una de las 17 piezas modeladas.

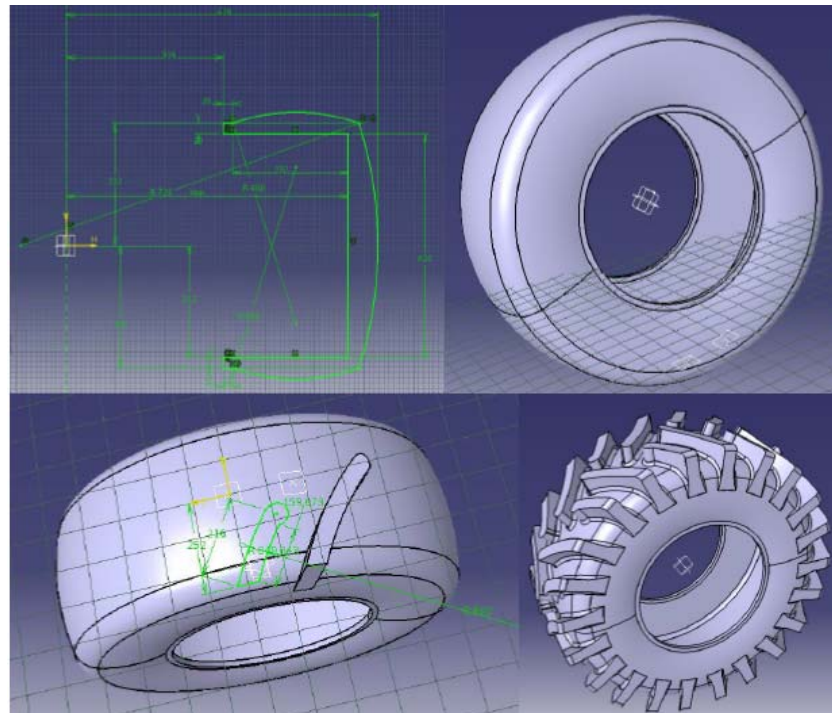


Figura 52. Proceso de modelado del neumático delantero del tractor.

#### 4.2.1.2. Ensamblaje de las piezas creadas

Para completar el modelo 3D se deben de ensamblar cada una de las piezas que se han creado, para ello, se emplea el módulo de CATIA Assembly design. El ensamblaje consta de dos subensamblajes (ruedas y eje delantero) y un ensamblaje general (ensamblaje completo). Este módulo dispone de las herramientas necesarias para relacionar posicionalmente las distintas piezas.

Primero se ensamblaron las ruedas, que se componen de dos piezas: neumático y llanta. (Fig. 53)

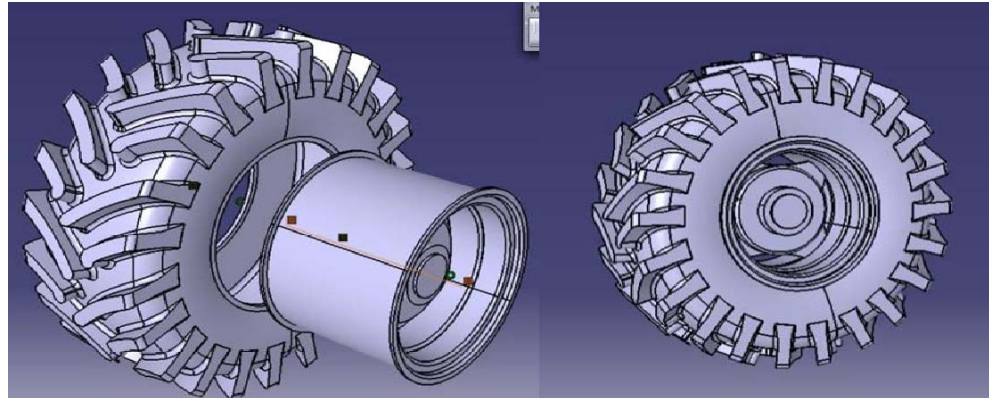


Figura 53. Ensamblaje de ruedas (neumático-llanta).

Posteriormente, se realizó el ensamblaje del eje delantero que se compone de 3 partes principales: eje móvil, eje fijo y pasadores.

En la Figura 54 se muestra el resultado final de esta operación.

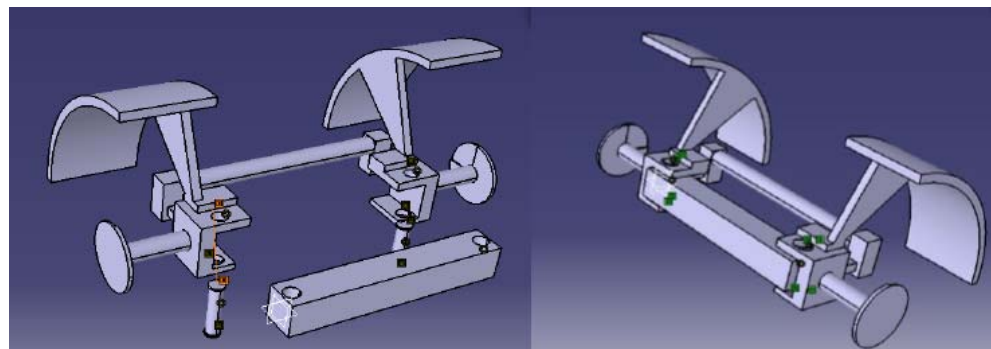


Figura 54. Ensamblaje del eje delantero.

Partiendo primero del eje trasero mostrado en la Figura 55.

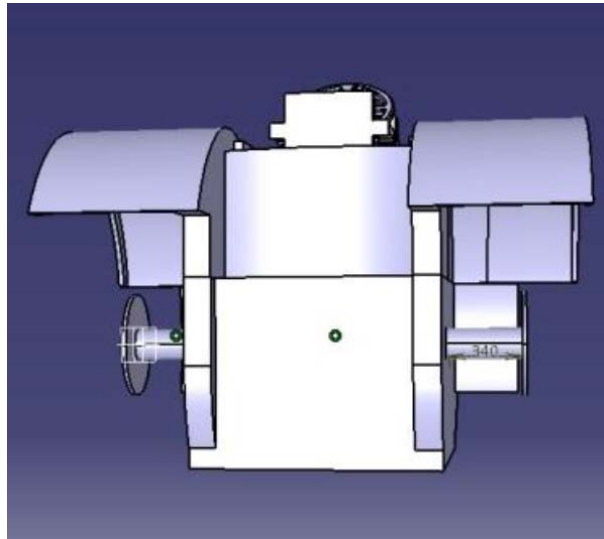


Figura 55. Ensamblaje del eje trasero.

Continuando con las ruedas traseras, el eje delantero y las ruedas delanteras, secuencia que se aprecia en la Figura 56.

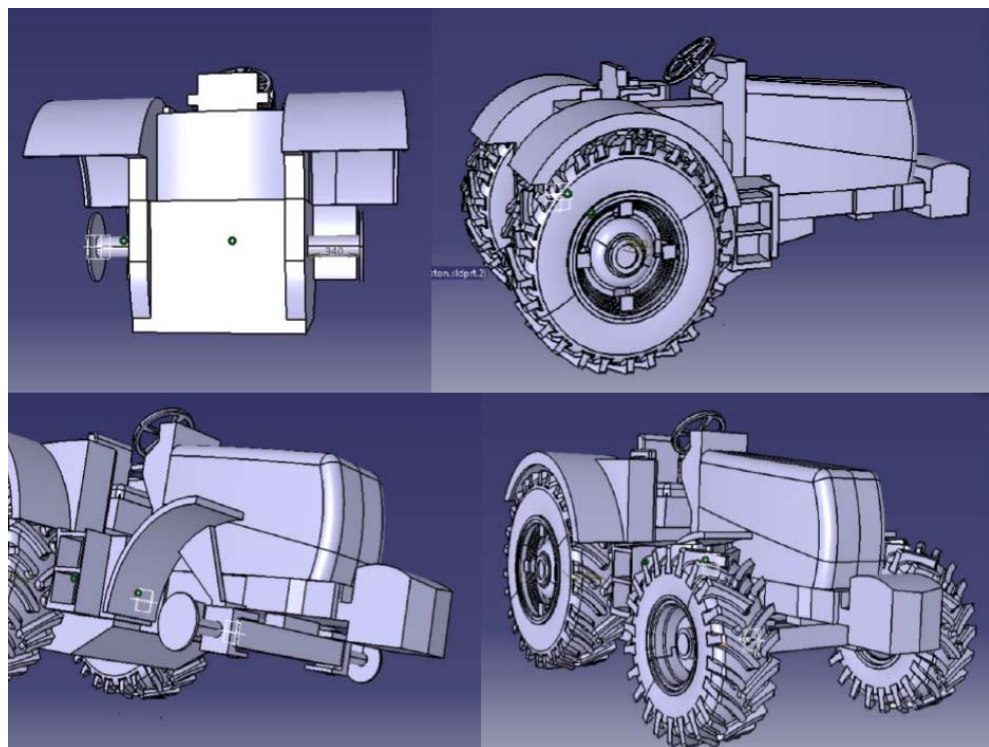


Figura 56. Secuencia de trabajo para obtener el ensamblaje completo del tractor.

El resultado de ensamblar los subensamblajes iniciales con el resto de piezas modeladas es el mostrado en la Figura 57.



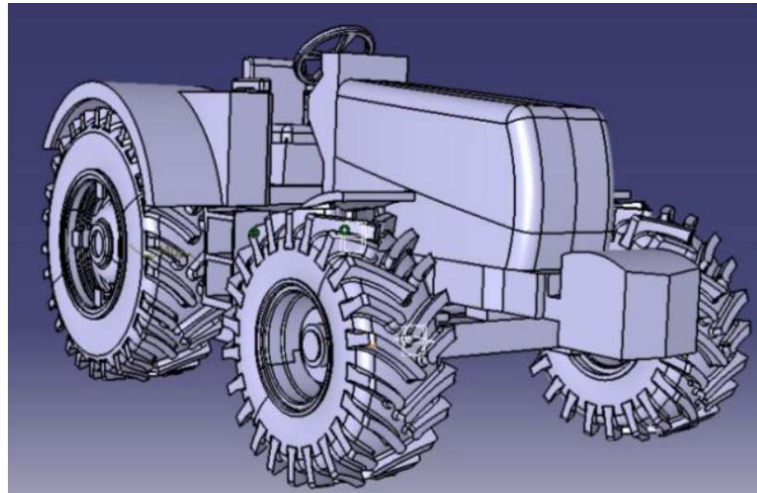


Figura 57. Ensamblaje del tractor.

En la figura 58 se observa el tractor totalmente terminado y ensamblado con el dispositivo de seguridad, incluidas las del sistema antivuelco.

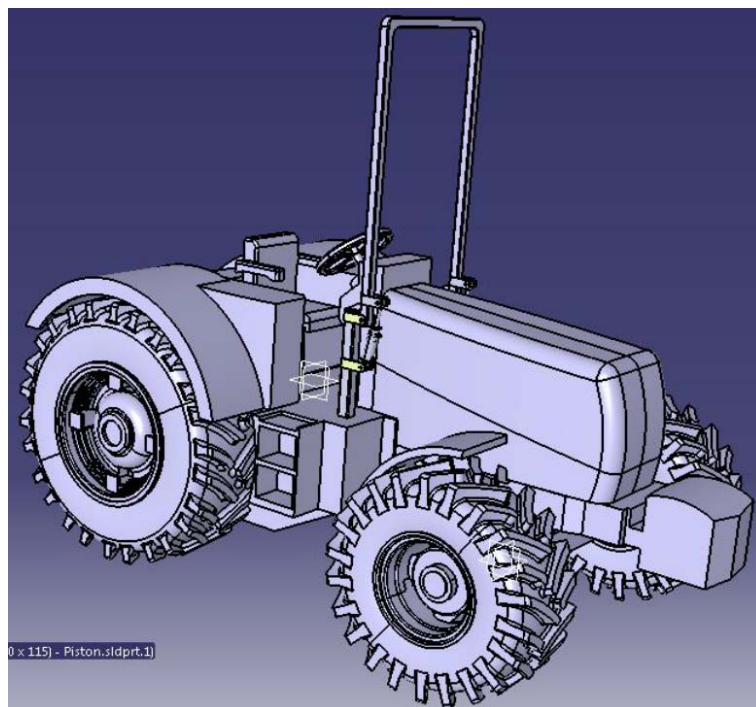


Figura 58. Ensamblaje del tractor completo.

Terminada la fase de modelado desde CATIA, a la hora de aplicar texturas existen limitaciones, ya que sólo se puede incluir una textura por componente. Por lo tanto, para poder aplicar un mayor número de texturas se ha dividido el sólido correspondiente al tractor en 4 partes diferenciadas: Chasis, parte superior, guardabarros trasero y volante.

En la figura 59 aparece el tractor con sus cuatro divisiones.

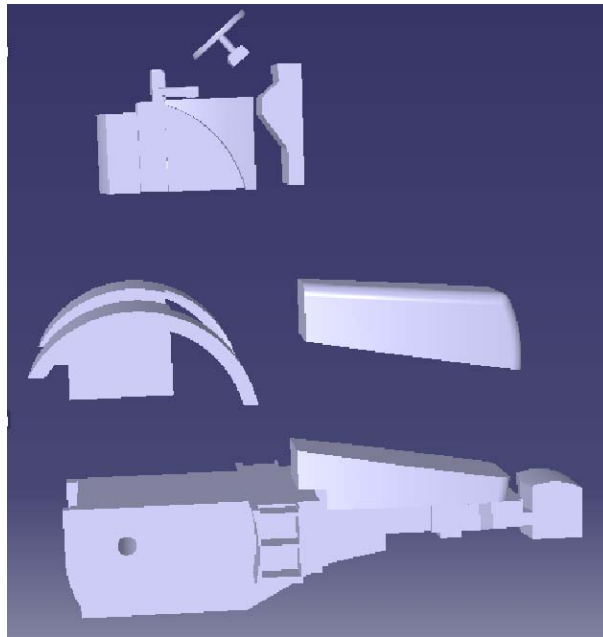


Figura 59. Tractor dividido en cuatro partes (una textura por sólido).

