

## Desarrollo de un Banco de Pruebas Experimental mediante Control de Fuerza con Robot Industrial para el Análisis de la Respuesta Mecánica de Asientos de Coche

A. Valera\*, F. Benimeli\*, J. Solaz\*\*, H. De Rosario\*\*, A. Robertsson\*\*\*, K. Nilsson\*\*\*\*, R. Zotovic\*, M. Mellado\*

\* *Instituto de Automática e Informática Industrial, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera, nº14, 46022, Valencia, España, (e-mail: giuprog@isa.upv.es, frabean@ai2.upv.es, rzotovic@isa.upv.es, martin@isa.upv.es)*

\*\* *Instituto de Biomecánica de Valencia, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera, nº14, 46022, Valencia, España, (e-mail: jose.solaz@ibv.upv.es, helios.derosario@ibv.upv.es)*

\*\*\* *Department of Automatic Control, LTH, Faculty of Engineering, Lund University, Box 118, SE-221 00 Lund, Suecia, (e-mail: andersro@control.lth.se)*

\*\*\*\* *Department of Computer Science, LTH, Faculty of Engineering, Lund University, Box 118, SE-221 00 Lund, Suecia (e-mail: klas@cs.lth.se)*

**Resumen:** Este trabajo presenta el desarrollo de un banco de pruebas experimental para el análisis de la respuesta mecánica de los asientos de vehículos durante la entrada y salida de pasajeros. Para realizar este desarrollo, se consideran dos fases: la primera fase es la captura de datos, realizada mediante una manta sensorizada con una red de galgas de presión y un sistema de fotogrametría a fin de capturar el movimiento realizado por una persona al sentarse en el asiento de un automóvil. La segunda fase consiste en reproducir dicho movimiento de forma automática mediante un maniquí acoplado a un robot, controlando la fuerza que ejerce el maniquí sobre el asiento.

El desarrollo debe permitir aplicar diferentes estrategias de control de fuerza con robots industriales, utilizando para ello una plataforma de prueba consistente en el robot IRB140 de ABB y un sensor de fuerza industrial JR3 de 6 grados de libertad. Como arquitectura de control, se presentan dos alternativas. La primera utiliza la aplicación software WebWare SDK de ABB. En la segunda solución, se ha modificado el controlador original S4CPlus del robot, proporcionando una arquitectura abierta de control que permite la implementación de nuevos algoritmos de control de movimiento y fuerza en el robot industrial.

Con esta aplicación, se simula el proceso realizado por una persona al sentarse y levantarse del asiento de un automóvil, monitorizándose y controlándose la fuerza que ejerce un maniquí sobre un asiento para garantizar igualdad de condiciones con el caso real. El sistema desarrollado tiene numerosas aplicaciones prácticas, como por ejemplo la de poder analizar el desgaste que estos movimientos ocasionan en la tapicería de los asientos. Copyright © 2009 CEA.

**Palabras Clave:** control de fuerza, control de robots, simulación de movimientos humanos, control por computador, aplicaciones digitales de computación, robots manipuladores.

### 1. INTRODUCCIÓN

Como es bien sabido, los controladores de los robots industriales permiten desarrollar programas para que el robot realice de forma repetitiva una secuencia de movimientos prefijados. Para estas operaciones, sólo es necesario disponer de una serie de sensores que permitan conocer la posición de cada uno de los ejes del robot. Sin embargo, en la actualidad existe un amplio rango de tareas y procesos, tales como por ejemplo los procesos de fabricación flexible, donde se necesita una precisión muy alta en los movimientos o donde se pueden encontrar piezas de tamaño, peso y posición muy variable. En estos casos, además de los habituales sensores de posición, se suele necesitar un conjunto de sensores externos para poder ajustar los movimientos de los robots.

Los sensores externos más comunes utilizados en robótica se pueden dividir en dos grandes grupos: los de contacto (p. ej. sensores de fuerza) y los de no contacto (p. ej. sistemas de visión).

Los sensores de fuerza proporcionan información sobre las fuerzas y los pares aplicados en el extremo del manipulador, permitiendo obtener mejoras en las soluciones para una gran variedad de problemas. Así, podemos encontrar desde aplicaciones muy simples en las que los sensores de fuerza garantizan una operación segura del robot, detectando que no hay colisión entre el robot y el entorno, hasta aplicaciones más complejas que pueden incluir la detección de diferentes tipos de piezas, el manejo de piezas orientadas de forma aleatoria, el seguimiento del contorno de objetos desconocidos o no especificados y otras tareas de fabricación en las que se requiere un movimiento a lo largo de una superficie de una pieza.

