



7º CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERIA MECANICA
7º CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECANICA
México D.F., 12 al 14 de Octubre de 2005

**SIMULADOR DE CARRETILLAS ELEVADORAS PARA LA FORMACIÓN Y
DISMINUCIÓN EN RIESGOS LABORALES: MOTOR GRÁFICO Y SIMULACIÓN
DINÁMICA**

**Iriarte Goñi, X. *, Aginaga García, J., Jiménez Bascones, J.M., San Miguel Induráin, J., Pintor Borobia, J.M.,
Remírez Perea, X., Gil Soto, J.**

*Dpto. de Ing. Mecánica, Energética y de Materiales, Universidad Pública de Navarra
Campus Arrosadía s/n 31006 Pamplona (España),
*e-mail: iriarte.28842@e.unavarra.es

RESUMEN

El objetivo del trabajo desarrollado ha consistido en el desarrollo de un moderno sistema de simulación para el entrenamiento en el manejo de carretillas elevadoras en entornos de almacenaje industrial. Este sistema de simulación virtual, pretende paliar las carencias existentes a la hora de llevar a cabo la formación de los conductores de carretillas elevadoras. Partiendo de un estudio de riesgos laborales asociados a su conducción, se ha construido un entorno virtual en el que el usuario debe realizar las tareas propias de un conductor de carretilla elevadora, en los distintos escenarios de que consta el simulador. En el presente artículo se describe el modo en el que se ha desarrollado el Motor Gráfico del simulador, explicando la estructura jerárquica de nodos ideada. También se profundiza en el desarrollo de la simulación dinámica, ya que el simulador resuelve la dinámica de la carretilla.

PALABRAS CLAVE: Simulación de mecanismos, Prevención de riesgos laborales, Entorno virtual.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo se enmarca dentro del Proyecto SIMUCEL, financiado por el Instituto Navarro de Salud Laboral y cuyo objetivo es el desarrollo de un SIMULador de Carretillas ELevadoras para la formación en la conducción de carretillas elevadoras y la disminución de los riesgos laborales asociados a su uso [1].

El manejo de las carretillas elevadoras es una tarea delicada de la que dependen no sólo la integridad de los productos que son transportados, sino la seguridad de los trabajadores del almacén (incluyendo al propio conductor). En la actualidad, y pese a existir una reglamentación legal al respecto, no se llega a aplicar ninguna regulación oficial y, por tanto, no está operativo un “permiso oficial de conducción de carretillas”. Esta falta de regulación, unida a la habitual imposibilidad de contar con lugares de entrenamiento, hace que a menudo los nuevos conductores de carretillas aprendan a manejarlas directamente en el propio lugar de trabajo.

No es por tanto de extrañar que se haya podido constatar que la principal causa de accidentes fatales con carretillas elevadoras está relacionada con la comisión de errores del conductor en el manejo de la carretilla. Errores que, también en muchos casos, generan en las empresas importantes costes económicos y sociales asociados a la rotura de productos, accidentes de trabajadores, etc.

La solución lógica de este problema se encuentra en el entrenamiento previo de los nuevos conductores y en la formación actualizada de los ya experimentados. Sin embargo, estas labores no pueden plantearse directamente en el almacén de producción por razones obvias de seguridad y control, sino en centros especializados. No obstante, el problema de esta solución es que, a su vez, cada almacén y cada tipo de carga pueden tener sus propias particularidades. Como consecuencia, se hace complicado, por no decir imposible, definir un almacén, unas cargas y unos ejercicios validos de forma genérica para la formación del operador de carretillas ante cualquier posible entorno de trabajo.

Con el objetivo de tratar de solventar estos problemas, existen equipos que podríamos llamar de “simulación simple” que pretenden cubrir las necesidades de este tipo de formación. Sin embargo, tanto su desarrollo como su introducción ha sido mínimo debido principalmente a la falta de: Calidad, en términos de inmersividad del operario y modelado de respuesta dinámica del sistema; adaptabilidad, a tipos de cargas, de equipos y de entornos de almacenaje; escalabilidad del equipo resultante.