#### 4.2.2. Texturizado y render de la maqueta del tractor

El tractor objeto de ensayo virtual parte, como se ha explicado, de un tractor modelado en CATIA, el cual ha sido exportado después a SolidWorks para realizar las simulaciones.

En el proceso de exportación a SolidWorks, las 17 piezas modeladas en CATIA y definidas en el apartado anterior, han quedado convertidas a geometrías simples sin contener su información de referencia que permita que puedan ser editadas, por lo que en gran medida han tenido que ser reconstruidas en SolidWorks, partiendo de las formas y dimensiones adoptadas por su modelado en CATIA.

Esto significa que aunque el proceso de exportación de CATIA – importación a SolidWorks no haya sido directo y automático, el hecho de contener, las piezas sometidas a este proceso, formas y dimensiones, aunque carecieran de restricciones, ha facilitado su modelado y reconstrucción y posterior edición para aplicar texturas, materiales y propiedades físicas (masa y centro de gravedad) que han dotado al modelo de las mismas características de la maqueta real del tractor.

Las modificaciones más significativas que se han tenido que realizar tras el paso del modelo de un software a otro, para que las simulaciones se hayan podido realizar correctamente, han sido los dibujos de los neumáticos, puesto que originalmente éstos eran extrusiones planas y el contacto con el suelo era irregular. Para solucionarlo se le ha aplicado un corte de revolución que acerca más el comportamiento del conjunto modelado a la realidad. El resultado de estas modificaciones en los neumáticos se observa en la Figura 60.

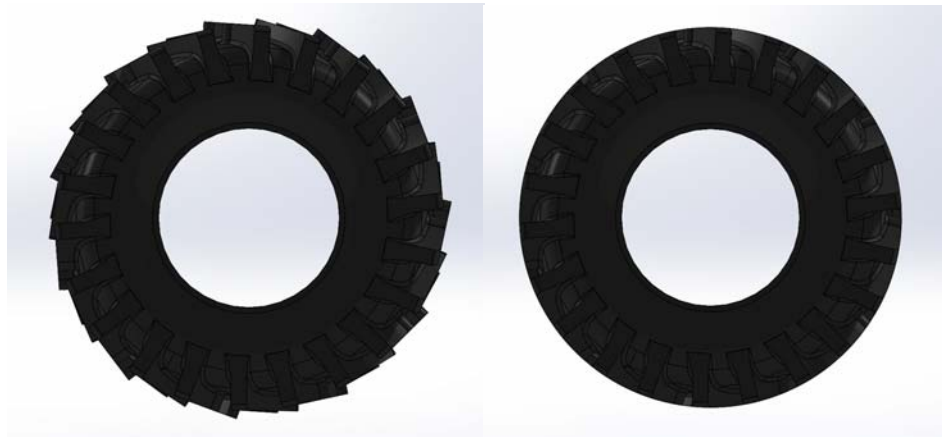


Figura 60. Neumático antes y después de ser modificado.

Independientemente de las partes en las que ha quedado dividido el modelo del tractor realizado en Catia mostrado al término del apartado anterior, por motivos de aplicación de las diferentes texturas necesarias para poder dar un aspecto de mayor realismo al tractor, una vez realizado el paso al software SolidWorks, con el fin de que el tractor modelado se comporte en los procesos de simulación de una manera más acorde a la realidad, se ha realizado una nueva división del conjunto de forma que se han tenido en cuenta tanto la apariencia de los diferentes componentes como la funcionalidad de los mismos.

De este modo, el ensamblaje definitivo del tractor utilizado en las simulaciones ha quedado compuesto por 4 subensamblajes, mostrados en la Figura 31, que son:

- Chasis, que incluye la carrocería, el eje delantero, el asiento, el volante y el arco de seguridad.
- Eje posterior, que incluye ambas ruedas traseras.
- Rueda delantera derecha.
- Rueda delantera izquierda.



Figura 61. Subensamblajes del modelo completo de la maqueta del tractor.

Con esta configuración final, las dos ruedas traseras giran solidarias, mientras que las delanteras giran independientemente la una de la otra.

El motivo por el que el eje delantero está incluido dentro del subensamblaje correspondiente al chasis es porque en la maqueta, este eje no es pivotante y por lo tanto no requiere un movimiento independiente al del chasis (al contrario de lo que ocurría en las simulaciones desarrolladas para el Case IH en uno de los trabajos previos en los que este trabajo se apoya).

Puesto que el tractor en SolidWorks representa a un tractor escalado a 1:16 en forma de maqueta (se puede considerar de juguete), los materiales de esta maqueta no son los mismos que los de un tractor a escala real.

Por ello, a todas las piezas se le han aplicado las texturas de plásticos de distintas tonalidades tal y como se puede ver en la Figura 62.

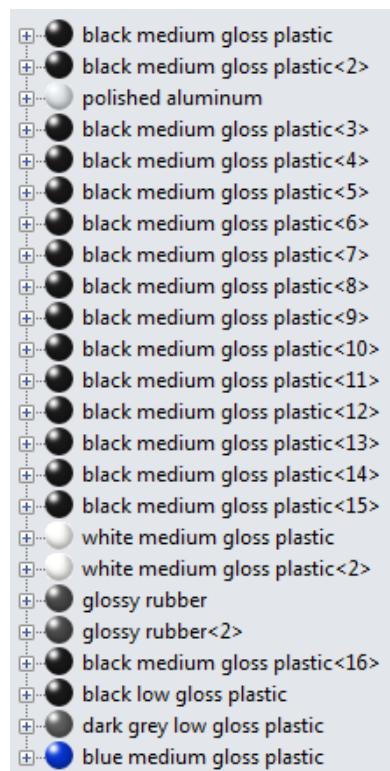


Figura 62. Texturas aplicadas a las piezas modeladas de la maqueta del tractor.

#### 4.2.3. Aplicación de propiedades físicas al modelo del tractor

En el caso de la aplicación de texturas, se han introducido diferentes acabados plásticos, sin embargo para conseguir que las propiedades físicas del modelo coincidan con las de la maqueta, estas se han modificado para obtener una masa y posición del centro de gravedad idénticos al del tractor de juguete.

Para realizar esta labor de modificación de las propiedades físicas del modelo, se ha considerado que el subensamblaje de mayor volumen y más significativo por lo tanto, al representar la mayor parte de la masa del conjunto final, es el chasis.

Y una vez conocidas las propiedades físicas de la maqueta real del tractor, se han modificado las del subensamblaje del chasis, hasta hacer coincidir las del modelo completo con las de la maqueta real del tractor.

Los datos de las propiedades físicas son:

- Masa: 1320 g.
- Posición horizontal CDG (respecto eje trasero): 82,26 mm.
- Posición vertical CDG (respecto eje trasero): 21,74 mm.

La Figura 63 muestra la interfaz de SolidWorks donde se han modificado y se pueden consultar las propiedades físicas del modelo de la maqueta del tractor.

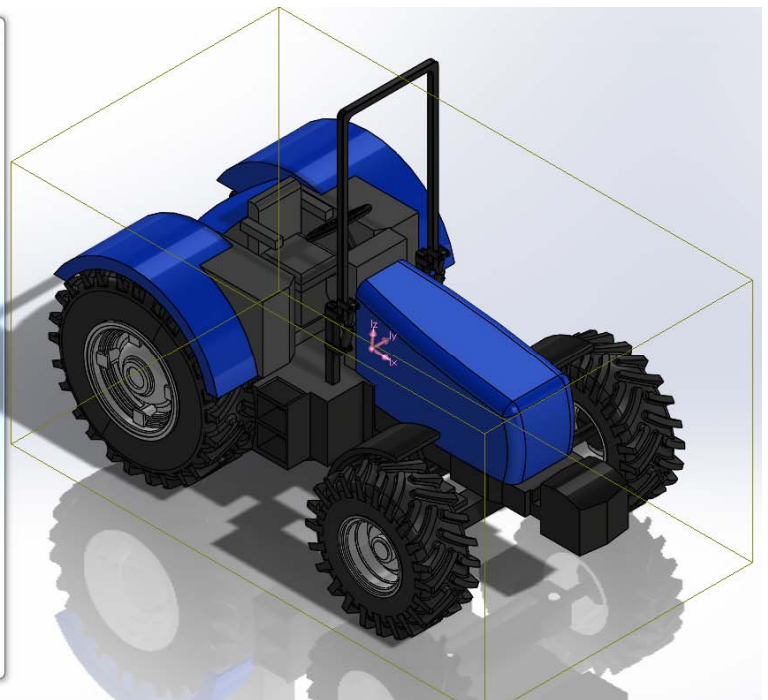
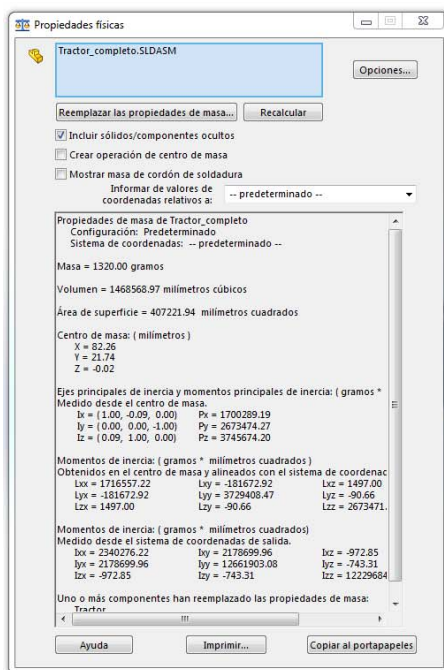


Figura 63. Propiedades físicas del modelo de la maqueta del tractor.

En la Figura 64 se ve el modelo completo de la maqueta del tractor con el dispositivo de seguridad antivuelco en sus dos posiciones posibles.

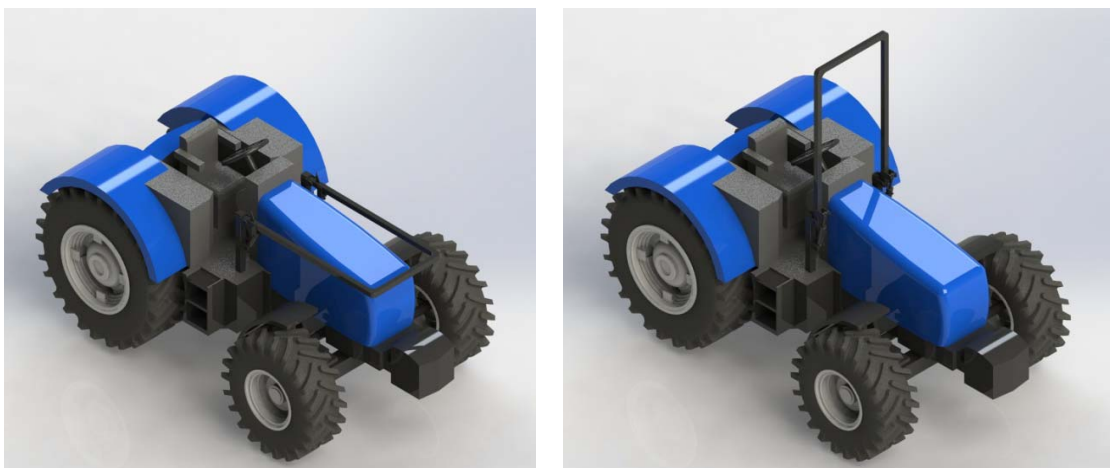


Figura 64. Modelo del tractor con ROPS. (a) ROPS abatido, (b) ROPS elevado.





### 4.3. Superficie de ensayo modelada

El modelado de la superficie de ensayo se ha llevado a cabo CAD con el programa de diseño SolidWorks. Se ha dado forma a una rampa con las características necesarias para poder desarrollar las simulaciones que han reproducido de forma virtual los ensayos reales que se han realizado con la maqueta del tractor real a escala 1:16 y con la rampa construida como superficie de ensayo para alcanzar el objetivo del proyecto.

#### 4.3.1. Fases del modelado con SolidWorks de la superficie de ensayo

El proceso de modelado se ha dividido en diferentes fases para que el resultado se adaptase completamente a las necesidades de diseño de la superficie de ensayo que permitiera que se llevaran a cabo las simulaciones.

La rampa diseñada en CAD ha servido como punto de partida para la construcción de la rampa real con la que se han realizado los ensayos de desplazamiento y vuelco de la maqueta real del tractor a escala 1:16.

A partir de un diseño CAD inicial de una rampa de material sólido a lo largo de todo su desarrollo, se han ido realizando modificaciones que han permitido obtener las piezas necesarias a fabricar para la construcción de la rampa real, siendo el resultado de diseño una serie de soportes situados a diferentes distancias y formando los ángulos correspondientes a esas distancias que cumplieran la restricción de 1m – 1 grado en el caso de escala 1:1 o lo que es lo mismo 6,25cm – 1 grado en el caso de escala 1:16 que es la que se ha desarrollado.

##### 4.3.1.1. Modelado del elemento rampa

Para el dimensionado inicial de la rampa, se han tomado como punto de partida las medidas de la empleada en la realización de las simulaciones del trabajo: Modelado y Simulación Mecánica de Vuelco de Vehículo: Influencia de los Sistemas de Protección (Andrés Guasp Alburquerque - Septiembre de 2015). Ésta rampa tenía 60m de longitud y estaba calculada siguiendo la consigna 1m de avance – 1 grado de inclinación.

En el caso actual, ha sido necesario aplicar una escala de 1:16 a estas dimensiones, por lo que calculando, la longitud ahora es de 3,75m, haciendo un estudio de los materiales necesarios para la construcción de la rampa a partir de este diseño, las limitaciones en tamaño del DM (3m) han hecho tomar la decisión de reducir esta longitud y la primera rampa modelada ha resultado tener unas dimensiones en su base de 2,8125m de longitud x 37,5cm de ancho, lo que correspondería a una longitud de 45m que daría lugar a una rampa de 45 grados en su inclinación máxima a escala real.