La realimentación de la fuerza se puede determinar para muchas aplicaciones que impliquen manipulación restringida de objetos (llamadas tareas mating y ensamblado) donde dos ó más partes deben manipularse asegurando un contacto adecuado entre ellas (Afonso, et al., 2007).

En este artículo, se presenta un banco de pruebas experimental para el análisis de la respuesta mecánica de los asientos de los vehículos. Se trata de una aplicación de control de fuerza en la que el robot, mediante un maniquí, debe aplicar una fuerza controlada sobre un asiento de coche, simulando los movimientos de una persona sentándose y levantándose del asiento. Esta simulación se encuentra limitada por el hecho de que los maniquís normalizados que se usan en ensayos dimensionales, pruebas de resistencia, etc. están normalmente pensados para reproducir una postura sentada y no tienen la movilidad que presenta el cuerpo en un gesto complejo como la entrada y salida del vehículo. Además, la simulación con un robot de 6 ejes limita a 6 grados de libertad los movimientos que pueden realizarse con el maniquí. Por lo tanto, una parte importante del estudio consiste en simplificar el movimiento humano para que pueda ser realizado con estos materiales y, aun así, reproduzca adecuadamente la interacción entre el cuerpo y el asiento. Un aspecto importante de esta interacción, en el caso de la simulación de entrada/salida, es la fuerza ejercida sobre el asiento: la distribución de presiones y su variación durante el gesto genera una fricción entre las piernas del usuario y el asiento que puede afectar tanto al confort del primero como al deterioro del segundo.

El control de fuerza realizado solventa las limitaciones de otros sistemas robóticos para la simulación de entrada/salida, en los que las presiones resultantes sólo se comparan de forma cualitativa con las del caso real, sin procedimientos matemáticos (Stewart, et al., 1999).

En este trabajo, se ha utilizado un robot industrial IRB140 de ABB, el cual está equipado con una unidad de control S4CPlus, así como con un sensor de fuerza industrial JR3 de 6 grados de libertad.

El artículo se organiza de la forma siguiente: en la sección 2, se presentan las arquitecturas de control de fuerza con robots utilizadas. A continuación, en la sección 3 se muestra el proceso para obtener los movimientos que realiza una persona al sentarse y levantarse del asiento del coche. La sección 4 presenta el banco de pruebas experimental realizado y algunos resultados de esta aplicación. Finalmente, en la sección 5 se comentan las conclusiones más importantes que se han obtenido con el presente trabajo.

## 2. ARQUITECTURA DE CONTROL DE FUERZA CON ROBOTS INDUSTRIALES

Considerando la investigación en robótica desde la perspectiva del control, es muy interesante, cuando no crucial, un acceso directo tanto a los actuadores como a las variables de estado del robot manipulador. Gracias a esto, se pueden evaluar e implementar algoritmos avanzados de control. Existen robots que permiten la modificación del hardware del sistema de control original de una forma más o menos simple, como por ejemplo el popular robot PUMA 560 (Valera, et al., 2003). Sin embargo, esto no es la tónica general, no siendo posible este

acceso a bajo nivel en los sistemas de control de robots comerciales actuales.

A pesar de que es posible encontrar desarrollos muy interesantes relacionados con el diseño y la implementación de plataformas para la integración de sensores externos rápidos en los sistemas de control de robots industriales (Blomdell, et al., 2005), (Pholsiri, et al., 2003), (Whitney, 1987), ello constituye un trabajo muy complejo, ya que se necesitan muchos conocimientos acerca del diseño interno y de la arquitectura de las unidades de control y esta información suele ser reservada y/o sensible.

El robot industrial IRB 140 utilizado en la aplicación es una máquina de 6 ejes, potente y compacta, que proporciona una aceleración rápida, configuración flexible de montaje, amplia zona de trabajo con un radio de acción de 810mm y una repetibilidad de  $\pm 0.03\text{mm}$ . El sensor de fuerza JR3 amplifica y convierte a representación digital las señales de fuerza y los pares de carga. Estos datos se transmiten a una tarjeta PCI receptora mediante comunicación serie síncrona, con una frecuencia de 8 kHz por canal.

Para realizar la programación y el desarrollo de la aplicación, se han utilizado dos arquitecturas de control: la primera está basada en el controlador original S4CPlus del robot. En la segunda, se ha modificado este controlador añadiendo diversos componentes hardware y software.