A la vista de lo anteriormente comentado, el objetivo del trabajo desarrollado ha consistido en el desarrollo de un moderno sistema de simulación para el entrenamiento en el manejo de carretillas elevadoras en entornos de almacenaje industrial. Este sistema permitirá: el adiestramiento de nuevos operarios, sin necesidad de experiencia previa, y el reciclaje, con nuevos equipos, cargas y entornos de almacenaje, de operarios ya formados anteriormente.

El simulador desarrollado no se entiende como un sustituto completo de las prácticas realizadas con equipos reales; pero sí como el complemento ideal a las mismas, permitiendo formar y evaluar los conocimientos de los operarios en un entorno siempre seguro y controlado. Gracias al uso de las nuevas tecnologías de realidad virtual, el sistema permite el ensayo de diversas operaciones con diferentes tipos de cargas en entornos de complejidad variable, sin peligro alguno para las personas implicadas, los equipos usados, las cargas o las estructuras de almacenaje.

ESTRUCTURA DEL SIMULADOR

El programa de ordenador ha sido desarrollado de forma que sea escalable, con el objeto de que permita el uso de diversos medios de simulación, desde ordenadores personales hasta las más modernas técnicas de realidad virtual (sistemas de posicionamiento óptico, HMD, plataformas móviles, etc.) que faciliten al usuario del sistema una completa inmersión en el entorno simulado. Para ello, el conjunto de la aplicación informática ha sido dividido en módulos, convenientemente interconectados entre sí, facilitando esa futura escalabilidad, así como la posibilidad de poder trabajar posteriormente en la optimización individualizada de todos y cada uno de ellos. La Figura 1 muestra, de forma esquemática, los diferentes módulos de que consta la aplicación informática y su interconexión.

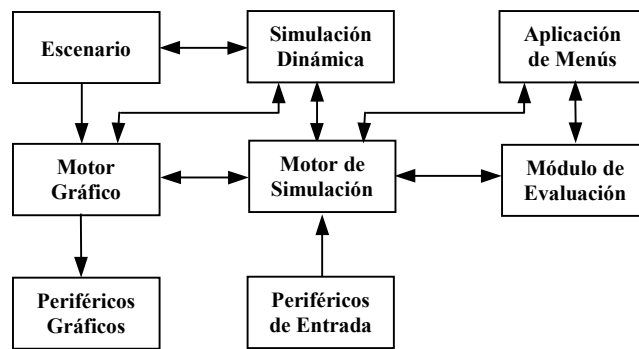


Fig. 1: Diagrama de bloques de la estructura del simulador.

El módulo principal, que ejerce de núcleo del simulador, es el Motor de Simulación. Su función principal consiste en la coordinación del resto de los componentes y módulos de software. Para ello, este módulo coordina todas las tareas realizadas por el simulador, recibiendo las entradas que procedan de los Periféricos de Entrada (volante, pedales, palancas, etc.), comunicándose con el módulo de Simulación Dinámica, de modo que recibe información sobre el estado de la carretilla, y comunicándose también con el Motor Gráfico encargado de la representación gráfica.

Al mismo tiempo, el Módulo de Evaluación evalúa si hay colisión entre los objetos móviles de la simulación (carretilla o palet transportado) y los objetos fijos del entorno (paredes, estanterías, palets, etc.). En caso de haberla, manda una señal al Motor de Simulación, para que éste advierta al usuario de que hay colisión mediante el Motor Gráfico. Al mismo tiempo, el Módulo de Evaluación define el tipo de colisión cometida y lo almacena en el historial de la sesión. Al final de la aplicación introduce los errores en la base de datos de modo que más tarde puedan ser consultados a través de la aplicación de menús que se describe a continuación.

