

Trabajo fin de Grado

SIMULADOR DE CARRETILLA ELEVADORA

Autor:

Javier Marcote Vázquez

Tutores:

Daniel Dopico Dopico

Alberto Luaces Fernández

Julio, 2017





- **Introducción**
- **Software empleado**
- **Dinámica de sistemas multicuerpo**
- **Fuerzas**
- **Conclusiones**
- **Simulaciones**

- **Motivación**

- Encargo de Bridgestone Hispania S.A. de prueba pericial.

- **Objetivos**

- Simulación de carretilla elevadora basada en cálculo dinámico en tiempo real.
- Formación de operarios.
- Simulación de maniobras peligrosas que en la realidad serían imposible de realizar.

Introducción. Descripción de carretilla simulada

Carretilla elevadora Linde H35D-02



- **Motor:** diésel, 4 cilindros, 4 tiempos con turbocompresor.
- **Sistema hidráulico:** 1 Bomba hidráulica de desplazamiento variable, 2 motores de accionamiento hidráulico, 1 bomba hidráulica de desplazamiento fijo.
- **Frenado:** Transmisión hidrostática-Freno de servicio.
- **Dirección:** Sistema hidrostático. Volante actúa sobre cilindro de dirección.
- **Sistema eléctrico:** Alternador trifásico 12 V CC. Batería de 12 V y 88 Ah.

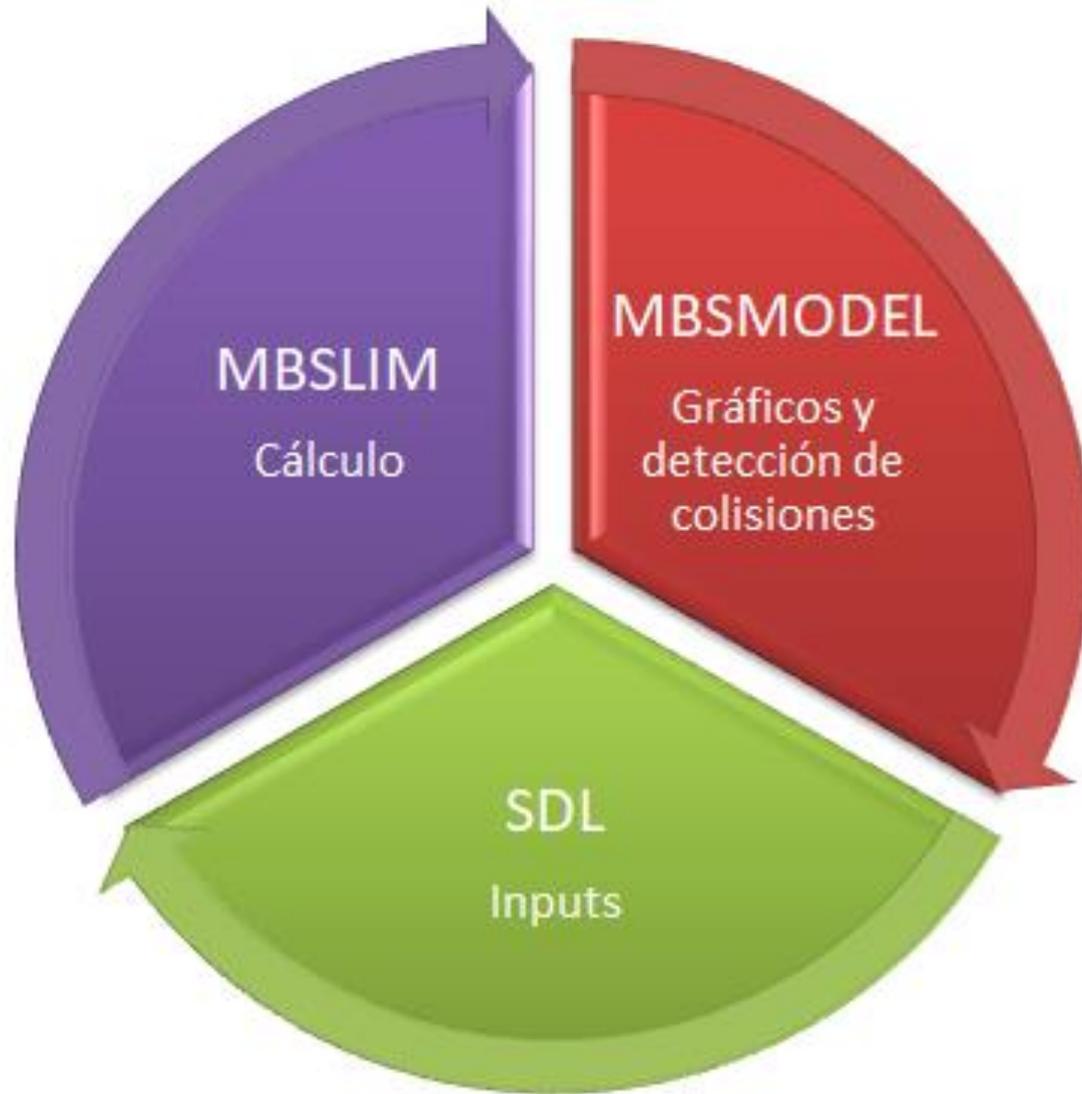
Introducción. Descripción de carretilla simulada

Carretilla elevadora Linde H35D-02

Datos técnicos

▪ Capacidad de carga	3500 kg	▪ Velocidad de conducción	22 km/h
▪ Tara	4680 kg	▪ Velocidad de elevación	0,55 m/s
▪ Elevación de la carga	3050 mm	▪ Aceleración	1,09 m/s ²
▪ Longitud total carretilla	3795 mm	▪ Potencia nominal del motor de conformidad con ISO 1585	44 kW
▪ Anchura total carretilla	1256 mm	▪ Velocidad nominal motor	2700 rpm

Software empleado



Software empleado. MBSLIM

- Desarrollado por el Laboratorio de Ingeniería Mecánica (LIM).
- Biblioteca de funciones para la dinámica de sistemas multicuerpo.
- Planteamiento y solución de las ecuaciones del movimiento.
- Programada en lenguaje Fortran 2003.



Sistema multicuerpo

- Modelo de un mecanismo de sólidos y sus restricciones.

Dinámica de sistemas multicuerpo

- Resolución numérica general de las ecuaciones del movimiento por ordenador.

- **Fase 1. Modelización**

- Configuración inicial.
- Topología del mecanismo.
- Propiedades físicas y geométricas.