La ventaja de la primera opción reside en que, para el desarrollo de aplicaciones de control de fuerza, no se requiere ningún conocimiento de bajo nivel de la arquitectura del controlador del robot, ya que basta con la utilización de un software comercial de ABB que permite el acceso a las señales y variables del robot.

La segunda opción es un tanto más compleja, puesto que, tal y como se describe a continuación, requiere modificar el hardware del controlador del robot. Sin embargo, aporta la ventaja de permitir el acceso a las señales a una frecuencia mucho mayor (4ms), lo cual es muy conveniente para el desarrollo de aplicaciones que requieren periodos de muestreo muy pequeños para poder establecer el control.

### 2.1 Arquitectura Basada en el Controlador Original

El primer desarrollo de la aplicación de control de fuerza realizado en este trabajo está basado en el software WebWare SDK. Este software es un potente conjunto de herramientas que simplifica las comunicaciones entre aplicaciones PC y los controladores de robots de ABB. El WebWare SDK permite aplicaciones Windows de 32 bits creadas con Visual C++, Visual Basic o Visual Studio 2005, utilizando para ello los controles de usuario OLE conocidos como controles ActiveX, que constituyen un estándar de Microsoft utilizado en entornos de programación visual. Gracias a este software, se pueden realizar una gran gama de aplicaciones basadas en robots, como por ejemplo la monitorización del estado de todos los robots de la planta de trabajo, detección de objetos por visión artificial y manipulación automática mediante robots, etc. La única restricción significativa que se puede encontrar en este entorno reside en la frecuencia de comunicación entre el PC y el controlador, la cual está limitada a 200ms.

El WebWare SDK está basado en el módulo de comunicaciones InterLink de ABB. Este módulo crea, mantiene y controla el estado de las comunicaciones de los robots, notificando mediante eventos y propiedades cualquier cambio que se produzca a la aplicación. Para ello, InterLink incorpora un motor de muestreo que permite aplicaciones de usuario basadas en eventos.

Interlink está compuesto por una serie de módulos de los que podemos destacar InterLink Module Configuration Utility, que permite la configuración del modo de trabajo habilitando las comunicaciones entre el PC y el controlador y los servidores de ficheros FTP, la aplicación InterLink Connection Manager, que permite y supervisa las conexiones de las aplicaciones cliente, y el módulo S4 RAP Interface, que implementa la interfaz de comunicaciones al controlador ABB S4 utilizando el protocolo RAP S4.

Una vez realizada su instalación y configuración, pueden desarrollarse aplicaciones de control del robot, para lo cual sólo se necesita un proyecto de programación Visual C++, Visual Basic o Visual Studio y, normalmente, un programa RAPID, el lenguaje de programación de los robots ABB, que se ejecuta en el controlador del robot.

El proyecto de programación es una aplicación ordinaria de Windows que ejecuta los controles ActiveX del WebWare SDK incluidos en los formularios de la misma. Gracias a dichos controles, se pueden implementar una gran variedad de aplicaciones que permiten, por ejemplo, obtener, detectar y cambiar el estado de las señales analógicas y/o digitales de entrada/salida del robot de forma automática, obtener la posición actual del robot, del objeto de trabajo y de la herramienta, realizar la lectura o escritura de las señales (analógicas y digitales), variables (booleanas, numéricas o strings) del programa RAPID, lanzar y/o parar la ejecución de los programas del robot, etc.

El lenguaje de programación RAPID está formado por una serie de instrucciones que describen el trabajo del robot, permitiendo programas modulares multitarea a partir de procedimientos, funciones y rutinas de tratamiento de interrupción, expresiones aritméticas y lógicas, gestión automática de errores, etc. (ver "Guía de Referencia RAPID").

A fin de establecer el control de fuerza del robot, se ha desarrollado una aplicación Visual C++, encargada de leer los puntos 3D de la trayectoria del robot, así como la fuerza a aplicar. Para poder acceder al sensor de fuerza, se ha utilizado el control ActiveX Np\_Jr3x. Este control proporciona los métodos necesarios para establecer el control de fuerza, como son la inicialización de la tarjeta PCI receptora (verificando la tarjeta y descargando el código en el DSP), la lectura de los datos de fuerza y pares desde la tarjeta receptora, la definición y selección de matrices de transformación, la selección y lectura de los finales de escala o la lectura de los niveles de saturación, etc. (<http://www.dem.uc.pt/norberto/jr3pci/>).