El simulador estará precedido por una aplicación de menús, en la que habrá diferentes tipos de usuarios. Por un lado estará el usuario alumno, que podrá realizar prácticas accediendo a diversos escenarios de tareas específicas, tales como coger y dejar una carga, circular en zig-zag, etc., o a un escenario general en el que podrá realizar todas estas tareas. Por otro lado estará el usuario profesor, que podrá acceder a las fichas de los alumnos, pudiendo también introducir nuevos, y podrá también examinar a los alumnos que se considere están preparados, tanto mediante un examen teórico como mediante el examen práctico. Por último, existirá también el usuario administrador, que podrá realizar tareas como modificar el test teórico, introducir nuevos usuarios profesor, etc.

MOTOR GRÁFICO

El Motor Gráfico se encarga de recibir los datos de las matrices de transformación correspondientes al estado de la carretilla desde el Motor de Simulación y, con estas matrices, actualiza los gráficos tridimensionales que se envían al Periférico Gráfico de salida. Por tanto, el Motor Gráfico tiene como función básica enviar información visual al usuario de la aplicación del simulador, influyendo de modo decisivo en la respuesta que éste proporcionará a lo largo de la sesión de simulación.

El Motor Gráfico utilizado es OGRE (Object-Oriented Graphics Rendering Engine). Se trata de un Motor Gráfico basado en código libre C++ y utilizado para desarrollar gráficos 3D en Tiempo Real. Los objetos 3D utilizados son creados con la herramienta 3D-Max y posteriormente exportados como archivos del tipo *.mesh y cargados por código C++.

El primer paso a dar es, por tanto, dibujar los objetos necesarios en 3D-Max. Una vez dibujados, para exportarlos hay que dedicar especial atención a los objetos destinados a moverse por el escenario. Por ejemplo, los objetos móviles que vayan a ser solidarios entre sí, como el palet y la carga, se deben exportar en un mismo archivo para mayor simplicidad a la hora de realizar la simulación. De la misma manera, los objetos que, formando parte de un mismo cuerpo, deben tener movimiento relativo entre ellos, como son el mástil y el carro dentro de la carretilla, se deben exportar en distintos archivos. De lo contrario, no sería posible el movimiento relativo entre ellos.

Estructura de los objetos móviles

Una vez exportados los objetos, el siguiente paso es realizar una estructura jerárquica de nodos para los objetos de la simulación, en la que cada objeto debe estar asociado a un nodo, pudiendo cada nodo albergar a más de un objeto. Esta estructura consta de un nodo principal al que se califica como "Nodo Universo". Este Nodo Universo tiene un nodo hijo para cada objeto que tenga un movimiento relativo respecto a él. A su vez, cada nodo hijo del Nodo

Universo, podrá tener uno o más nodos hijos, para objetos que se muevan respecto a él. Por ejemplo, la carretilla está asociada a un nodo hijo del escenario general, y el mástil está asociado a un nodo hijo del nodo de la carretilla.

Siguiendo esta estructura de nodos descrita, se tiene que todos los objetos fijos del escenario están asociados al Nodo Universo. Así, el Nodo Universo tiene asociados el suelo, las paredes, las estanterías, las señales, los palets, etc. Por otra parte, la carretilla debe estar asociada a distintos nodos, ya que tiene partes como el mástil y el carro que tienen movimientos relativos entre sí. Se muestra en Figura 2 el modo en el que la carretilla está asociada a distintos nodos:

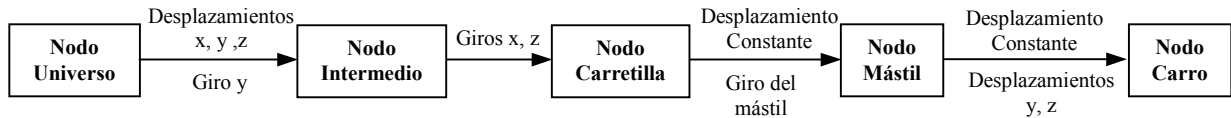


Fig. 2: Esquema de nodos utilizados para la simulación.