- **Fase 2. Formulación**

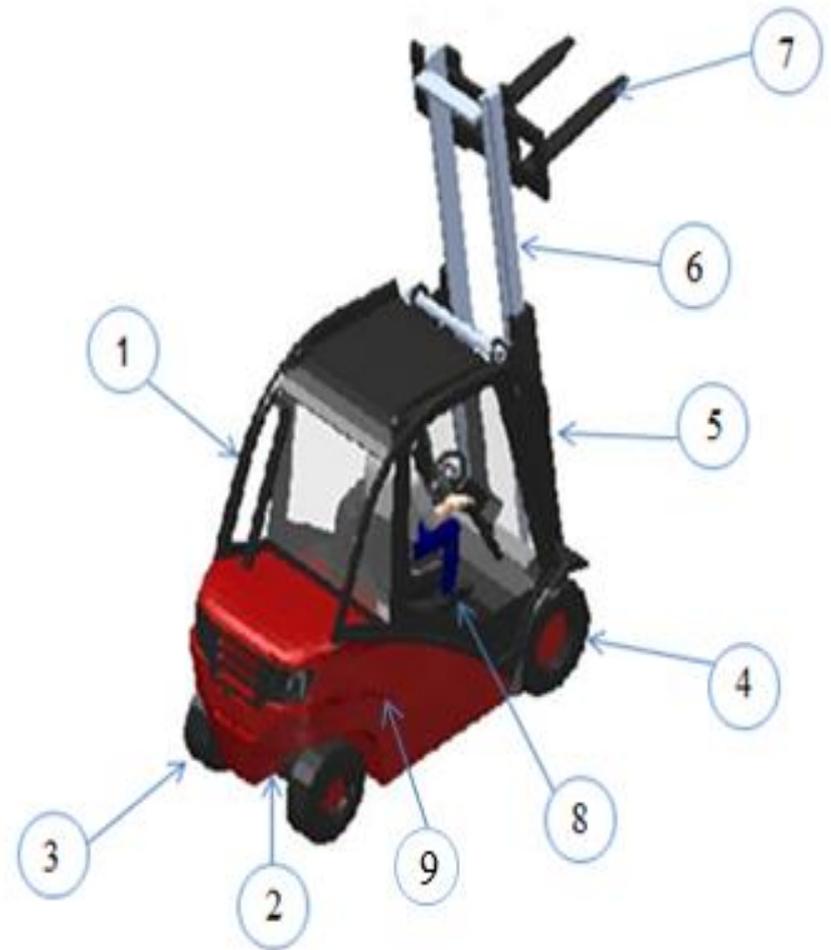
- Planteamiento y resolución de las ecuaciones del movimiento.



Dinámica de sistemas multicuerpo. Modelización

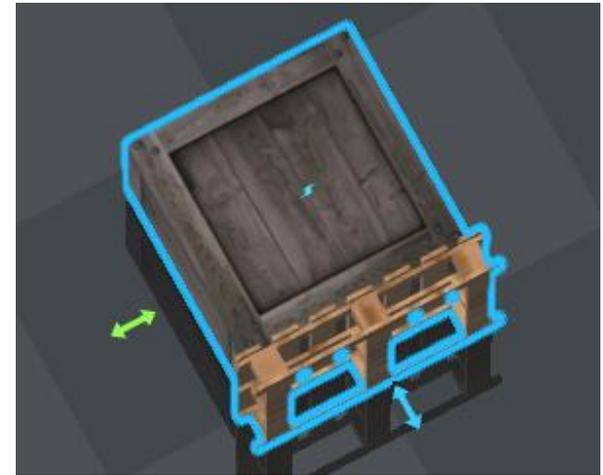
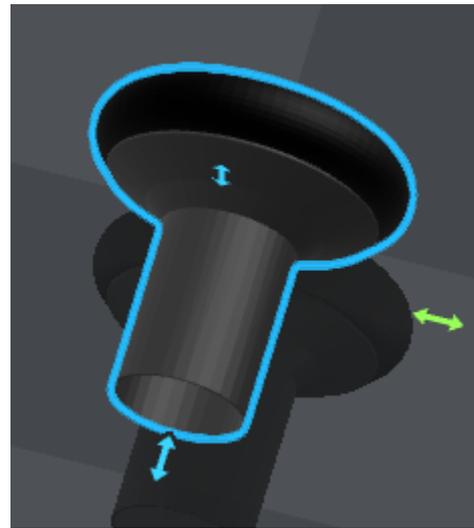
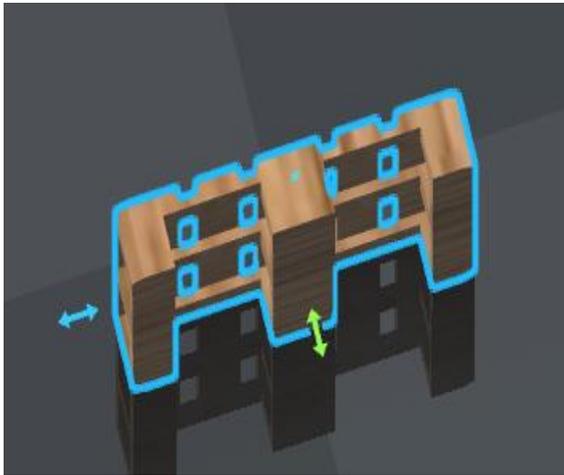
Sólidos del modelo

Número de sólido	Nombre
1	Chasis y cabina
2	Eje basculante
3	Ruedas traseras
4	Ruedas delanteras
5	Mástil 1
6	Mástil 2
7	Uñas y útil
8	Conductor
9	Combustible



Cargas

- Pallet.
- Virola.
- Pallet con carga.



Configuración inicial y topología

- **Coordenadas: variables que definen al mecanismo**
 - Indican la situación del sólido en el espacio.
- **Sistema de coordenadas mixto**
 - Coordenadas naturales
 - Puntos y vectores.
 - Definición sencilla y sistemática.
 - Reducido número de ecuaciones de restricción sencillas.
 - Coordenadas relativas
 - Ángulos y distancias .
 - Definición más natural de los GDL del modelo.
 - Ideal para consideración de momentos, fuerzas en los pares y guiado cinemático.
 - Aumenta coste computacional.



Configuración inicial y topología

Coordenadas naturales

- **Se modeliza con 4 entidades con las que formar un triedro**
 - Definición completa de la posición de cada sólido en el espacio.
 - Generar subespacio local.
 - Matrices de masas y fuerzas generalizadas gravitatorias constantes.
 - Evitar fuerzas dependientes de la velocidad (Coriolis y arrastre).
- **Se añaden entidades adicionales**
 - Necesarias para la definición de los pares.
 - Dependencia lineal del subespacio generado.