Sobre este rectángulo de base 2,8125m x 37,5cm, desde la horizontal cada 7,5 grados se ha trazado el triángulo rectángulo que formaría cada uno de los avances. A escala real sería 7,5 grados cada 7,5m, a escala 1:16, como es el caso han sido 7,5 grados cada 46,875cm de avance, de esta manera se han trazado todos los croquis de triángulos rectángulos que han servido como base para conseguir el sólido rampa.

La base de 2812,5mm x 375mm dividida en las distancias que resultan a 7,5-15-22,5-30-37,5-40\*-45 grados se puede ver en la Figura 65.

(\*Cuaderna extra necesaria para construcción posterior de rampa).

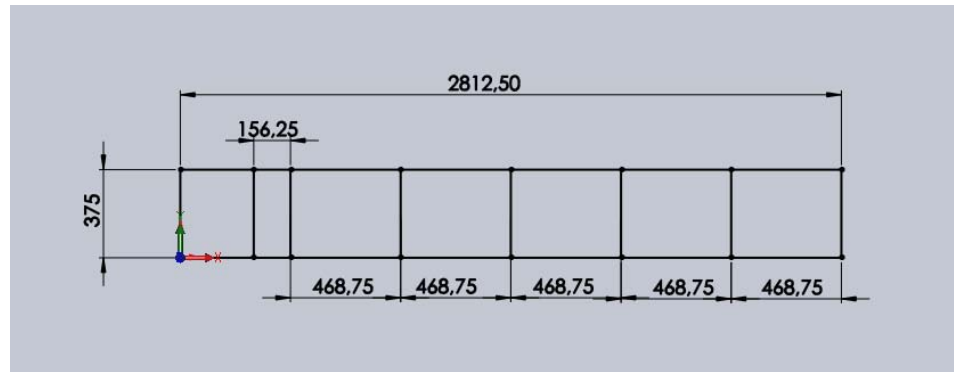


Figura 65. Croquis base para modelado de rampa.

La distribución de los croquis en forma de triángulos rectángulos que dan forma a los soportes se muestra en la Figura 66.

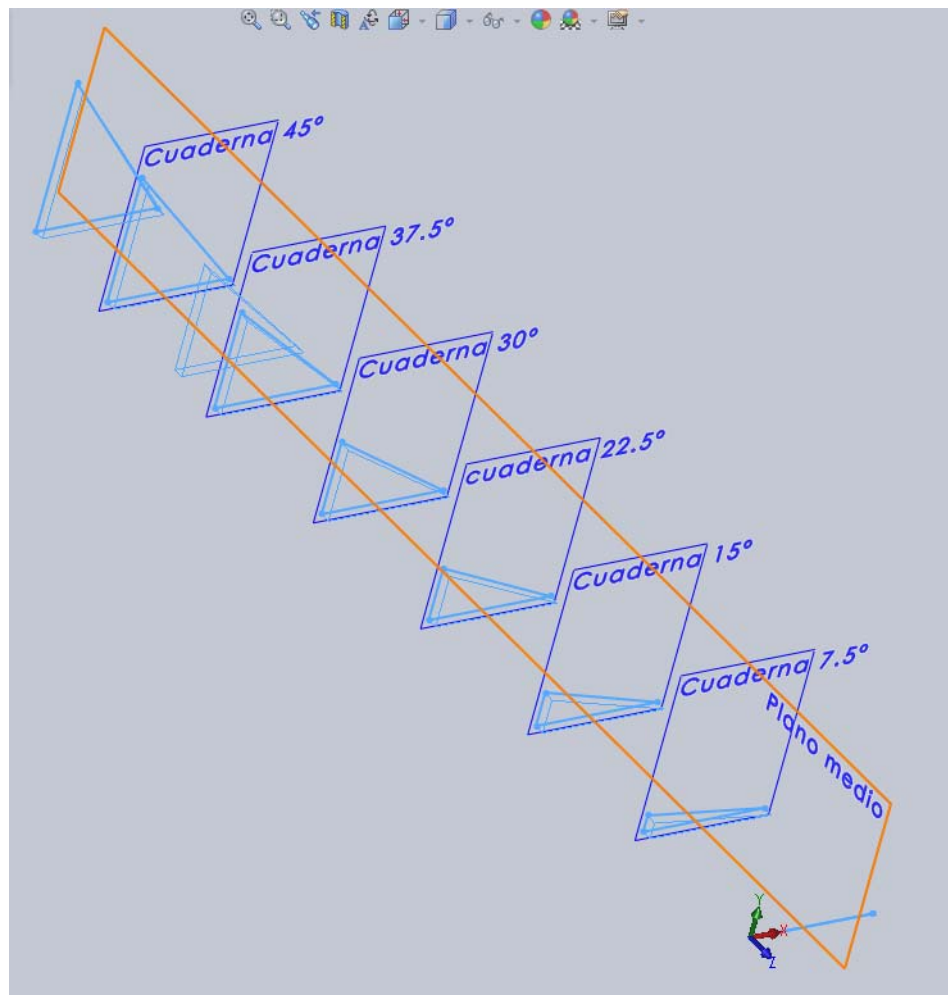


Figura 66. Conjunto de croquis base para soportes

Para conseguir la pieza rampa como un sólido, a partir de los croquis ya generados, se ejecuta la orden activa en SolidWorks en su módulo Part “saliente base por límite” que se encuentra dentro del menú de operaciones.



Los datos que el programa necesita para la ejecución de este comando es un croquis inicial en la base de la rampa que tiene un ancho de 375mm y una altura lo más próxima a cero posible, como forma de referencia a extruir hasta un límite con una forma también dada (en este caso cada uno de los croquis triangulares) para modelar el saliente que se quiere obtener. El proceso de ejecución de esta orden y los datos necesarios para ello quedan recogidos en las Figuras 67 (saliente base por límite parcial) y 68 (saliente base por límite completo).

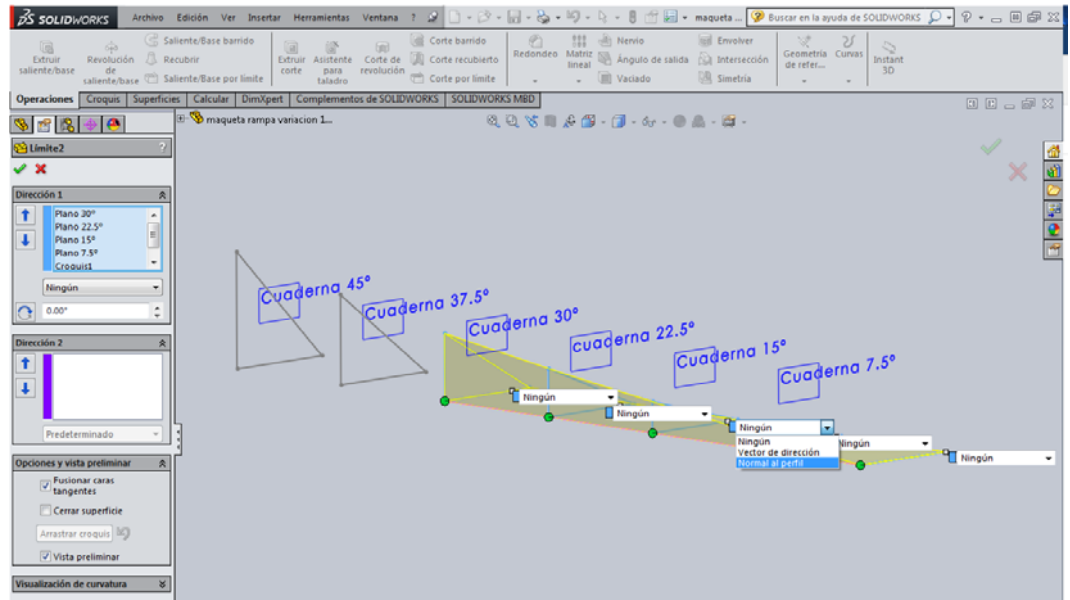


Figura 67. Saliente base por límite parcial.

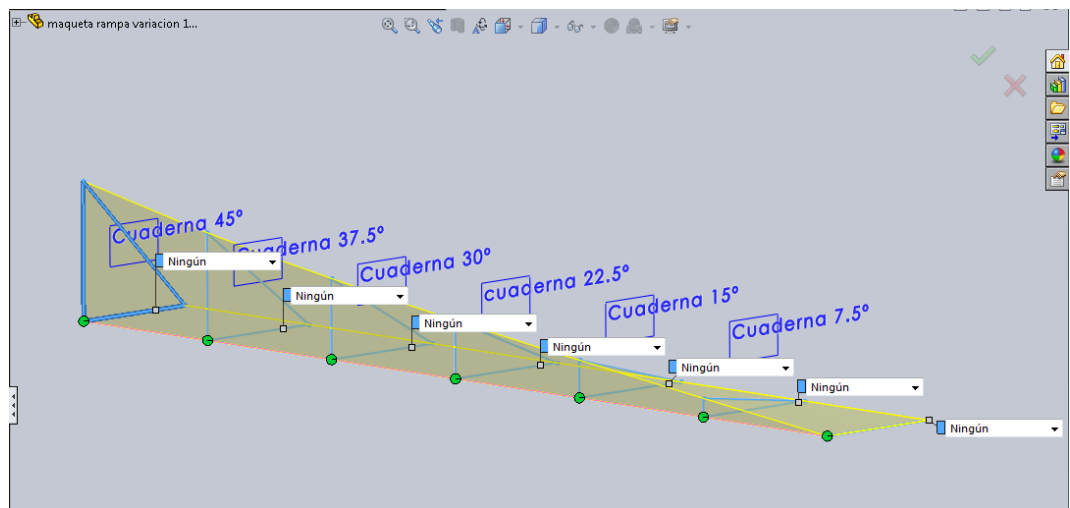


Figura 68. Saliente base por límite completo.

El resultado de este comando es el primer sólido buscado y se puede ver en la Figura 69.

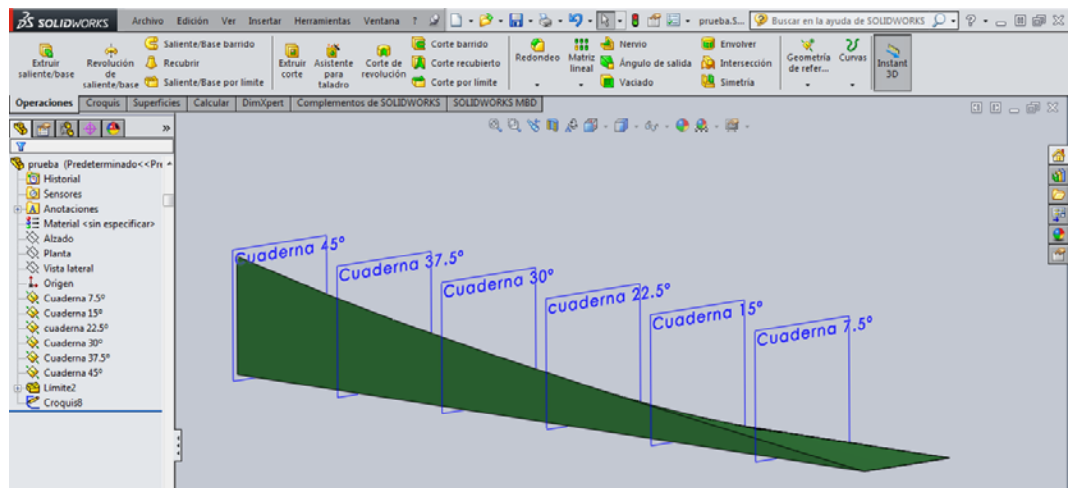


Figura 69. Sólido correspondiente a la rampa.

#### 4.3.1.2. Modelado de la superficie de 3mm sobre la rampa

Una vez creada la rampa soporte, de momento como una única pieza o sólido hasta que no sea necesario dividirlo como soportes independientes, se ha creado la superficie de 3mm de espesor, que sería la pieza de DM montada sobre la rampa en la construcción de la misma. Dejar la rampa como un único sólido de momento también ha facilitado la tarea de modelar esta fase.

Para el modelado de esta superficie de 3mm, también se ha ejecutado la orden saliente base por límite, para la que se ha tomado como base un croquis que ha consistido en una línea de 3mm dibujada sobre el sólido rampa (Fig. 70) que se introduce como dato dirección 2 y por otra parte la superficie generada por la anterior ejecución de esta orden como dirección 1. Este proceso se muestra en la Figura 71.