Antes de explicar el esquema, conviene aclarar que el sistema de referencia considerado tiene como eje vertical el eje Y, mientras que los ejes X y Z indican el movimiento a través del plano horizontal. El primer nodo hijo del Nodo Universo, es el Nodo Intermedio, que se traslada en los tres ejes respecto del escenario y gira respecto al eje Y. Este giro representa las curvas que la carretilla puede dar en escenario en el plano horizontal. A este Nodo Intermedio se le aplican los giros respecto a los ejes X y Z, para llegar al Nodo Carretilla. Estos dos giros representan los balanceos de la carretilla respecto a los ejes X y Z.

La orientación de la carretilla se define mediante los ángulos de Euler y la orientación final de ésta depende del orden de aplicación de los giros. El primer giro que se realiza es el giro respecto del eje Y y posteriormente se aplican los giros respecto de los otros dos ejes. El orden de aplicación de estos dos últimos giros no es importante ya que son de pequeña magnitud.

El Nodo Carretilla, tiene como hijo al Nodo Mástil, el cual está desplazado respecto al Nodo Carretilla una distancia constante, en concreto la que va desde el centro de gravedad de la carretilla hasta el punto medio del eje de giro del mástil. También está aplicado, en caso de haberlo, el giro del mástil. Por último, el Nodo Carro es hijo del Nodo Mástil, con un desplazamiento constante desde el Nodo Mástil hasta el punto medio de los extremos de la horquilla, además de los desplazamientos que puede hacer el carro respecto del mástil.

Quedando así descrita la carretilla, es menester explicar el procedimiento utilizado para describir los nodos de las cargas, que pueden pasar de ser elementos fijos en el escenario a elementos solidarios a la carretilla. Para ello, existen dos nodos a los que puede ir asociada la carga: un nodo hijo del Nodo Universo, y otro hijo del Nodo Carro, denominado Nodo Carga. La carga estará asociada al primero, en caso de estar quieta en el escenario, y estará asociada al segundo en caso de estar siendo transportada. Considérese la situación de cambio de nodo. Cuando la carga va a ser cogida, está asociada al nodo hijo del Nodo Universo. El programa calcula la distancia que hay desde este nodo hasta el Nodo Carro en el instante inmediatamente anterior, y sitúa el Nodo Carga en esa posición. También calcula el giro relativo al eje vertical que hay entre el Nodo Carro y el nodo hijo del Nodo Universo, para darle al Nodo Carga la orientación adecuada. Una vez situado y orientado el Nodo Carga, se asocia la carga a dicho nodo, y a partir de este instante la carga será solidaria al carro de la carretilla hasta que se vuelva a dejar en el suelo o en una estantería. Para dejar la carga, se sitúa el nodo hijo del Nodo Universo en la posición que ocupa el Nodo Carga un instante antes de ser depositada y con su orientación, y se realiza el cambio de nodo.

Visualización de la aplicación

La aplicación se puede visualizar en un monitor o en una pantalla a través de un proyector, siendo el objetivo final su visualización a través de un casco de realidad virtual. En la visualización mediante monitor, se tienen varias vistas subjetivas para el usuario. Algunos de estos puntos de vista se corresponden con los movimientos que puede hacer el conductor dentro de la cabina de una carretilla real, mientras que otras vistas se han realizado para facilitar el manejo del simulador, dejando de estar disponibles cuando el usuario se haya familiarizado con el simulador.

Se muestran a continuación algunas imágenes del escenario creado, en las que se pueden apreciar los distintos tipos de carga, las estanterías, las indicaciones para el usuario, etc. La Figuras 3 y 5 son vistas del escenario en distintas acciones de la carretilla, mientras que las Figuras 4 y 6 son vistas tomadas desde el punto de vista subjetivo del usuario.