Configuración inicial y topología

Coordenadas relativas

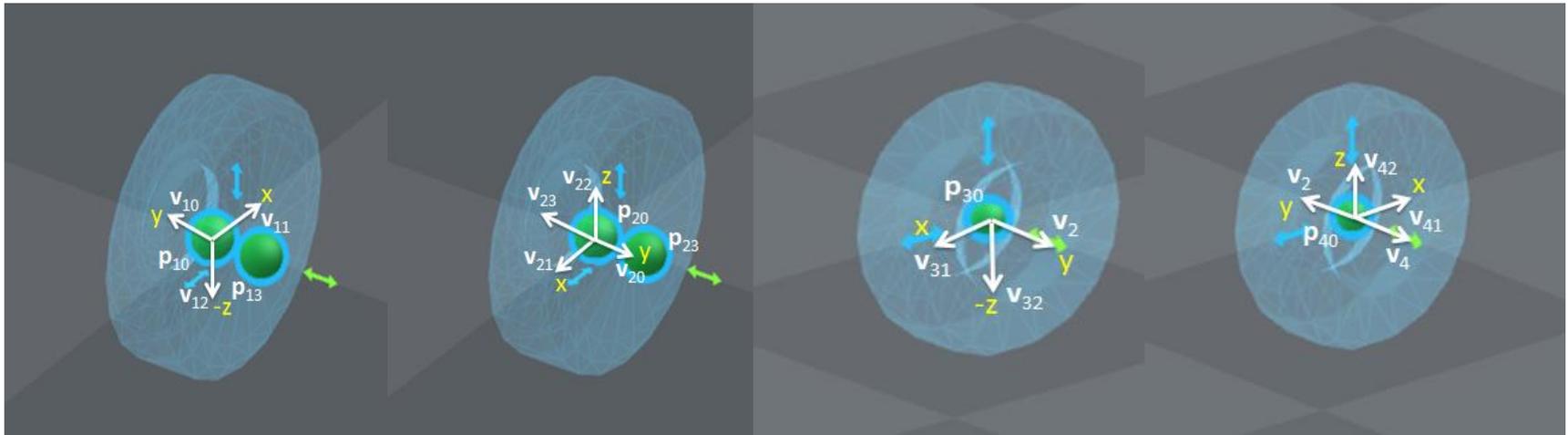
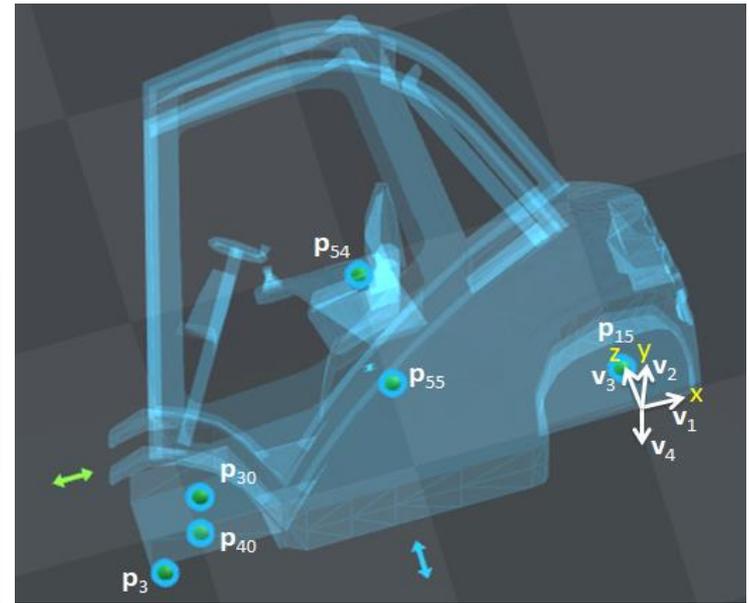
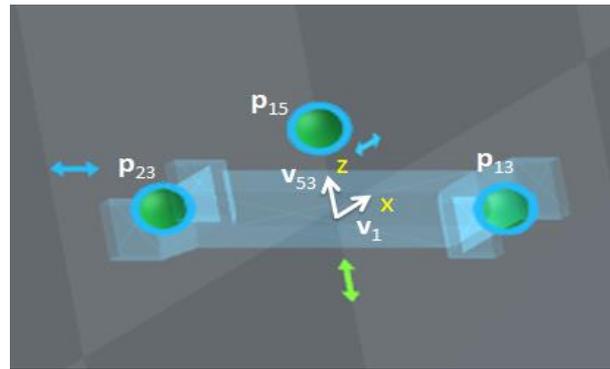
- **Utilizadas para pares cinemáticos guiados**
 - Movimientos de la carretilla guiados por restricciones reónomas sobre las coordenadas relativas de los pares guiados.
- **Utilizadas para pares cinemáticos no guiados explícitamente**
 - Declaran como GDL las variables que los definen.
 - Guiados por la dinámica de la carretilla.