A partir de la información de la posición y fuerza de referencia y de la fuerza que está aplicando el robot, la aplicación calcula y envía la posición final a la que el robot debe moverse. La figura 1 muestra la arquitectura software propuesta para el control de fuerza en el robot.

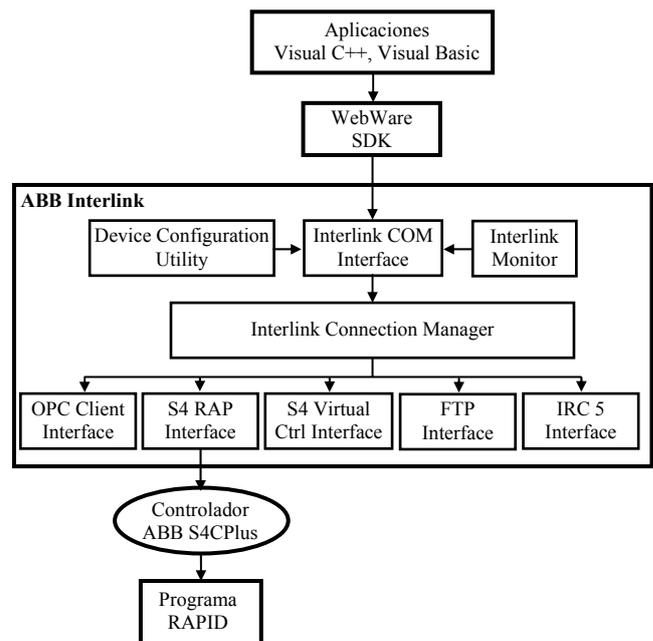


Figura 1. Arquitectura software utilizada.

## 2.2 Arquitectura Basada en la Modificación del Controlador S4CPlus

La segunda arquitectura de control utilizada para el desarrollo de la aplicación de control de fuerza requiere realizar algunos cambios en la arquitectura hardware del controlador original S4CPlus, la cual está basada en un bus PCI pasivo en el que están conectadas las tarjetas del procesador central, el procesador de control de ejes y el procesador de entradas/salidas.

La tarjeta del procesador central (fabricada por Motorola) está basada en un procesador Pentium 200 MHz MMX funcionando con el sistema operativo de tiempo real VxWorks. Además de otras funciones, este procesador implementa un generador de trayectorias y un interpolador dinámico. Con el primero, se generan las trayectorias del robot cada 24ms. Estas trayectorias son enviadas al interpolador dinámico, de forma que éste calcula cada 4 ms las referencias de movimiento de cada uno de los ejes del robot.

El procesador de ejes tiene como principal objetivo establecer el control de posición de las 6 articulaciones del robot. Para ello, toma las referencias del interpolador dinámico del procesador central y establece el bucle cerrado de control a una frecuencia mayor de 1KHz.

La descripción de las distintas tareas que debe realizar el robot se especifica mediante programas RAPID. Estas tareas pasan por el generador de trayectorias y se transforman en referencias de movimiento para los servosistemas de bajo nivel.

Para poder establecer un control de fuerza más rápido y preciso, en este trabajo se ha realizado una ampliación del controlador del robot. En concreto, se han instalado 2 tarjetas en el bus PCI del controlador. La primera es la tarjeta Power-PC G4 PrPMC800 de Motorola, ejecutando el sistema operativo Linux. La segunda es la tarjeta receptora del sensor de fuerza. De esta forma, se puede realimentar la fuerza que está ejerciendo el

extremo del robot sobre el entorno cuando se está realizando el trabajo definido por la tarea. La figura 2 muestra la arquitectura de control utilizada.

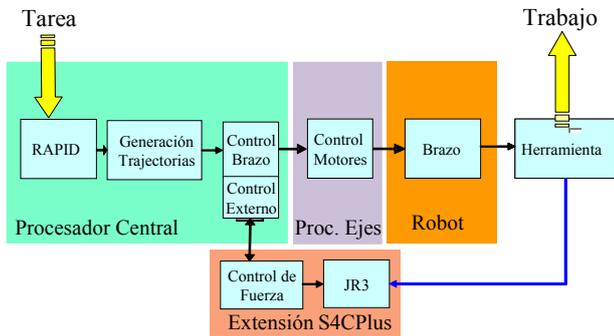


Figura 2. Arquitectura del sistema de control ampliada.