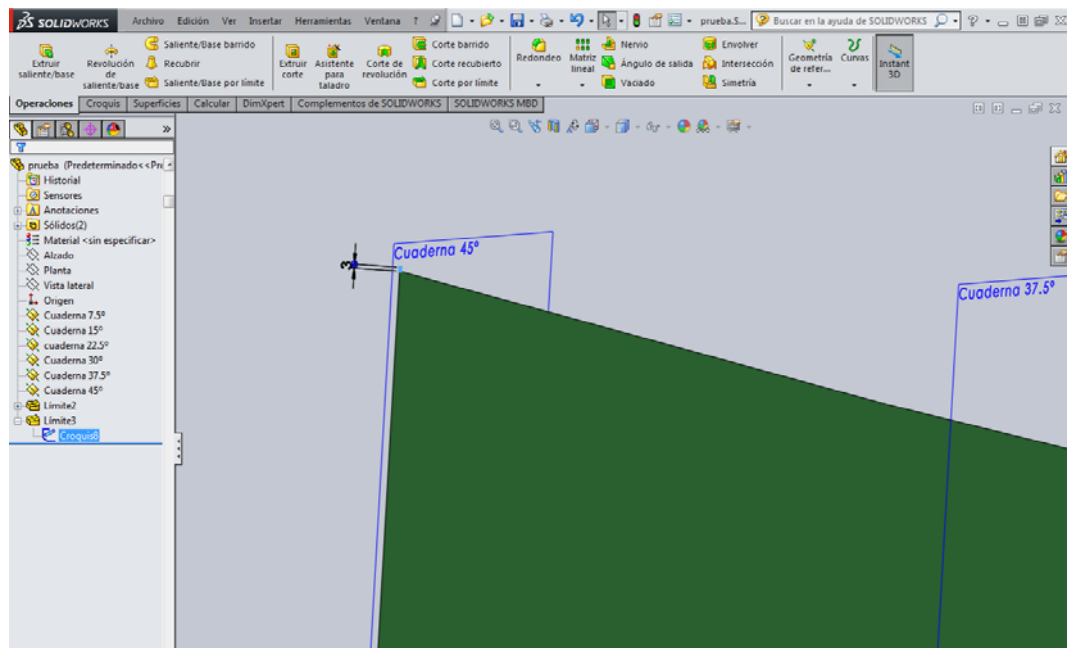


Figura 70. Croquis base para creación de superficie de 3mm

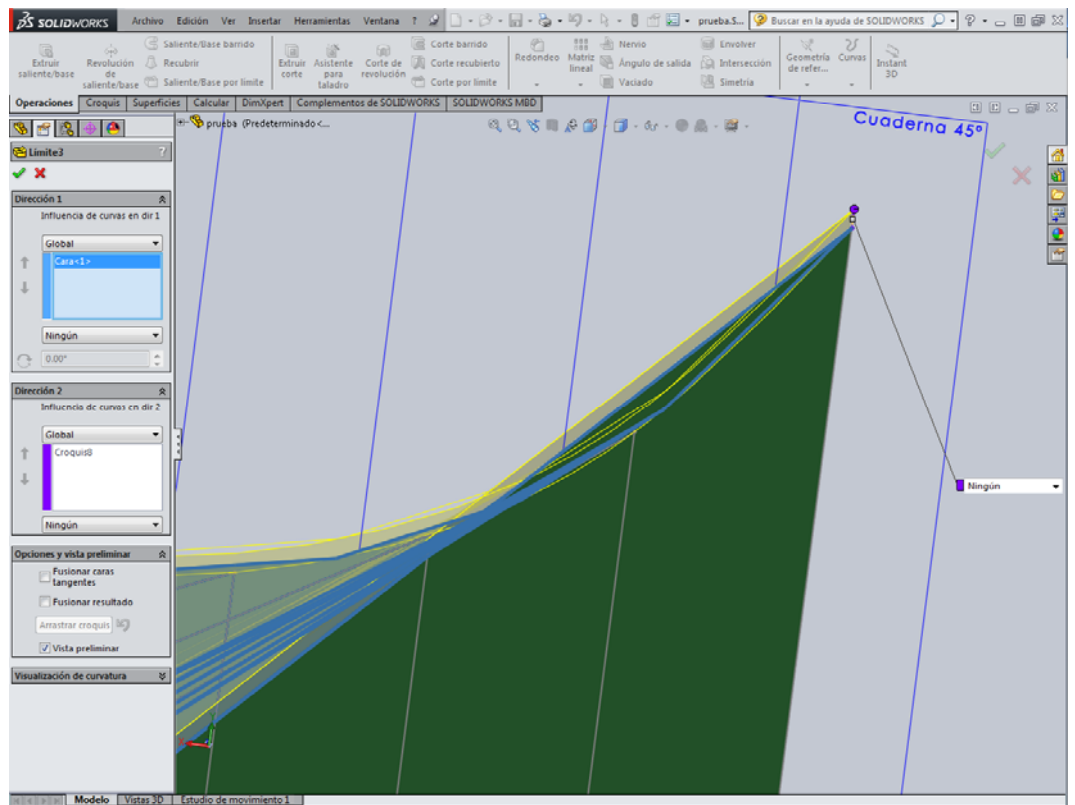


Figura 71. Operación saliente base por límite para creación de superficie de 3mm

El resultado de este comando es el segundo sólido buscado, correspondiente a la superficie de ensayo y se puede ver en la Figura 72.

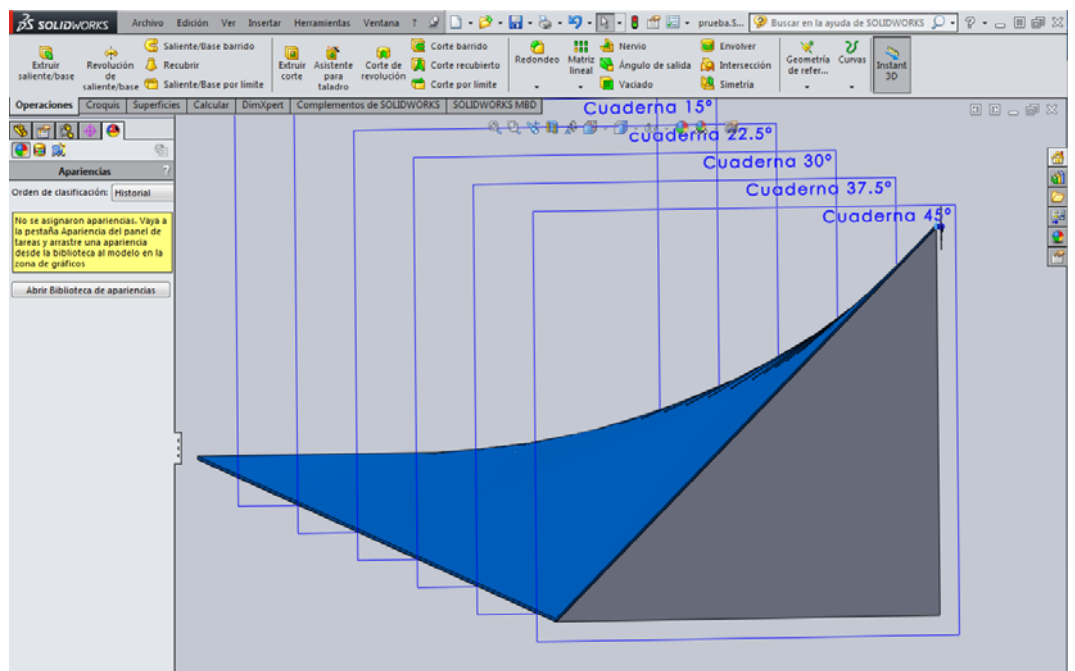


Figura 72. Sólido correspondiente a superficie de ensayo

### 4.3.1.3. Aplicación de texturas a los dos sólidos modelados

Se ha dotado a los sólidos creados de material y textura acordes con los materiales que posteriormente se han empleado para su construcción real.

Este proceso se ha llevado a cabo como se ilustra en la secuencia de Figuras: Figura 73 - Figura 74 - Figura 75.

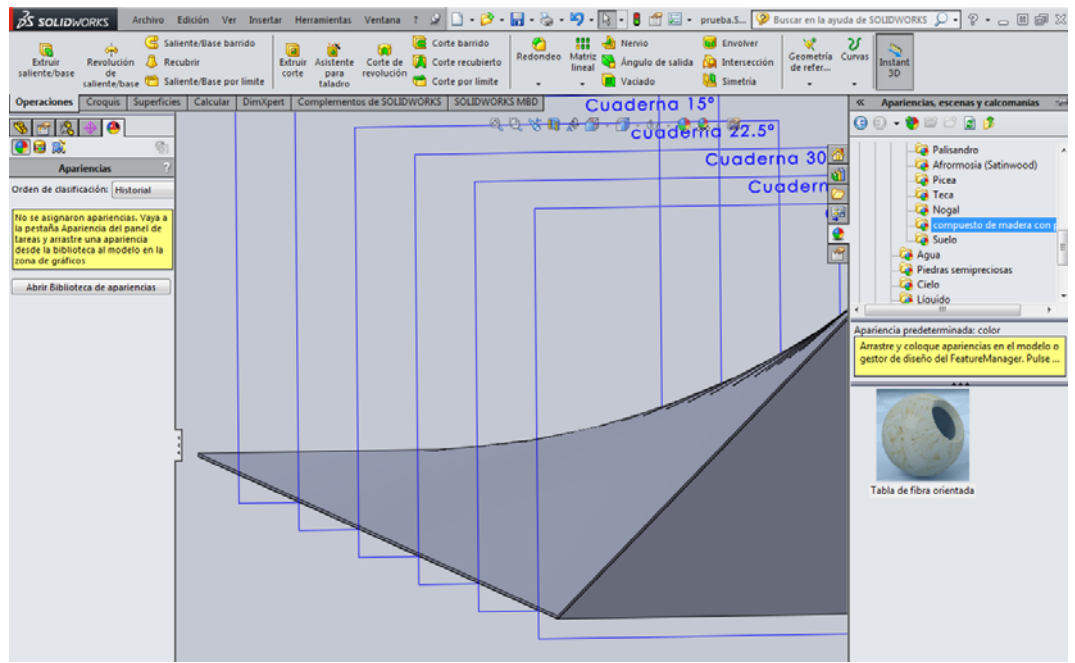


Figura 73. Aplicación de material y apariencia a la superficie de ensayo.

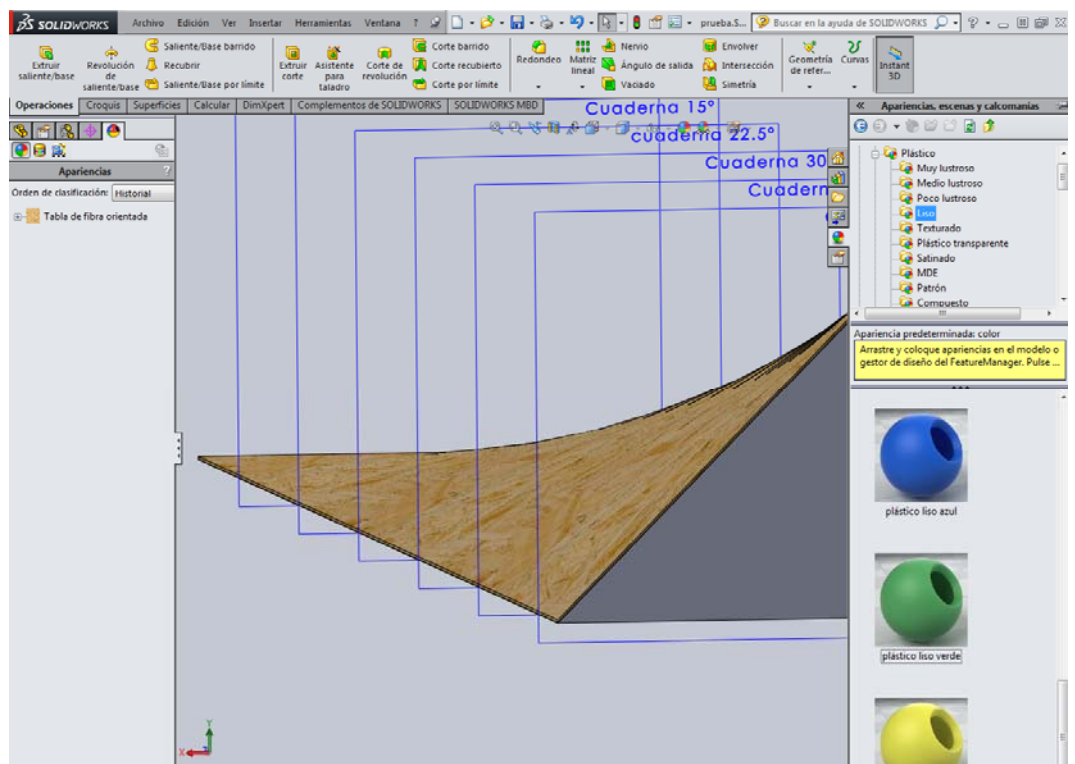


Figura 74. Superficie texturizada y aplicación de material y apariencia a la rampa.

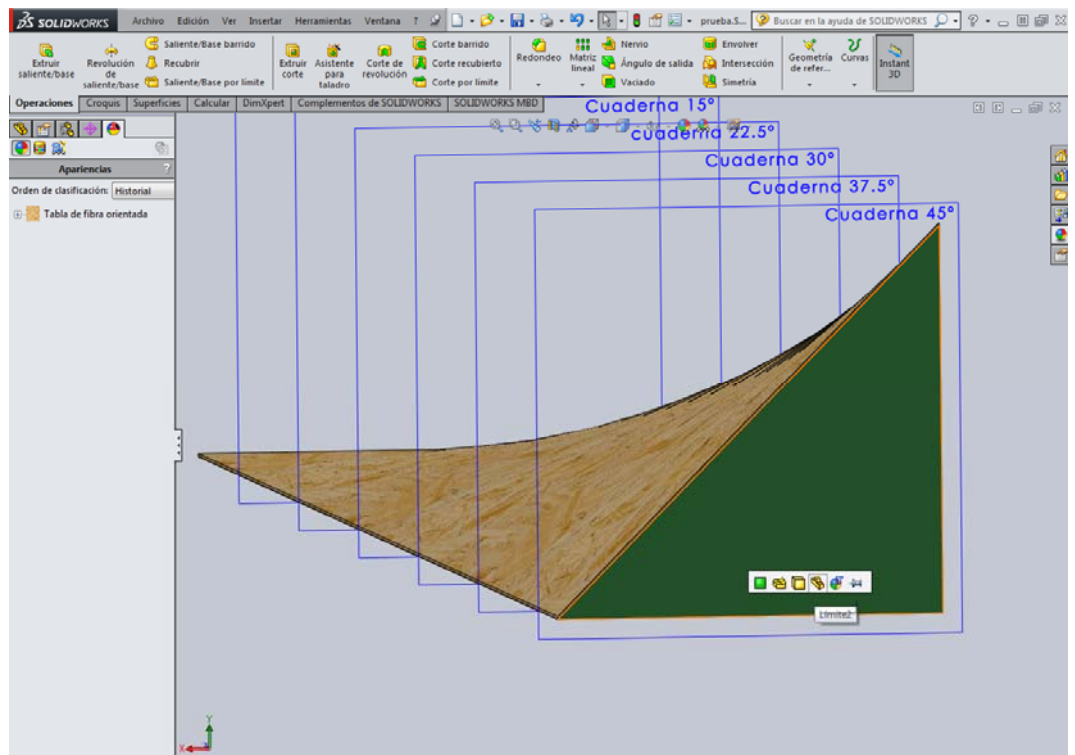


Figura 75. Superficie de ensayo y rampa con textura, material y apariencia aplicadas.