Dinámica de sistemas multicuerpo. Modelización

Coordenadas naturales

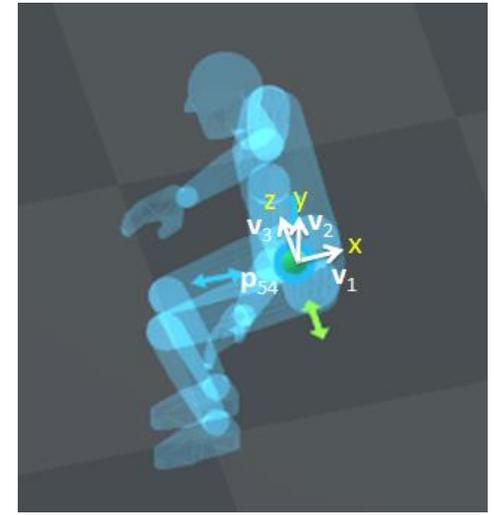
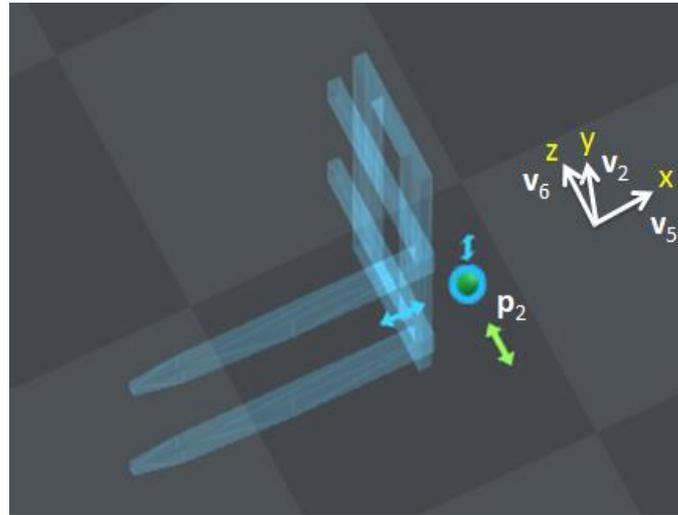
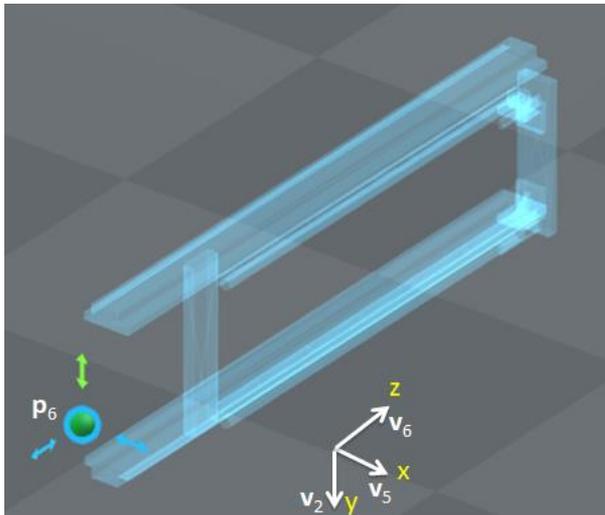
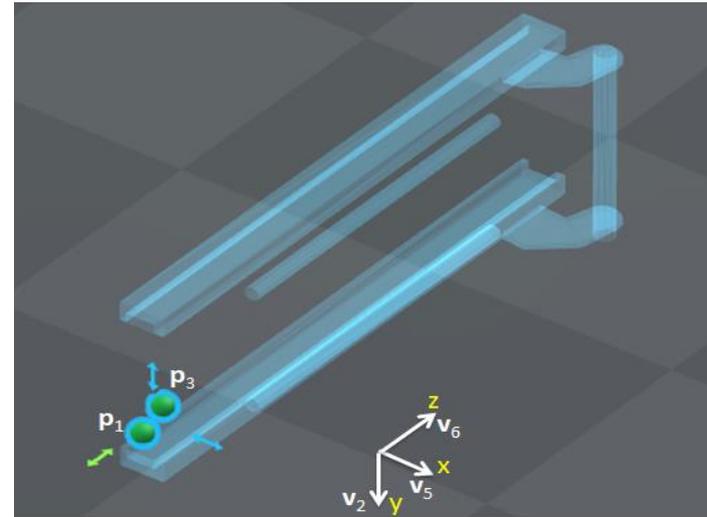
▪ Sólidos de la carretilla



Dinámica de sistemas multicuerpo. Modelización

Coordenadas naturales

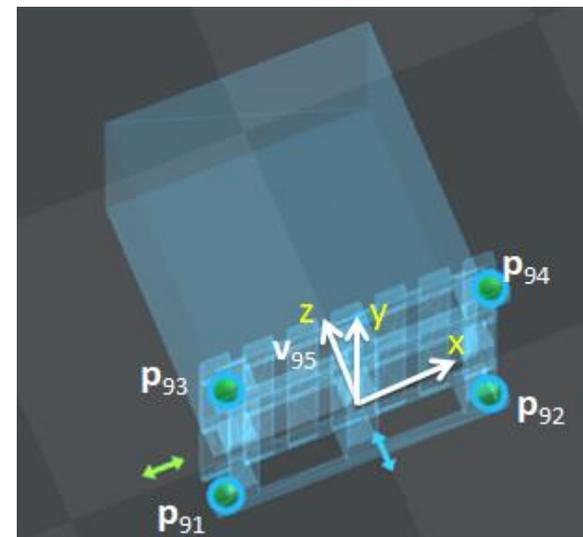
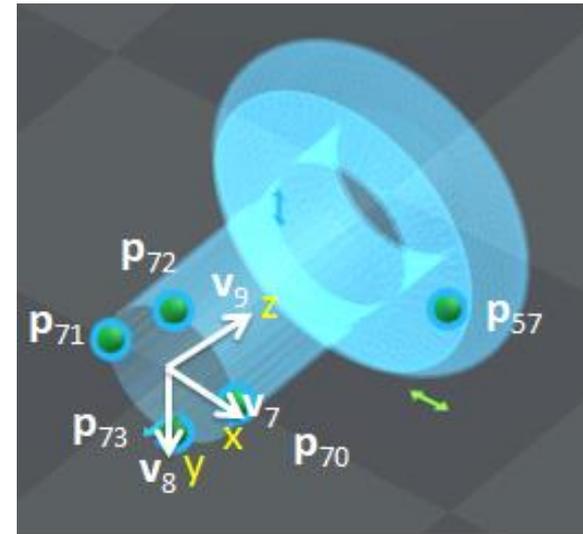
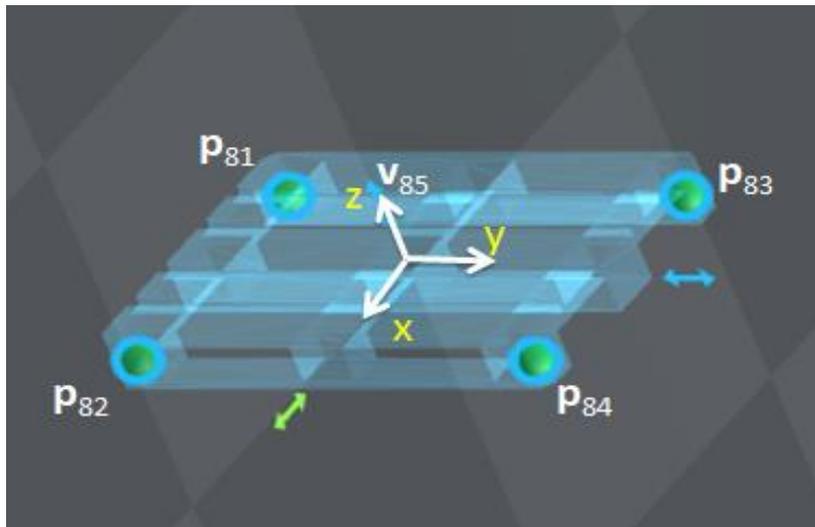
- Sólidos de la carretilla