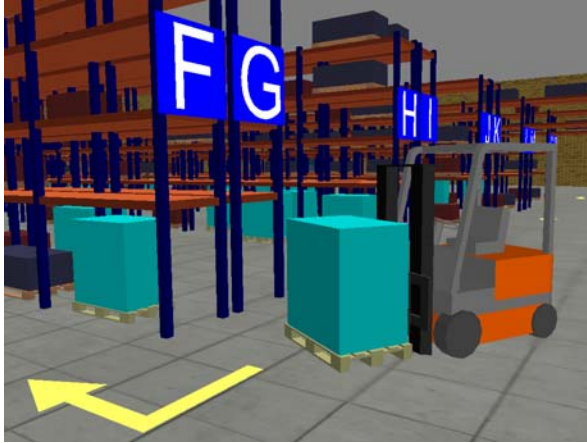


Fig. 3: Vista de la carretilla en el almacén transportando una carga.

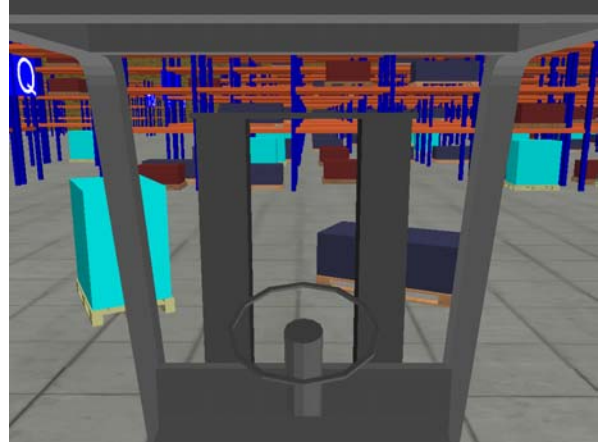


Fig. 4: Vista subjetiva del conductor ante dos cargas de distinto tamaño.

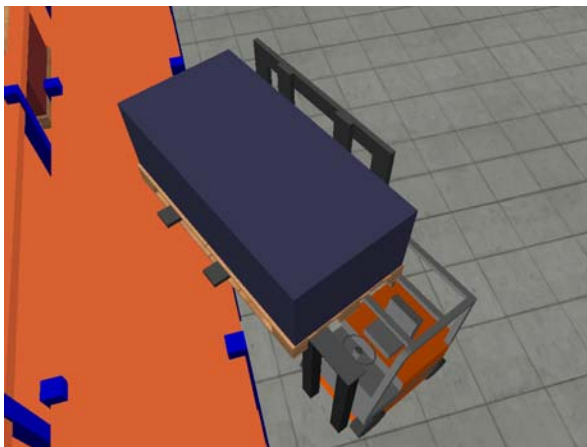


Fig. 5: Vista superior de la carretilla depositando una carga en una estantería.

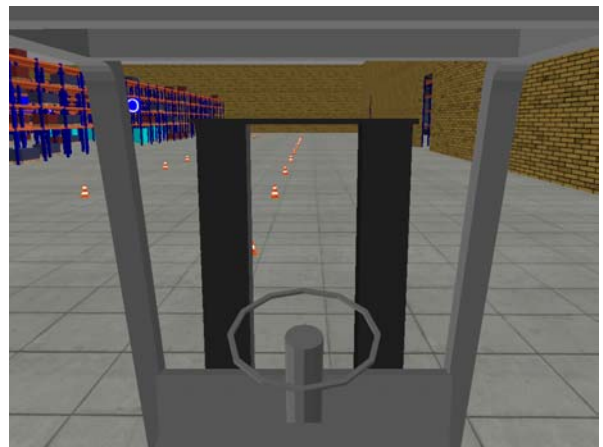


Fig. 6: Vista subjetiva del conductor en el ejercicio de Zig-Zag.

SIMULACIÓN DINÁMICA

Se ha realizado un modelo dinámico de la carretilla con el que se pretende simular de una manera realista su comportamiento [2]. El modelo de carretilla utilizado es el Linde E16c. Se trata de una carretilla de 3200 kg con tres ruedas, capaz de alzar cargas de hasta 1600 kg. La rueda trasera ejerce de directriz mientras las dos delanteras son las motrices.