Los dos sólidos texturizados se ven de forma independiente como se muestra en las Figuras 76 y 77.

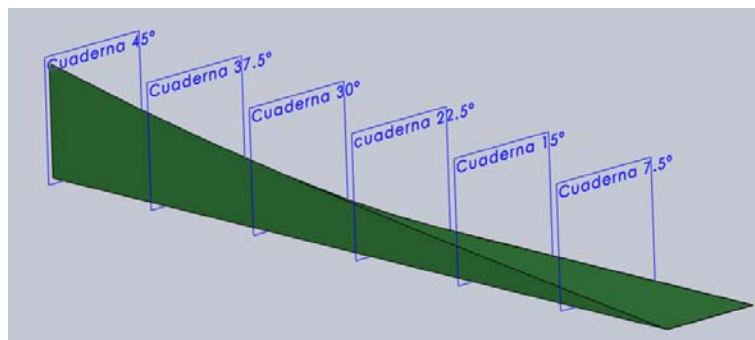


Figura 76. Rampa con textura, material y apariencia.

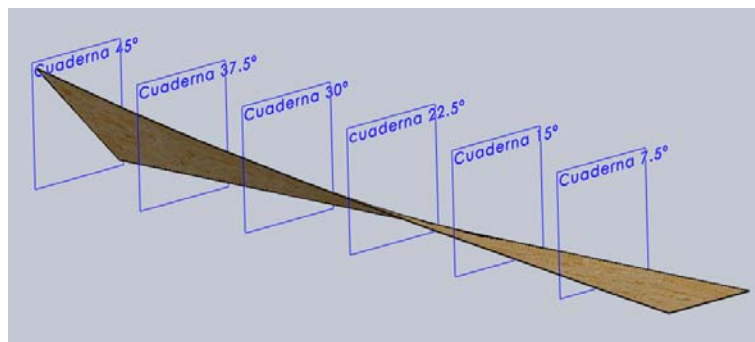


Figura 77. Superficie de ensayo con textura, material y apariencia.

#### 4.3.1.4. Cortes en rampa para obtención de soportes a prototipar

Una vez alcanzado el diseño de los dos sólidos, se dispone de todo lo necesario para realizar las simulaciones, pero para contrastar los resultados de las simulaciones con ensayos reales, es necesario disponer de la maqueta del tractor modificada y de la rampa construida, para esta construcción es necesario diseñar unos soportes que se han fabricado con impresión 3D.

Para el diseño de estos soportes se parte del sólido rampa y se realizan cortes de 3cm. Como en el diseño inicial se posicionaron planos paralelos que coincidían con las inclinaciones nominales cada 7,5 grados a partir del 0, se van a realizar los cortes a partir de cada uno de esos planos denominados en el dibujo cuadernas.

Se han creado planos equidistantes a las cuadernas a una distancia de 30mm como se puede ver en la Figura 78.

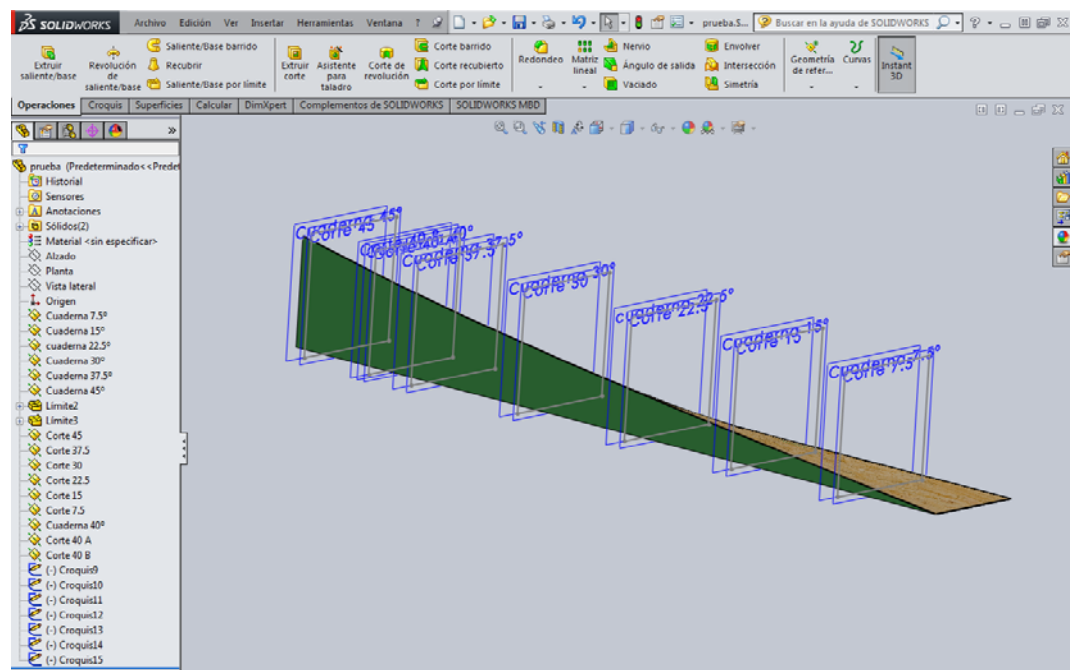


Figura 78. Disposición de los planos de corte para obtención de soportes.

La secuencia de realización de los soportes sigue los pasos mostrados en las Figuras 79, 80 y 81 y el resultado en la Figura 82.



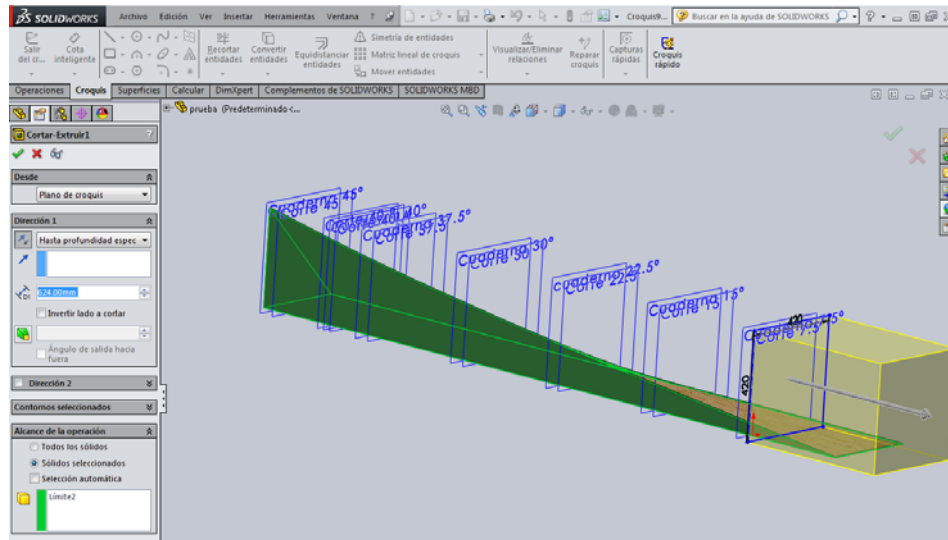


Figura 79. Corte-Extruir para extraer material de la inclinación 0 a 7,5 grados.

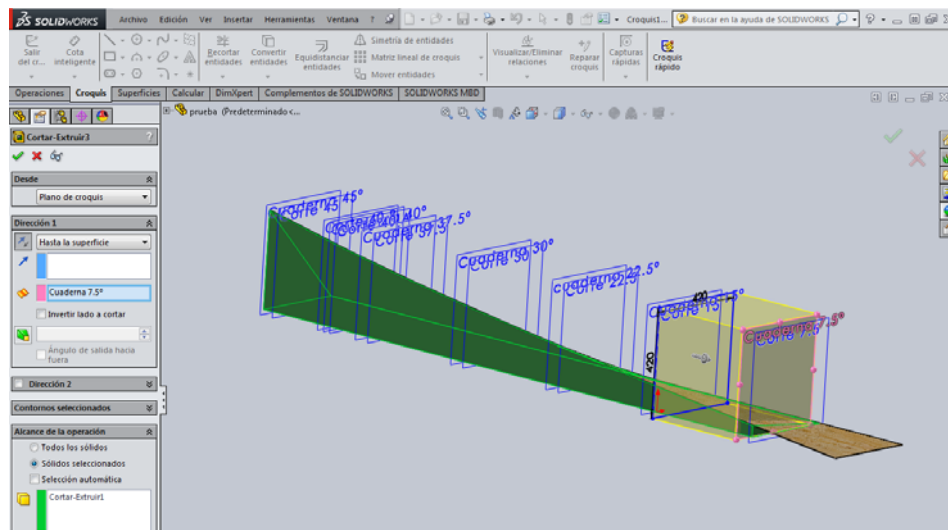


Figura 80. Corte-Extruir para extraer material de la inclinación 7,5 a 15 grados.

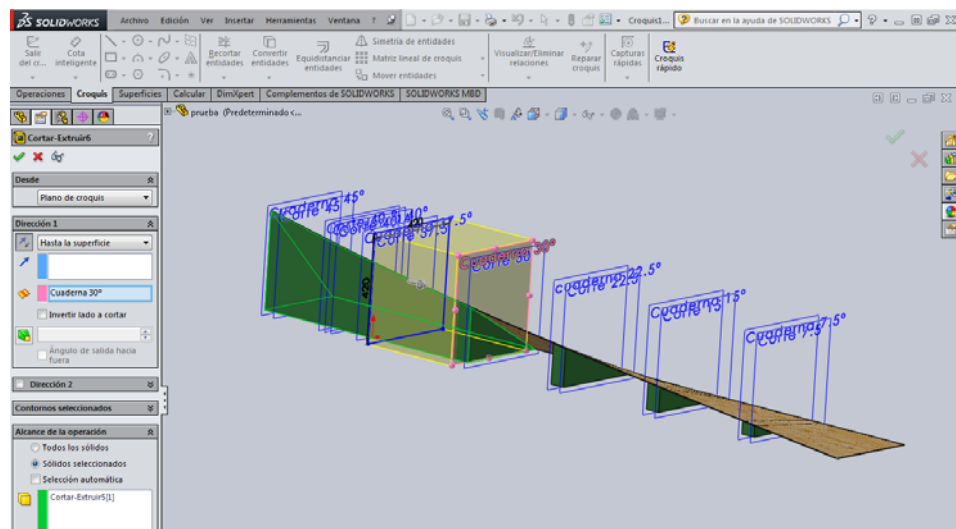


Figura 81. Proceso de Corte-Extruir para extraer material entre soporte y soporte de forma sucesiva hasta tener todos los soportes independientes.

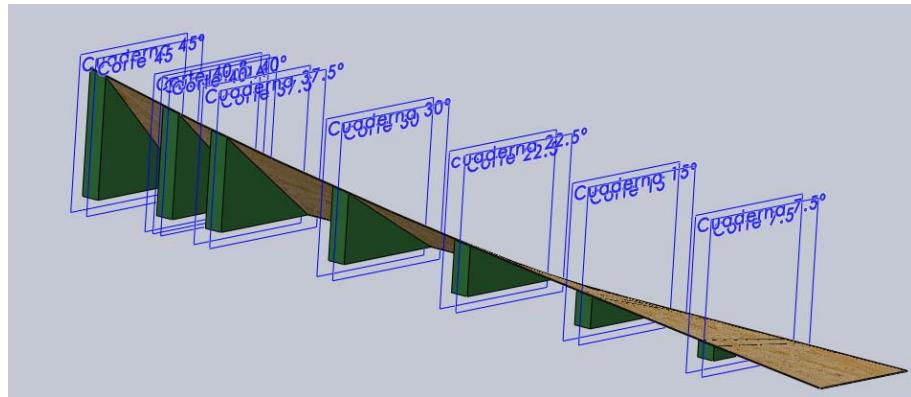


Figura 82. Modelado de soportes.

Estos soportes son sólidos y su peso es alto, con el fin de economizar gastos en el proceso de impresión 3D se procede a aligerar su peso y para ello se modifica su diseño de manera que no se reduzca su resistencia ni su funcionalidad. Para ello se dibujan croquis en la superficie de una de las caras de cada soporte y se extrae el material mediante Corte-Extruir tomando como base estos croquis. Estas operaciones se pueden ver en las Figuras 83 y 84 y el resultado en la Figura 85.

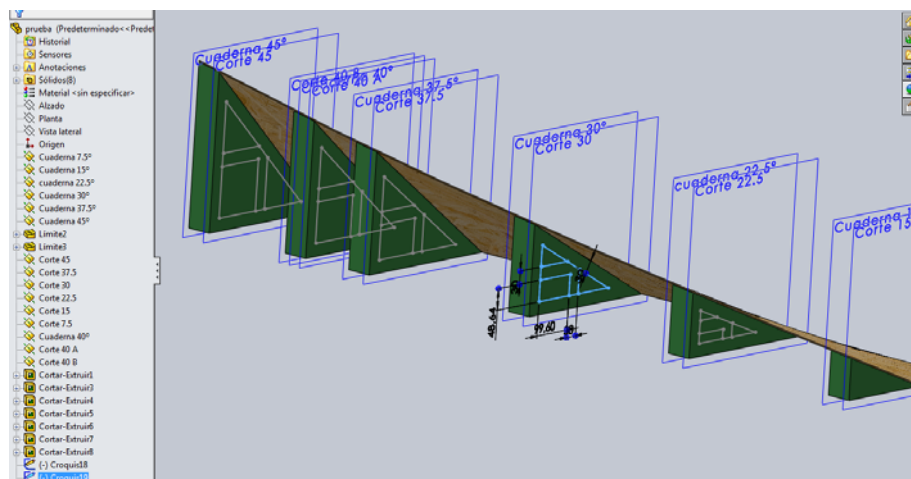


Figura 83. Croquis para aligerar soportes.