Dinámica de sistemas multicuerpo. Modelización

Coordenadas naturales

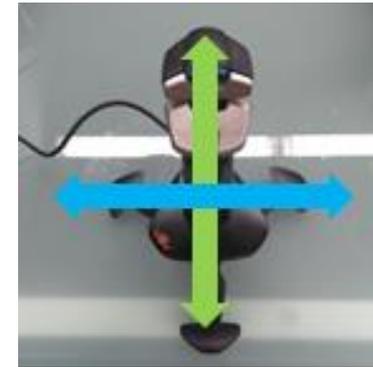
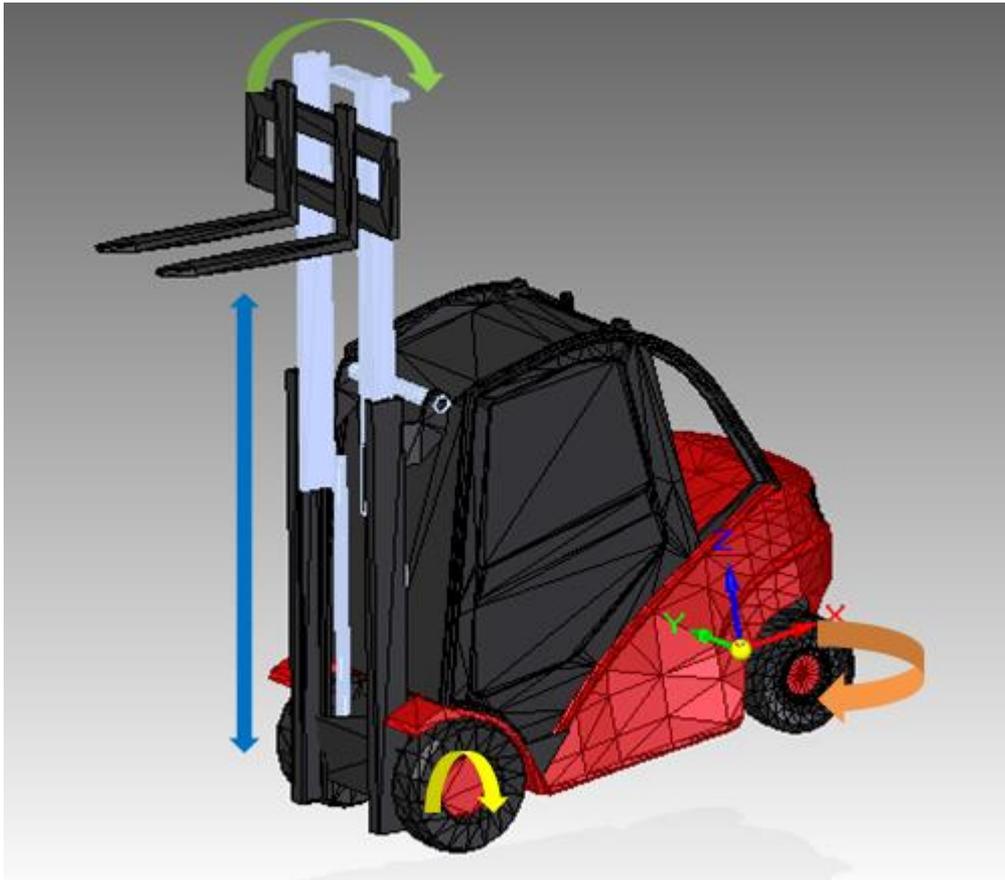
■ Cargas



Dinámica de sistemas multicuerpo. Modelización

Coordenadas relativas

- GDL guiados



Software empleado. SDL (Simple DirectMedia Layer)

Biblioteca que proporciona un acceso sencillo al audio, teclado, ratón, joysticks y a la tarjeta gráfica.

▪ Joysticks.

- Control de los actuadores de la carretilla elevadora.

▪ Teclado y ratón.

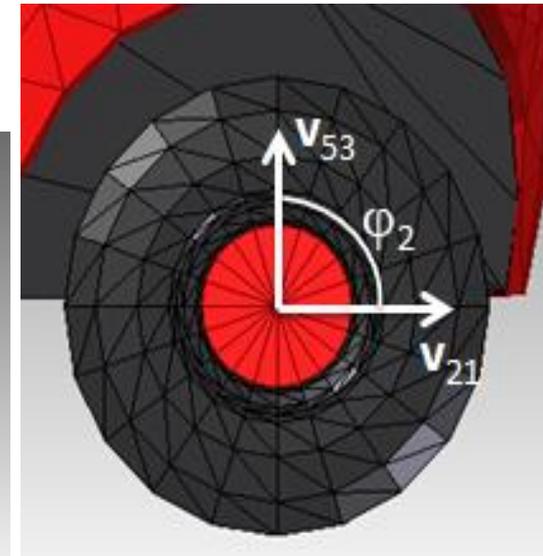
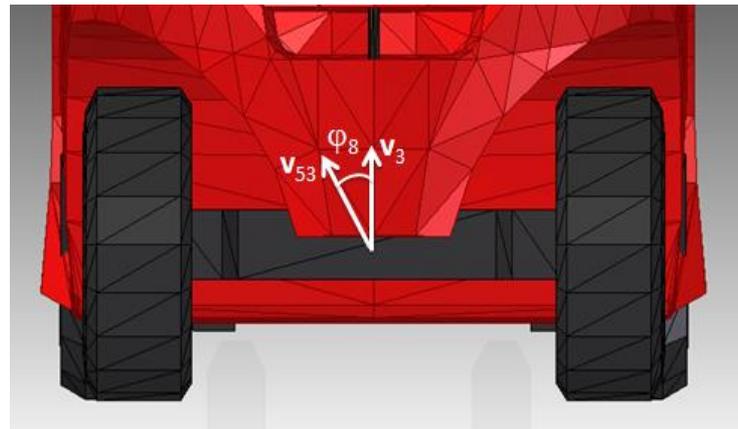
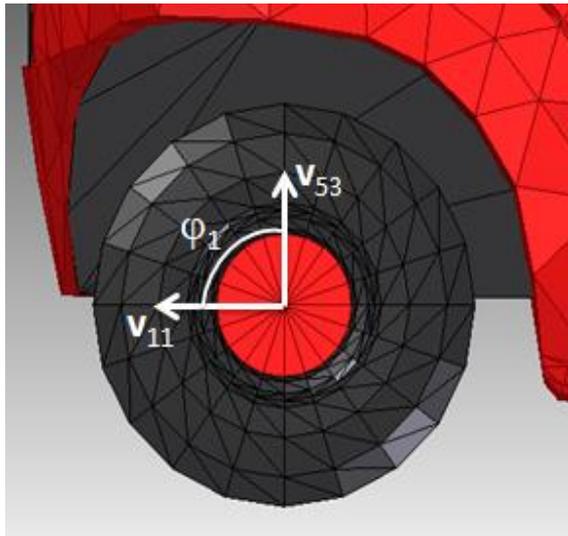
- Control de cámara lenta, inicio, rebobinado y punto de vista.