Modelo dinámico

El modelo dinámico de la carretilla ha sido desarrollado teniendo en cuenta los 6 sólidos de que consiste: el chasis, las tres ruedas, el mástil y el carro. Puesto que la carretilla es un mecanismo de cadena abierta en el que cada eslabón tiene un movimiento relativo al eslabón inmediatamente anterior, se consideran las coordenadas relativas independientes como mejor opción para integrar el modelo en tiempo real.

Además de las coordenadas que define el mecanismo, existen algunos parámetros que se cambiarán en tiempo de simulación. Como el simulador dinámico contempla la capacidad para coger y dejar cargas, la masa de la horquilla va a variar en tiempo de simulación. No obstante, este cambio de valor en los parámetros de masa sólo se podrá hacer en instantes en los que la carretilla esté completamente parada.

Las coordenadas elegidas para definir la acotación del modelo son las que se describen en la siguiente figura:

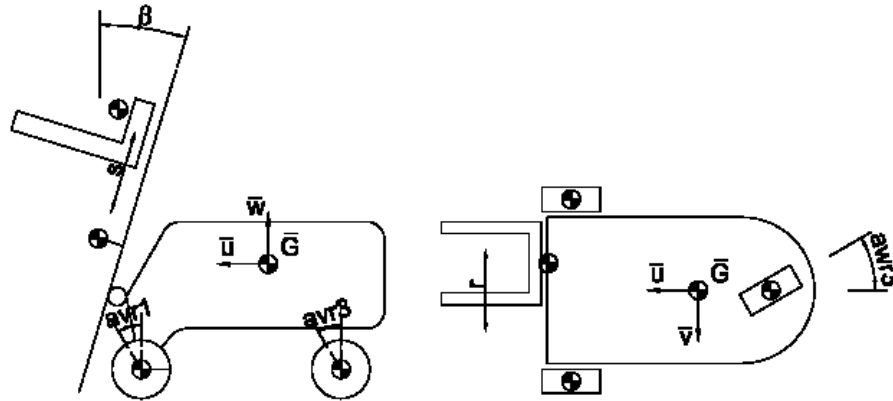


Fig. 7: Esquema de la carretilla con las coordenadas elegidas.

Tres ángulos para la orientación del chasis:

- awc : Ángulo de Euler en la dirección W.
- auc y avc : Ángulos de Euler en las direcciones U y V respectivamente. Se asumen pequeñas rotaciones en estas coordenadas de manera que se linealizan para hacer más sencilla la integración numérica.

Tres coordenadas para la posición del chasis:

- Coordenadas x , y y z para la posición del centro de gravedad del chasis.

Tres coordenadas para la rotación de las ruedas respecto de sus propios ejes.

- $avr1$, $avr2$ y $avr3$ para las ruedas delantera izquierda, delantera derecha y trasera respectivamente.

Una rotación denominada $avr3$ que representa el giro de la dirección de la rueda trasera.

Y finalmente, tres coordenadas que conducen el mástil y el carro:

- β : Ángulo que representa el giro del mástil respecto del chasis en la dirección V. De la misma manera que se hizo para auc y avc , se asume que el valor de la rotación es pequeño y se linealizan las ecuaciones asociadas a esta coordenada.
- s y r : Representan la traslación del carro respecto al plano del mástil. Estas coordenadas hacen posibles tanto la carga y descarga del palet como el movimiento de éste cuando está sostenido.

Como ya se ha mencionado, todas estas coordenadas son independientes, es decir, no existen ecuaciones algebraicas que relacionen las coordenadas entre sí. Sin embargo, no todas las coordenadas son tratadas como Grados de Libertad Dinámicos (GdLD) y esto lleva a ecuaciones que sin serlo estrictamente, son del tipo de las ecuaciones de restricción. Así, las coordenadas avr , β , s y r serán guiadas cinemáticamente y serán denominadas Coordinadas Guiadas (CG). De este modo, se tiene un modelo de 13 coordenadas generalizadas de las que 4 serán CG y las 9 restantes serán GdLD.