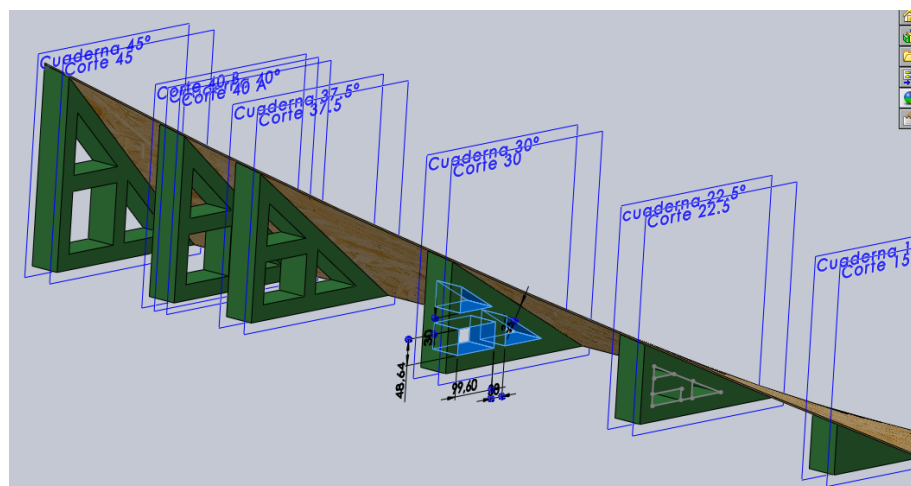


Figura 84. Croquis para aligerar soportes

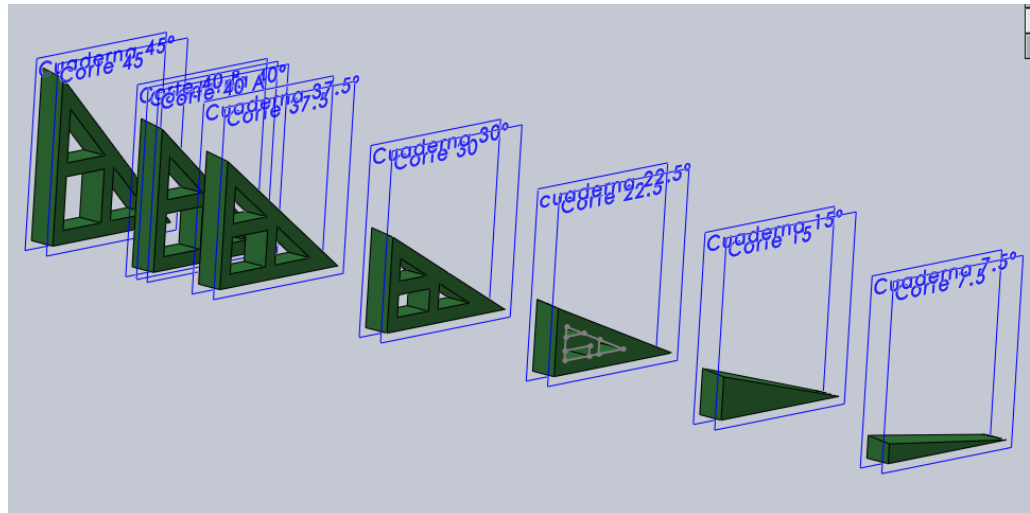


Figura 85. Resultado de los soportes aligerados.

#### 4.3.1.5. Modificación del tamaño de la superficie

Una vez diseñada la rampa, en el proceso de construcción de la misma se descubrió que la longitud necesaria era mayor que la diseñada, ya que en las simulaciones, el tractor volcaba a una inclinación muy próxima o incluso superior a 45 grados en función de la velocidad impuesta y en el caso de los ensayos con la maqueta real ocurría de forma similar.

Por ello se ha decidido modificar la longitud de la rampa hasta que la inclinación alcanzada sea en 50 grados en lugar de 45 grados como se había dispuesto en el diseño inicial.

El diseño se ha modificado para tal fin introduciendo nuevos soportes diseñados con el mismo procedimiento que los anteriores y aumentando el tamaño de la superficie de ensayo siguiendo las direcciones de los nuevos soportes.

Esto se muestra en la Figura 86.

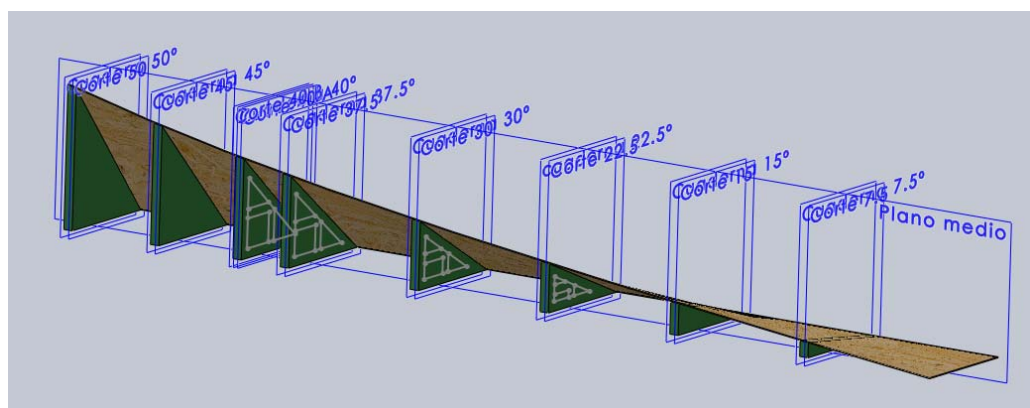


Figura 86. Modificación de tamaño de la superficie de ensayo y los soportes.

#### 4.3.1.6 División de los soportes en piezas a ensamblar

Los soportes creados por modelado tienen diferentes tamaños, para que puedan ser prototipados con la impresora 3D disponible es necesario que no excedan del tamaño de la máquina, por ello, se ha practicado una serie de secciones a cada soporte para que se puedan fabricar haciendo uso de esta técnica.

A modo de ejemplo se muestra el soporte correspondiente a la cuaderna de 7,5 grados dividida en dos piezas y el ensamblaje de las mismas en la Figura 87 y en la Figura 88 los cortes correspondientes a la cuaderna situada a una inclinación de 50 grados que ha sido dividida en tres piezas.

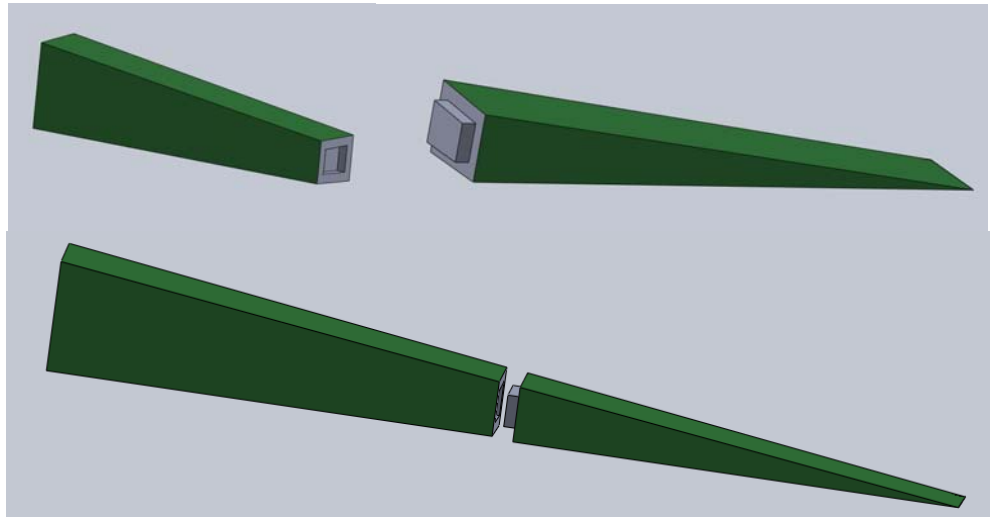


Figura 87. División y ensamblaje de soporte en dos piezas.

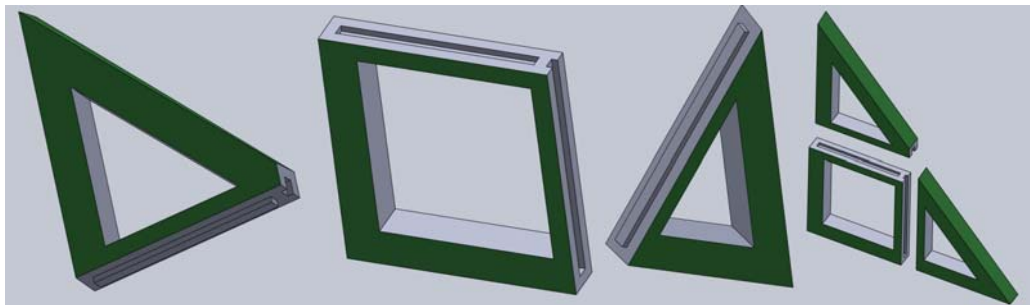


Figura 88. División y ensamblaje de soporte en tres piezas.

El resultado final del proceso de modelado se puede ver en la Figura 89.

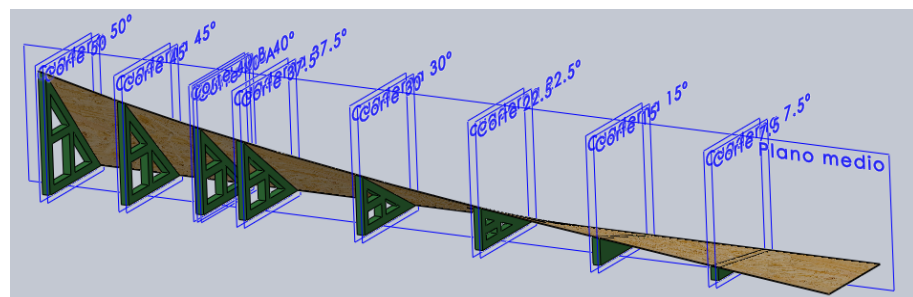


Figura 89. Rampa con inclinación de 50 grados modelada

El resultado renderizado final del proceso de modelado se puede ver en la Figura 90.

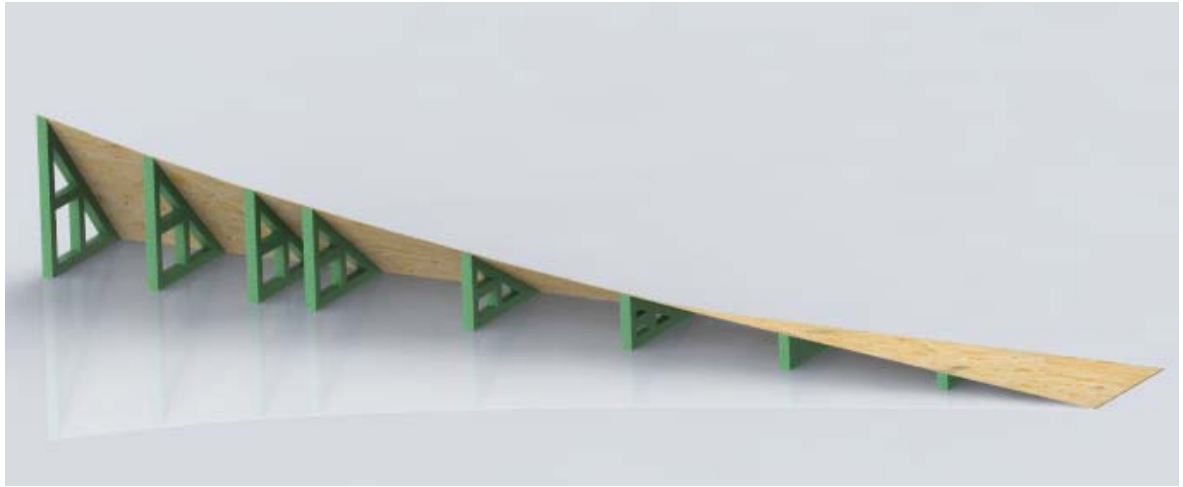


Figura 90. Rampa y superficie renderizadas.

#### 4.4. Superficie de ensayo construida

La superficie de ensayo construida consta en su base de un bastidor de madera sobre el que se han colocado unas cuadernas de ABS obtenidas por impresión 3D (Fig. 91).



Figura 91. Cuadernas de ABS Plus prototipadas mediante impresión 3D.

Este bastidor de madera y la piezas que lo componen han sido fabricadas y montadas tal y como se define en el apartado 3.5 y siguiendo las distancias entre los ejes de los cuadrillos de madera que lo forman, que han quedado definidas en la Figura 65 del apartado 4.3.1.1.

El diseño y medidas del bastidor, de las cuadernas, de la chapa de DM de 3mm y de todas las piezas que ensambladas forman la maqueta de la superficie de ensayo a escala 1:16, se han podido conseguir a partir de las piezas realizadas en el modelado 3D descrito paso a paso en el apartado 4.3 y cuyos bocetos se muestran en la Figura 92.