Dinámica de sistemas multicuerpo. Modelización

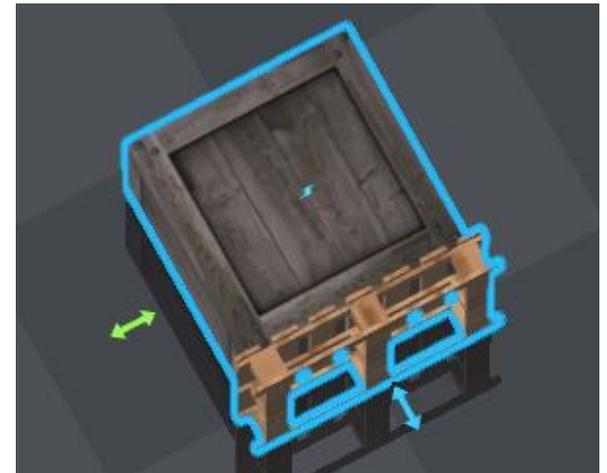
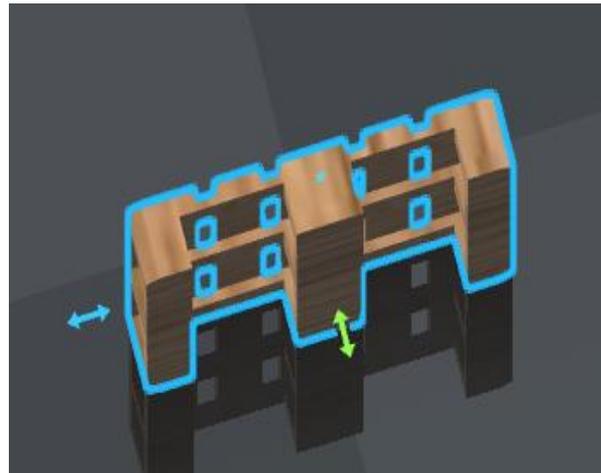
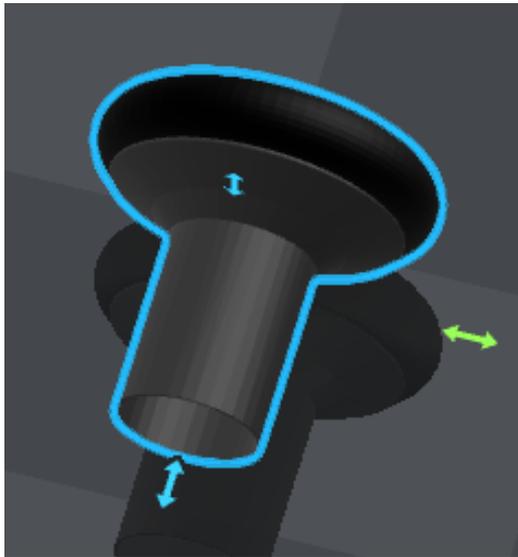
Coordenadas relativas

- GDL no guiados explícitamente

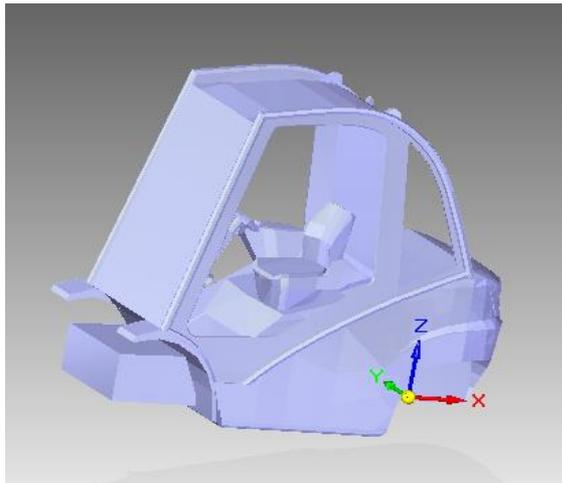


Dinámica de sistemas multicuerpo. Modelización

Sólidos libres



Propiedades físicas y geométricas



$$m_{\text{chasisycabina}} = 3086,66 \text{ kg}$$

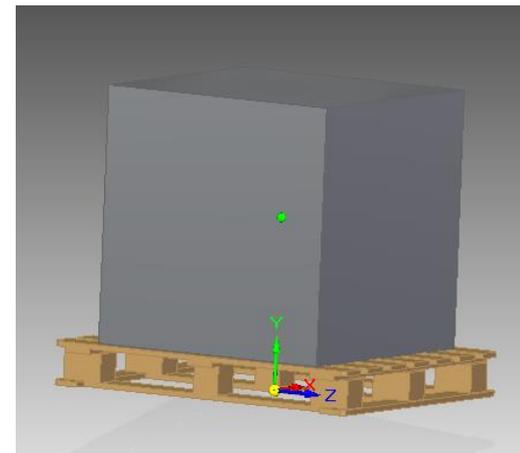
$$\mathbf{r}_{g \text{ chasisycabina}} = (-0,1885, 0, 0,5) \text{ m}$$

$$\mathbf{I}_{g \text{ chasisycabina}} = \begin{pmatrix} 615,568 & 5,345 & -28,019 \\ 5,345 & 918,414 & 1,341 \\ -28,019 & 1,341 & 617,661 \end{pmatrix} \text{ kg}\times\text{m}^2$$

$$m_{\text{palletcargado}} = m_{\text{pallet}} + m_{\text{carga}} = 1527,296 \text{ kg}$$

$$\mathbf{r}_{g \text{ palletcargado}} = (0, 0, 0,599) \text{ m}$$

$$\mathbf{I}_{g \text{ palletcargado}} = \begin{pmatrix} 239,775 & 0 & 0 \\ 0 & 234,846 & 0 \\ 0 & 0 & 215,775 \end{pmatrix} \text{ kg}\times\text{m}^2$$



Formulación de las ecuaciones de la dinámica

- Se emplea para resolver la dinámica en cada instante de tiempo la formulación ALI3-P (Lagrange aumentado en index-3 con proyecciones ortogonales):
 - Método general de resolución de las ecuaciones de movimiento y sus restricciones.