Las coordenadas guiadas (CG)

En el presente modelo, algunos de los grados de libertad serán guiados utilizando ecuaciones de restricción del tipo:

$$q_i - f_i(t) = 0 \quad (1)$$

Con estas ecuaciones, y teniendo en cuenta que no hay ecuaciones de restricciones geométricas, la matriz jacobiana tiene la forma siguiente:

$$J = [0 \ I_4] \quad (2)$$

Cuando se construyen las ecuaciones diferenciales de movimiento, cualquiera que sea la formulación utilizada (Lagrange, Euler, Penalizadores, etc.), es necesario evaluar las funciones de posición, velocidad y aceleración de las CG. Esto no sería un problema si conociéramos estos valores en cada momento, pero no es el caso. En realidad, como este modelo ha sido realizado para un entorno en tiempo-real con man-in-the-loop, ni siquiera las posiciones de las CG son conocidas de antemano. Esta es la razón por la que la información de la posición de las CG tiene que ser evaluada por los periféricos de entrada, y tanto su primera como su segunda derivada tienen que ser calculadas mediante fórmulas de derivación numéricas en cada instante de tiempo.

Distribución del par en las ruedas delanteras

La acción del acelerador no está representada mediante ninguna de las coordenadas. Si así fuera, sería necesario suponer que no hay deslizamiento en las ruedas, así como que se tiene la capacidad de controlar la rotación de las ruedas delanteras. Incluso si esto fuera posible, un modelo construido de esta forma no representaría el comportamiento real de una carretilla. Por esta razón se decide desarrollar un modelo en el que la carretilla se mueve por acción de fuerzas externas.

En este caso, las ruedas motrices sufren la acción de un par externo y el par de reacción ha sido aplicado sobre el chasis. La magnitud del par ejercido sobre las ruedas depende de los valores introducidos por el usuario mediante los Periféricos de Entrada. Además, el par ejercido sobre las ruedas no será siempre la mitad del total para cada rueda.

En las carretillas reales existe un motor para cada rueda motriz, de manera que mediante un sistema de control electrónico que depende del giro de la rueda directriz, aplica a cada rueda un par motor diferente. Teniendo en cuenta este fenómeno pero sin conocer el criterio con el que el sistema de control real aplica diferentes pares en función del ángulo de la rueda directriz, se ha ideado una sencilla ley de reparto de par motor entre las ruedas para simular este controlador. Esta ley permite realizar giros respecto del punto central del eje delantero de la carretilla; lo cual puede suceder realmente en las carretillas convencionales de tres ruedas.

Fuerzas Suelo – Ruedas

Se ha elegido un modelo de fuerzas externas que actúan sobre la carretilla para representar el modo en que la carretilla se desplaza, gira y se tiene en pie. De esta manera, la solución obtenida es más cercana al comportamiento real de la carretilla que una solución obtenida asumiendo la condición de no deslizamiento de las ruedas. El modelo construido para representar las fuerzas que el suelo ejerce sobre las ruedas está basado en la “Fórmula mágica” de Pacejka [3, 4] y otros autores, aunque es más sencilla. Se han realizado algunas simplificaciones para construir un modelo computacionalmente más ligero que represente el comportamiento dinámico de la carretilla.

Planteamiento de las ecuaciones mecánicas de movimiento

Para plantear las ecuaciones mecánicas de movimiento, se ha utilizado el programa 3D_Mec-Matlab [5]. Se trata de un preprocesador basado en la Toolbox Simbólica de Matlab, que permite el desarrollo de las ecuaciones mecánicas de movimiento de forma simbólica.