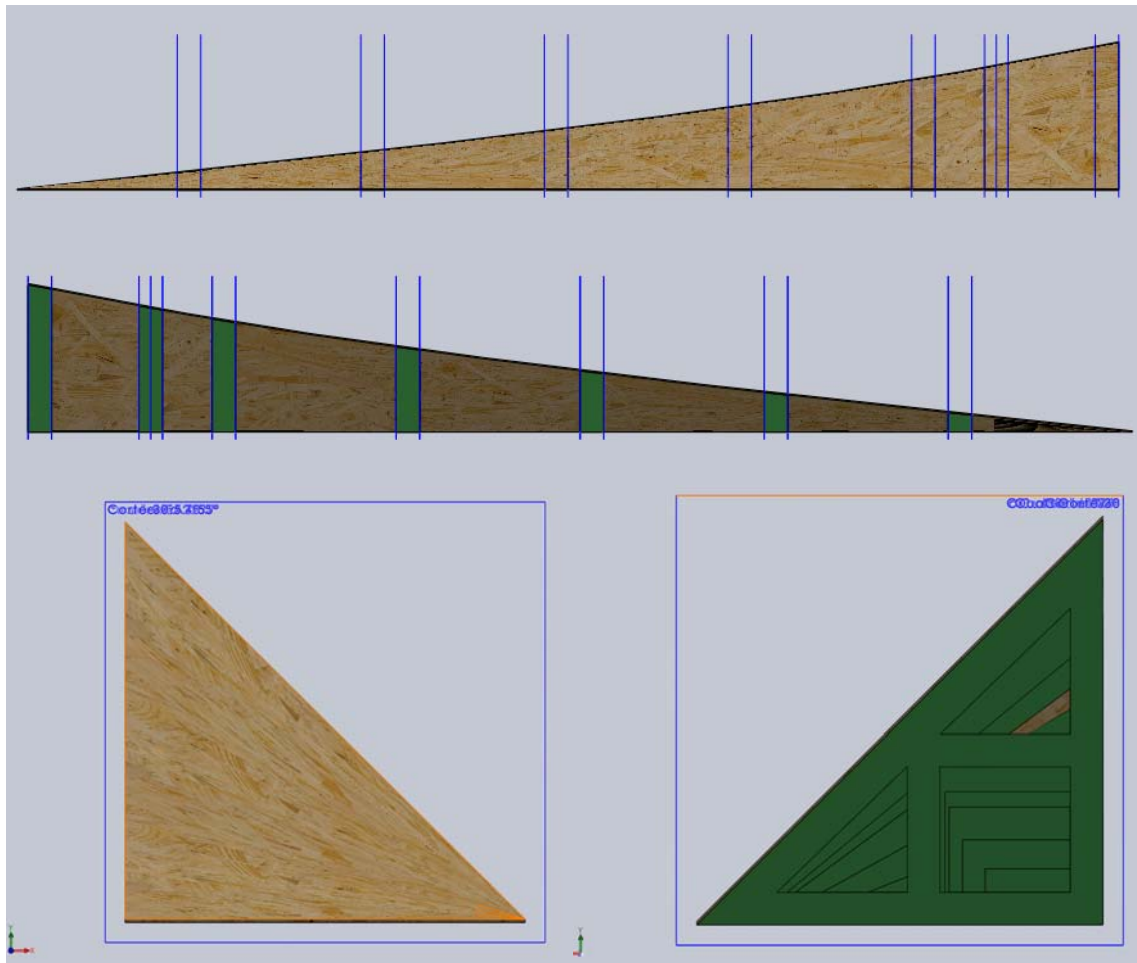


Figura 92. Piezas modeladas en 3D a partir de las que se ha construido la superficie de ensayo.

Sobre el bastidor y las cuadernas, se ha colocado la plancha de DM que ha servido como superficie de ensayo donde se ha desplazado la maqueta del tractor a escala 1:16.

Esta plancha cubre una parte horizontal sin pendiente y la rampa modelada, el ancho total es de 375mm que tiene el ancho de la superficie de revolución, con pendiente variable, más 625mm que tiene la parte horizontal, de forma que el ancho completo es de 1m.

El largo de la chapa tiene los 3125mm que la rampa alcanza a los 50 grados de pendiente, más 245 mm que se han dejado de forma horizontal para que el tractor al comienzo del ensayo y la simulación pueda permanecer en esa posición, por lo que el largo total es de 3370mm (3,37m).

En la Figura 93 se muestra el diseño 3D de la superficie de revolución que da la forma a la parte de chapa de DM que queda inclinada de forma variable respecto al eje en el que el tractor avanza, y en la Figura 94 puede verse el desarrollo de esa superficie de revolución que ha podido ser obtenida desde el programa de diseño CAD SolidWorks con el que se ha realizado el modelado, y ha sido indispensable para cortar de forma exacta la chapa de DM y poder montarla posteriormente de forma correcta.



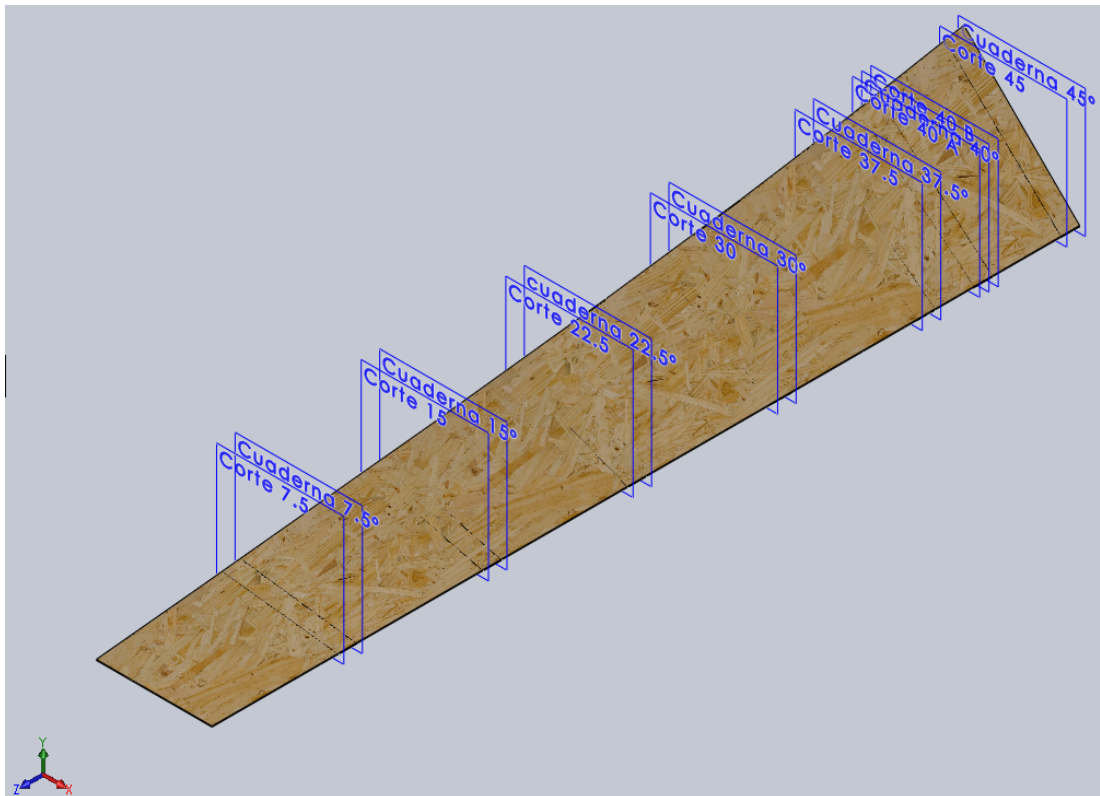


Figura 93. Superficie de ensayo modelada en 3D.

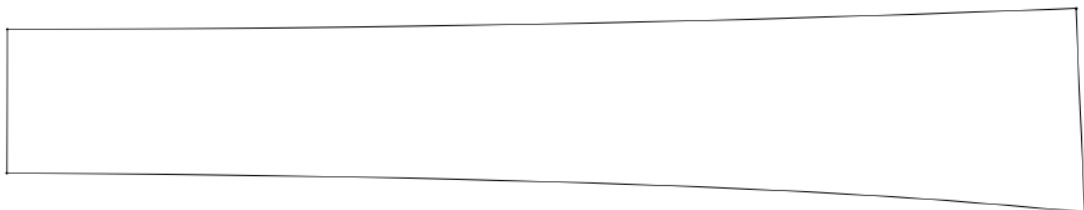


Figura 94. Desarrollo de la superficie de revolución modelada en 3D.

La composición del bastidor, con las cuadernas montadas y la chapa de DM colocada siguiendo el desarrollo de la superficie de revolución, incluyendo un rail intermedio para evitar el deslizamiento de la maqueta del tractor en su desplazamiento, se puede ver en la Figura 95.



Figura 95. Montaje de bastidor de madera, cuadernas de ABS y chapa de DM.

Para dar un aspecto más realista al tiempo que facilitar la valoración del ángulo de vuelco del tractor y evitar el deslizamiento de éste cuando se encuentre en pendiente, se ha decidido tratar la superficie con un acabado que le confiera rugosidad y color. Las pinturas empleadas para ello se muestran en la Figura 96 y el resultado de su aplicación en la Figura 97.

<p>PINTURA SPRAY</p> <p>SPSIL 8594 VERDE</p>	<p>PINTURA EFECTO FORJA</p> <p>Esmalte Anticorrosivo Negro Forja (MTN INDUSTRIAL)</p>	<p>PINTURA EFECTO FORJA</p> <p>Esmalte Anticorrosivo Gris Forja (MTN INDUSTRIAL)</p>
		

Figura 96. Pinturas empleadas en el acabado de la superficie de ensayo.

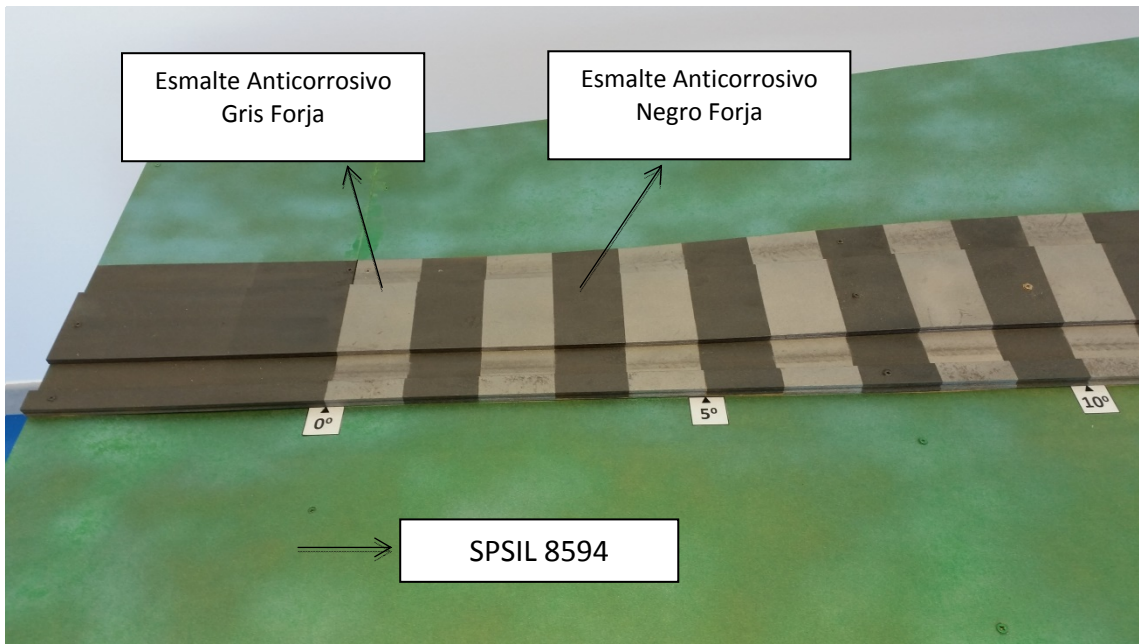


Figura 97. Pinturas aplicadas a la superficie de ensayo.

El resultado de la construcción y acabado de la rampa y la superficie de ensayo completa es el que aparece en las Figuras 98 y 99.

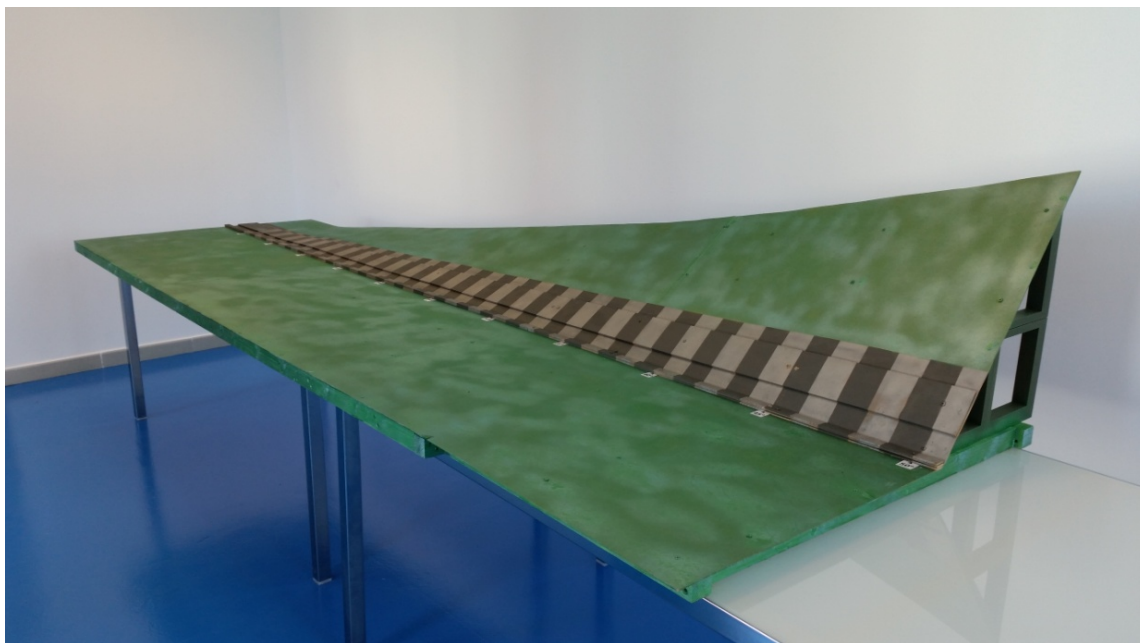


Figura 98. Superficie de ensayo una vez terminada.