▪ Gravitatorias

▪ Modelos de fuerzas

- Transmisión.
- **Modelo de neumático.**
 - ✓ TmEasy. Modelo dirigido al análisis dinámico de vehículos y al diseño de sistemas de control.
- **Fuerzas de contacto.**
 - ✓ Contacto tipo esfera-plano.
 - ✓ Contacto tipo malla-malla.
- **Fuerzas de rozamiento.**

▪ Momentos tope

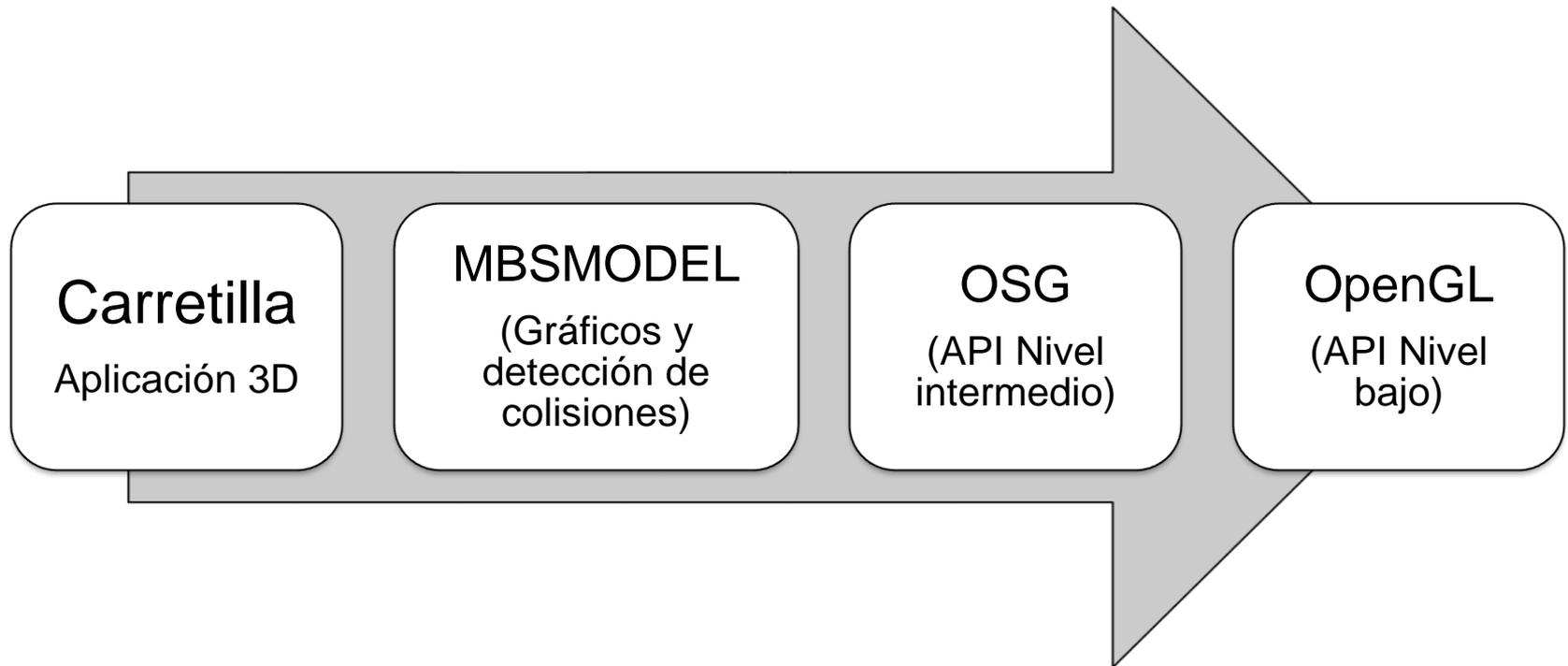
Software empleado. MBSMODEL

- **Desarrollado por el Laboratorio de Ingeniería Mecánica (LIM).**
- **Biblioteca de funciones encargada de:**
 - **Detección de colisiones para la dinámica.**
 - **Representación de los escenarios.**
 - **Representación de todas las piezas móviles del sistema.**
- **Programada en lenguaje C++.**



Software empleado. MBSMODEL

- Utiliza la OSG (OpenSceneGraph) que a su vez utiliza OpenGL (Open Graphics Library) para el renderizado 3D.



Conclusiones

- Maniobras de desplazamiento de cargas.
- Controles idénticos a los de la carretilla real.
- Funcionamiento en tiempo real.
- Manejo sencillo e interfaz agradable.