El problema mecánico se divide conceptualmente en dos secciones:

- Descripción cinemática, que involucra parámetros geométricos y la definición de coordenadas generalizadas. El kernel simbólico de la librería permite al usuario definir cualquier tipo de coordenada. La descripción del modelo puede ser realizada con la ayuda del kernel simbólico que proporciona una sencilla interfaz Cartesiana incluyendo estructuras como Puntos, Bases de Proyección y Referencias. Las cantidades cinemáticas requeridas como las posiciones, velocidades y aceleraciones se calculan automáticamente mediante la librería simbólica del kernel. El último paso en la descripción cinemática es la definición de las restricciones, que se puede hacer tanto de manera matemática como Cartesiana.

- Descripción dinámica, que involucra la definición de cargas inerciales y externas. Las propiedades inerciales del modelo son introducidas con la ayuda de una interfaz dinámica Cartesiana que incluye estructuras como la Posición del Centro de Gravedad, los Tensores de Inercia y Referencias de Cuerpos. Las cargas externas también se introducen de modo Cartesiano, de forma que el usuario puede definir directamente fuerzas y pares. Las cantidades dinámicas referidas como las Matrices de Masas y los Vectores de Cargas son calculados simbólicamente y exportados como funciones de Matlab. La librería del kernel permite al usuario obtener ecuaciones de movimiento tanto mediante los formalismos de Lagrange como mediante los de Newton-Euler.

Puesto que se debe calcular la dinámica en tiempo real, las ecuaciones de Lagrange parecen ser más adecuadas. El modelo se representa mediante 13 coordenadas (relativas) lagrangianas. Para reducir la expresión simbólica de la Matriz de Masas y del Vector de Cargas, se linealizan 3 coordenadas de rotación – α , β y γ – desde su definición cinemática. Como ya se ha explicado anteriormente, los 4 grados de libertad guiados – α , β , γ y δ – se definen de la forma:

$$q_g = z \quad (3)$$

Según el formalismo de Lagrange, las ecuaciones de movimiento toman la forma:

$$\begin{bmatrix} M_{dd} & M_{dg} & 0 \\ M_{gd} & M_{gg} & I_4 \\ 0 & I_4 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_d \\ \ddot{q}_g \\ \lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_d \\ Q_g \\ \dot{z} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

donde \ddot{q}_i denota el vector de aceleraciones dinámicas (GdLD), mientras que \ddot{q}_d es el vector de aceleraciones guiadas (CG) y $Q_d = 0$ porque en las coordenadas guiadas no se aplican cargas externas.

CONCLUSIONES

Se ha conseguido desarrollar un simulador de carretillas elevadoras para la formación de conductores de este tipo de carretillas en el que, además de realizar una correcta modelización del comportamiento dinámico de la carretilla, se ha prestado mucha atención a la inclusión del mayor número posible de los riesgos que la conducción de carretillas elevadoras acarrea. Asimismo, se ha estructurado el simulador de una forma modular para que sea un simulador escalable y pueda utilizarse a distintos niveles de hardware y de software.

El simulador es capaz de resolver la dinámica de la carretilla para su utilización en un entorno de simulación virtual. El número de coordenadas generalizadas ha sido optimizado utilizando coordenadas relativas, para poder alcanzar los requerimientos de la simulación en tiempo real.

REFERENCIAS

- [1] J. San Miguel, J. Ojer, J.M. Pintor y J. Vitrián, *Guía para la adecuación y evaluación de riesgos en carretillas elevadoras*, Instituto Navarro de Salud Laboral, Pamplona, 2003.
- [2] J. García de Jalón y E. Bayo, *Kinematic and Dynamic simulation of Multibody Systems. The real-time challenge*, Springer-Verlag, San Sebastián, 1993.
- [3] Hans B. Pacejka, *Tyre and vehicle dynamics*, Elsevier, Bodmin, Cornwall, 2002.
- [4] M. Blundell y D. Harty, *The Multibody System Approach to Vehicle Dynamics*, Elsevier, King's Lynn, Norfolk, 2004.
- [5] J. Gil Soto, *Preprocesador para la Simulación Dinámica de Sistemas Multi-Cuerpo Basado en Álgebra Simbólica*, Tesis Doctoral, Universidad Pública de Navarra, Pamplona, 2005.