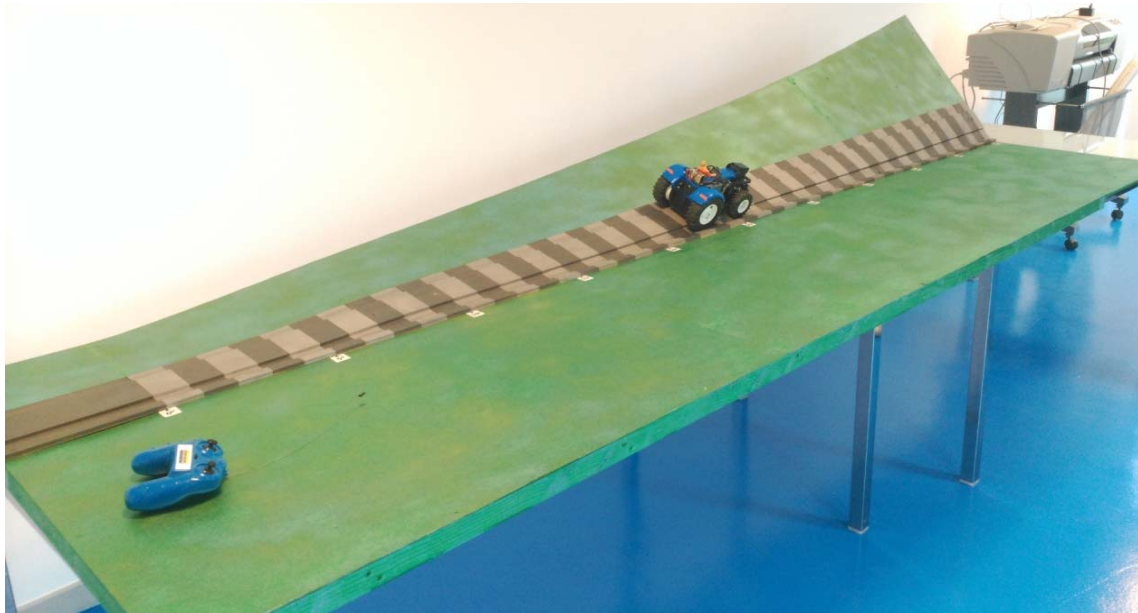


Figure 99. Tractor ensayado sobre la rampa construida.

#### 4.5. Resultados de los ensayos de vuelco lateral

El ángulo de vuelco, el tiempo de vuelco y el ángulo de activación se han determinado estableciendo el valor medio procedente de los tres ensayos llevados a cabo para cada una de las velocidades ensayadas.

Para la determinación del tiempo de activación del arco se ha elegido el peor de los tres valores obtenidos en cada ensayo.

Tabla 04. Resultados de los ensayos de vuelco lateral con la maqueta del tractor y la rampa.

Parámetro	Resultado			
	A	B	C	D
Velocidad a escala 1:16 (km/h)	0	1.42	1.88	2.53
Velocidad real (km/h)	0	22.65	30.01	40.50
Activación del arco ROPS (grados)	-	40.5	41.7	42.7
Situación de vuelco (grados)	44.3	44.67	44.33	44.33
Tiempo de activación (s)*	--	0.56	0.54	0.69

\*Valor máximo de los tres ensayos.

La Tabla 04 muestra los resultados experimentales de los ensayos de vuelco lateral con el tractor a escala en condiciones estacionarias (A) y en movimiento a tres valores diferentes de velocidad constante (B,C yD).

La activación del arco se ha retrasado conforme mayor es la velocidad, posiblemente debido a un retraso en la orden de activación, en cualquier caso, en todas las pruebas, el despliegue del arco comenzó antes del inicio del vuelco, lo que demuestra la eficacia y garantiza la seguridad del sistema ROPS desarrollado.

El tiempo de activación máximo en los tres ensayos también se muestra en la tabla, en este caso se representa el dato más desfavorable. El valor que se ha obtenido es inferior al tiempo transcurrido para el vuelco de 90º lo que una vez más garantiza la eficacia del sistema de seguridad desarrollado.



#### 4.6. Resultados de los ensayos de simulación

Los ensayos de simulación del vuelco lateral se realizaron a las velocidades de 23,44 km/h, 29,62 km/h y 39,47 km/h. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 05.

No se ha podido realizar la prueba en condiciones estacionarias debido a las restricciones en el software.

La velocidad es un factor que aumenta el riesgo de vuelco. Los desplazamientos a alta velocidad hacen que el vuelco se produzca con una pendiente menor y por lo tanto aumenta el riesgo de que esto ocurra.

En términos absolutos, la simulación a velocidad de 40 km/h produjo un vuelco desde la ladera 2 grados menor que la de la simulación a 23,44 km/h.

Este resultado no coincide con lo que se ha obtenido en los ensayos con las maquetas en donde el ángulo de vuelco es mucho más parecido a diferentes velocidades. La diferencia podría ser debida a distintos valores de rugosidad, en cualquier caso las diferencias entran dentro de lo tolerable y no afectan al resultado final de la investigación.

Tabla 05. Resultados de los ensayos de simulación.

Parámetro	Ensayo		
	A	B	C
Velocidad a escala 1:16 (km/h)	1.46	1.88	2.53
Velocidad real (km/h)	23.44	29.62	39.47
Inicio de activación (grados)	45.00	44.50	43.0
Tiempo de activación (s)	0.40	0.40	0.60

Las Figuras 100 y 101 muestran el último fotograma de las escenas de simulación de vuelco con el arco abatido y desplegado respectivamente. De su observación se deduce la importancia del ROPS para salvar la vida del conductor del tractor.

Con el arco abatido, el vuelco del tractor supera los 90 grados (Fig. 100) lo que, sin duda, en una situación real conduciría a la muerte del conductor. Sin embargo, cuando se produce el despliegue de la estructura antivuelco, el tractor no pudo volcar un ángulo mayor de 90 grados (Fig. 101) evitándose así el aplastamiento del conductor.



Figura 100. Último fotograma de la escena de la simulación con el arco (ROPS) abatido.



Figura 101. Último fotograma de la escena de la simulación con el arco (ROPS) desplegado.

#### 4.7. Comparación entre los resultados de vuelco real y los de simulación

El tiempo de activación en la prueba experimental ha sido más largo que en la simulación dinámica (Tabla 04 y Tabla 05). Existen ligeras variaciones en los valores del ángulo de inicio del vuelco.

La Tabla 06 muestra los errores relativos entre los valores simulados y calculados a 22,65 , 30,01 y 40,50 km/h. El tiempo de vuelco en la prueba experimental es más largo que en la simulación dinámica. El error relativo máximo fue -17,67 % cuando la velocidad era 30,01 km/h.

Tabla 06. Error relativo entre los resultados de ambos ensayos. Simulación vs real.

Factor	Error relativo (%)		
	B	C	D
Velocidad real (km/h)	3.46	-1.31	-2.53
Inicio de vuelco (grados)	0.75	0.38	-3.01
Tiempo de vuelco (s)	-7.17	-17.67	-7.14

La estabilidad del tractor depende de muchos factores. Kelly y Rehugler (1980) identificaron 21 variables que pueden afectar la estabilidad de un tractor. Estas variables se clasifican en cinco categorías (Kim et al., 1987):

- propiedades estáticas del tractor
- propiedades dinámicas del tractor,
- condiciones iniciales,
- parámetros controlados por el conductor, y
- las condiciones del terreno.

En el análisis de la estabilidad lateral, es importante identificar el eje de inflexión. El eje de inclinación depende de la construcción del conjunto de la rueda y el eje delantero.

Cuando se conoce el diseño del eje de inclinación, se puede determinar la estabilidad lateral asumiendo momentos alrededor de ese eje.

La única diferencia entre un análisis estático y dinámico es que el último incluye los efectos de inercia (Kim et al., 1987).



Para el ángulo de inicio del vuelco cuando el tractor se encuentra en movimiento, el error relativo máximo entre el resultado simulado y los datos experimentales ha sido -3,01%, cuando la velocidad era 30,01 km/h.

Las diferencias en los resultados entre uno y otro medio han sido muy bajas, tolerables y se podría asumir en la fase de diseño de los elementos de seguridad, esto hace vaticinar un futuro muy alentador para elegir las simulaciones de vuelco con diferentes modelos de tractor como alternativa a un ensayo real.



## 5. CONCLUSIONES

1. La tecnología de fabricación aditiva ha resultado ser especialmente útil para la construcción de superficies que sería muy complicado realizar mediante técnicas de fabricación convencionales.
2. La creación de modelos y la posterior simulación dinámica de su comportamiento por ordenador es capaz de predecir con precisión el comportamiento del tractor de vuelco lateral.
3. El error relativo máximo para el ángulo de partida variable del vuelco entre el resultado simulado y los datos experimentales de la maqueta fue -3,01 %.
4. En los ensayos de vuelco reales, utilizando la maqueta modificada se ha puesto de manifiesto la utilidad del dispositivo electrónico y el desarrollo de sus sensores para el accionamiento automático del arco de seguridad.
5. Los escenarios de simulación de vuelco a través del modelado tractor con la posibilidad de ser modificados han permitido el estudio de situaciones diferentes. Por ello, ha sido posible analizar la influencia de los parámetros dimensionales del tractor y la influencia del uso y la activación automática de la estructura antivuelco a diferentes velocidades.
6. En todos los ensayos y las simulaciones, cuando la estructura antivuelco se desplegó, siempre se evitó que el tractor volcara más allá de 90 grados. Es sabido que el 100 % de los accidentes mortales fueron causados por vuelco del tractor de más de un cuarto de vuelta.
7. El uso de este modelo de simulación dinámica permitirá analizar el riesgo de situaciones de vuelco sin tener que llevar a cabo una verdadera prueba de vuelco con un tractor. Esto permite el ahorro de costes y evita el riesgo de accidentes por el conductor.
8. La velocidad es un factor que aumenta el riesgo de vuelco. La alta velocidad hace que el vuelco se produzca con una pendiente menor y por lo tanto aumenta el riesgo de que esto ocurra.



## 6. BIBLIOGRAFÍA

Arnal Atares, P., & Laguna Blanca, A. (2000). *Tractores y motores agrícolas*. Mundi-Prensa.

Davis, D., & Rehkugler, G. (1974). Agricultural wheel-tractor overturns. *Transactions of the ASABE* 17(3), 477-483.

Guasp Alburquerque, A. (2015) Modelado y Simulación Mecánica de Vuelco de Vehículo: Influencia de los Sistemas de Protección. UPCT

Hoy, R. M. (2009). Farm tractor rollover protection: why simply getting rollover protective structures installed on all tractors is not sufficient. *J. Agric. Safety Health*, 15(1), 3–4.

Instituto Nacional de Seguridad en el Trabajo. *Análisis de la siniestralidad en el sector agrario*. (2015). <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Instituto/Comision/GruposTrabajo/ficheros/AN%C3%81LISIS%20DE%20LA%20SINIESTRALIDAD%20EN%20EL%20SECTOR%20AGRARIO%20final%203.pdf>

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. *Instrucciones para la instalación de estructuras de protección en los tractores agrícolas con el fin de cumplir el Real Decreto 1215/1997, de 18 de julio*. (2015). <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Instituto/Comision/GruposTrabajo/tractores.pdf>

Kelly, J. E., & Rehkugler, G. E. (1980). Stability criteria for tractor operation on side slopes. *ASAE Special Publication, Engineering a safer machine*, p. 145-157. ASAE, St. Joseph, MI 49085.

Kim, K. W., & Rehkugler, G. E. (1987). A review of tractor dynamics and stability. *Trans. ASAE*, 30(3), 615-623.

Lee, H.-H. (2014). Engineering dynamicslabs with SolidWorks Motion 2014. *SDC Publications*. [http://myweb.ncku.edu.tw/~hhlee/Myweb\\_at\\_NCKU/SWD2014.html](http://myweb.ncku.edu.tw/~hhlee/Myweb_at_NCKU/SWD2014.html)

Liu, B., & Koc, A. (2015). Field test of a tractor rollover detection and emergency notification system. *J. Agric. Saf. Health* 21(2), 113-127.

Liu, J., & Ayers, P. (1998). Application of a tractor stability index for protective structure deployment. *J. Agric. Saf. Health Special Issue* 4(1), 171-181.

Liu, J., & Ayers, P. (1999). Off-road vehicle rollover and field testing of stability index. *J. Agric. Saf. Health* 5, 59-79.

Martin-Gorrioz, B., Ibarra Berrocal, I., Mínguez Samper, A., & Morente Sánchez, A. (2012). Accidentes por vuelco de tractor de la Región de Murcia: propuestas para su reducción. *Form. Segur. Lab.*, 123, 70–71.

Ojados Gonzalez, D., Martin-Gorrioz, B., Ibarra Berrocal, I., Miguel Hernandez, B., Caro Garcia, F., & Morales Sanchez, P. (2016). Development of an automatically deployable roll over protective structure for agricultural tractors: Prototype and first tests. *Comput. Electron. Agric.*, 124, 46-54.



Puche Navarro, A. J. (2014). Proyecto fin de carrera: Diseño y modelado de sistema de accionamiento automático de arco de seguridad antivuelco de tractores. *UPCT*.

Scarlett, A. J., Reed, J. N, Semple, D. A., Seward, P. C., Stockton, A. D., & Price, J. S. (2006). Operator roll-over protection on small vehicles. *Silsoe Research Institute. Research report 432. UK: HSE Books*.

Silleli, H., Dayioglu, M. A., Gultekin, A., Ekmekci, K., Yildiz, M. A., Akay, E., & Saranlı, G. (2007). Anchor mechanism to increase the operator clearance zone on narrow track wheeled agricultural tractors: prototype and first tests. *Biosyst. Eng.*, 97, 153–161.

Song, A., Huang, B. K., & Bowen, H. D. (1989). Simulating a powered model wheel-tractor on soft ground. *Trans. ASAE*, 32(1), 2-11.

Wang, X., Ayers, P., & Womac, A. R. (2009). Static simulation and analyses of mower's ROPS behavior in a finite element model. *J. Agric. Safety Health*, 15(4), 335-351.