Simulaciones



Video en <https://www.youtube.com/user/LimUDC>

Simulaciones



Video en <https://www.youtube.com/user/LimUDC>

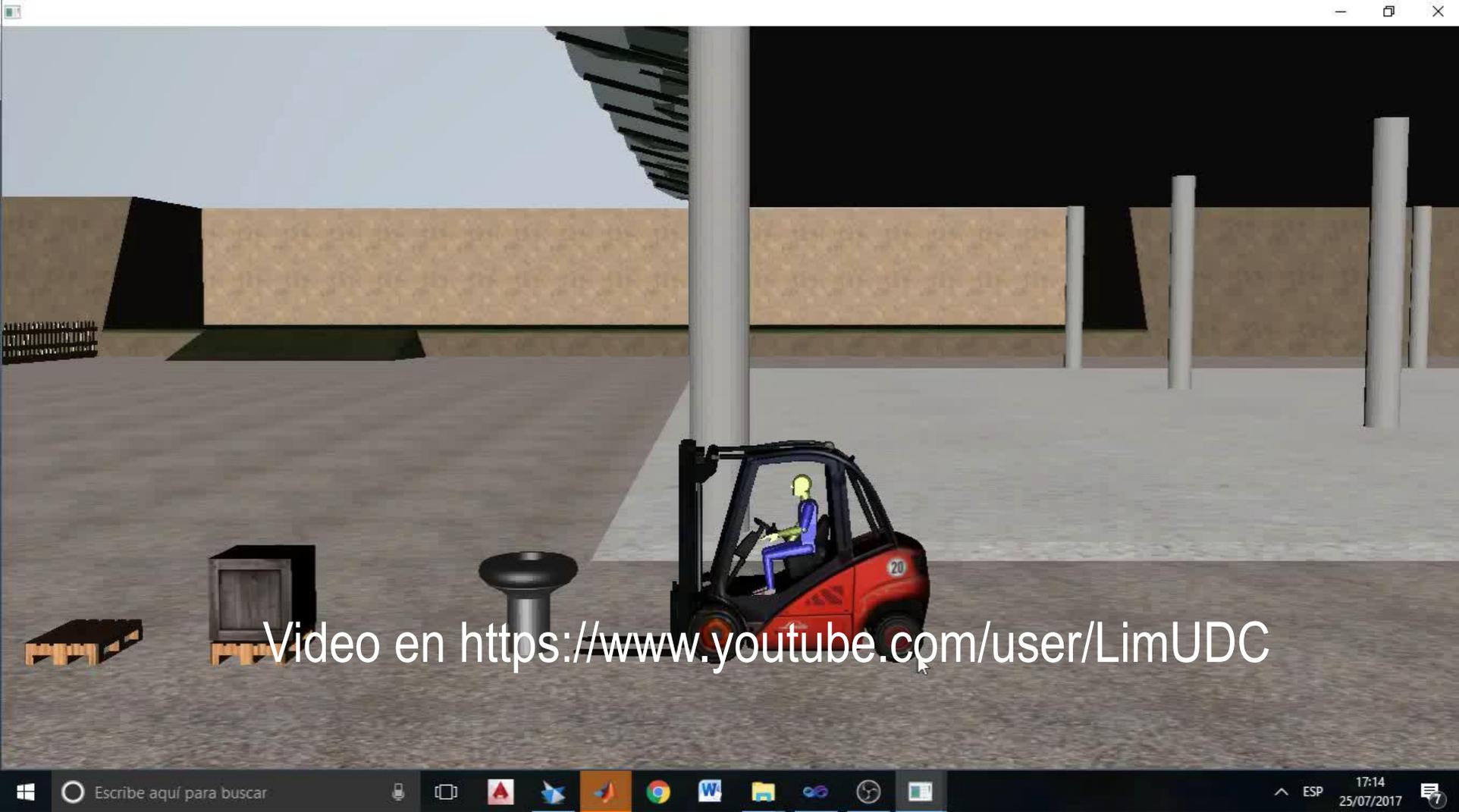
Simulaciones



Video en <https://www.youtube.com/user/LimUDC>



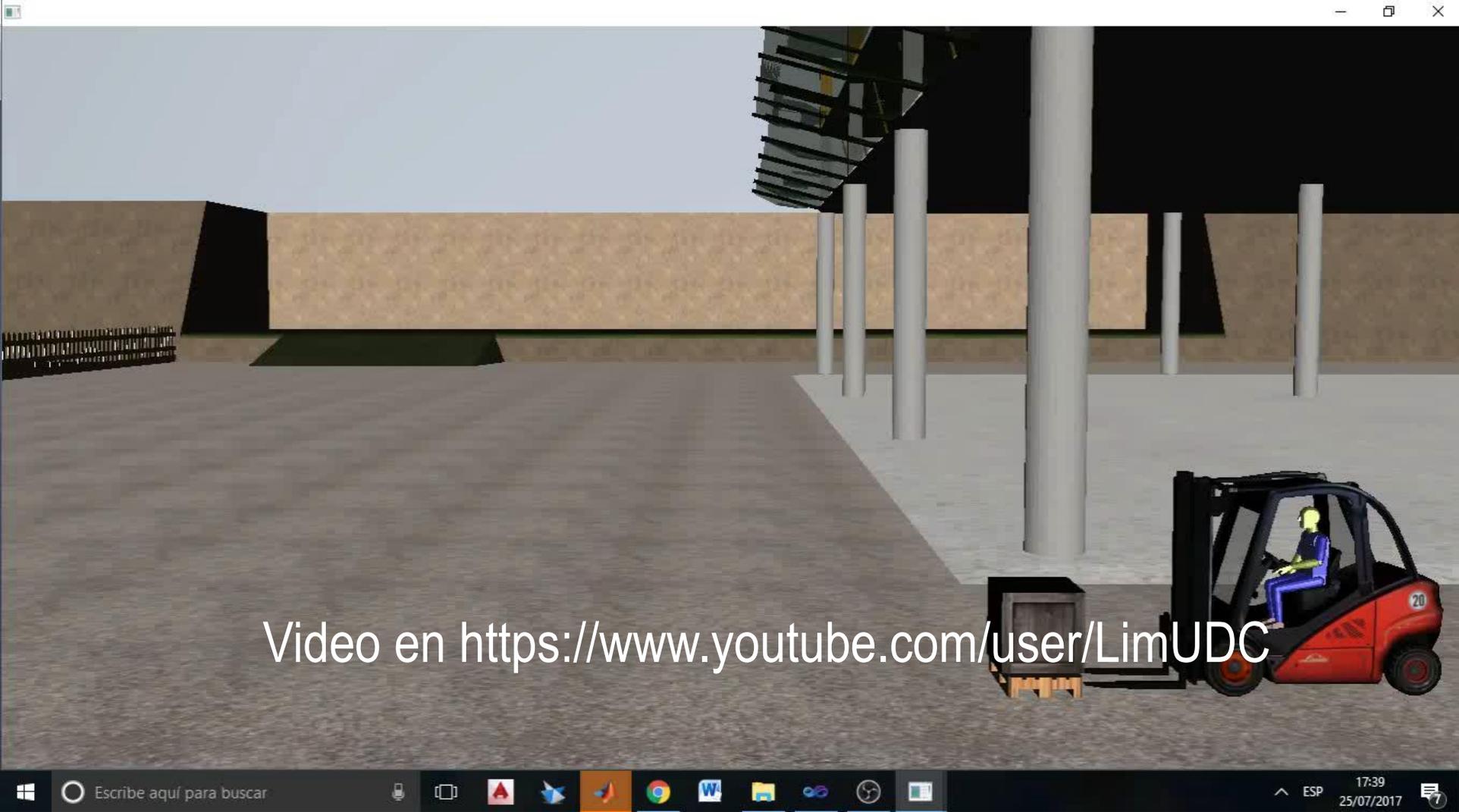
Simulaciones



Video en <https://www.youtube.com/user/LimUDC>



Simulaciones



Simulaciones



Trabajo fin de Grado

SIMULADOR DE CARRETILLA ELEVADORA

Autor:

Javier Marcote Vázquez

Tutores:

Daniel Dopico Dopico

Alberto Luaces Fernández

Julio, 2017