La figura 3 muestra con mayor detalle la implementación de la arquitectura del controlador externo desarrollada en este trabajo. La tarjeta Power-PC recibe del computador principal de la S4CPlus, por memoria compartida, las referencias de posición y velocidad de los 6 ejes del robot, así como la referencia de fuerza que el robot debe ejercer sobre el entorno. La fuerza real en el extremo del robot es suministrada por el sensor JR3. El algoritmo de control de fuerza específico se programa en el bloque "Controlador Fuerza". Por último, se calculan las nuevas referencias de posición y velocidad y se envían mediante memoria compartida al computador de ejes del controlador S4CPlus, utilizando para ello un periodo de muestreo de 4ms.

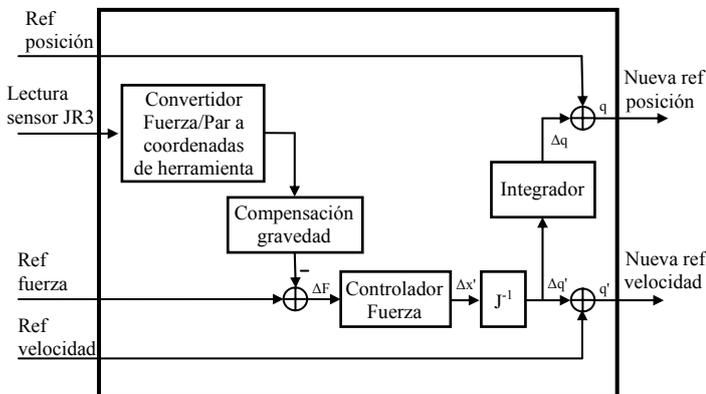


Figura 3. Estructura del controlador externo

Las principales ventajas que aporta esta arquitectura propuesta son varias. Por un lado, se puede establecer un control de fuerza muy preciso, utilizando para ello periodos de muestreo de 4 ms. Por otro, debido a que es una arquitectura abierta y flexible, se puede implementar cualquier algoritmo de control de fuerza. Frente a las aplicaciones comerciales de control de fuerza existentes en el mercado actualmente, el trabajo desarrollado en este artículo proporciona una plataforma industrial muy interesante para la investigación en este campo.

En este trabajo, se han desarrollado y utilizado diferentes tipos de controles de fuerza. Un primer tipo está basado en el control explícito de fuerza. Éste consiste en el seguimiento del valor de referencia de la fuerza utilizando realimentación (y eventualmente prealimentación). Habitualmente, el control explícito se limita al control lineal (Volpe y Khosla, 1993), como

es el caso de los controladores P de la ecuación (1), PI con realimentación de velocidad de la ecuación (2) o el control PD con prealimentación de la fuerza de la ecuación (3).

$$F = F_{ref} + K_p (F_{ref} - f) - K_v \dot{x} \quad (1)$$

$$F = K_p (F_{ref} - f) + K_I \int (F_{ref} - f) dt - K_v \dot{x} \quad (2)$$

$$F = F_{ref} + K_p (F_{ref} - f) + K_d \frac{d}{dt} (F_{ref} - f) \quad (3)$$

donde  $F$  es la acción de control,  $F_{ref}$  la fuerza de referencia,  $f$  la fuerza real de interacción entre el robot y el entorno,  $\dot{x}$  la velocidad, y  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  y  $K_v$ , las constantes proporcional, integral, derivativa y de amortiguamiento, respectivamente.

Un segundo tipo de controladores que se ha implementado en este trabajo corresponde a los basados en el control de impedancia propuesto por (Hogan, 1985). En este caso, el fin no es el seguimiento de un valor de referencia, sino la imposición al sistema de un comportamiento dinámico deseado (lo que se conoce como impedancia mecánica). La dinámica que se especifica típicamente es la de un sistema de segundo orden de resorte-amortiguador y viene dada por la siguiente expresión:

$$Z(s) = \frac{F(s)}{v(s)} = \frac{Ms^2X + BsX + KX}{sX} = Ms^2 + B + \frac{K}{s} \quad (4)$$

siendo  $M$ ,  $B$  y  $K$  los parámetros de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema, y  $s$  el operador de la transformada de Laplace. Estos parámetros fijarán el comportamiento del sistema en bucle cerrado con respecto a las fuerzas de contacto  $F$ .

La descripción de los métodos para la implementación del control de impedancia está fuera del alcance de este artículo. Sin embargo, cabe mencionar que aunque existen diferentes técnicas, las más comunes están basadas en realimentación lineal y dinámica inversa, ambas descritas por ejemplo en (Sciavicco y Siciliano, 1996). Otra alternativa interesante es la propuesta por (Lu y Goldenberg, 1995), donde se establece un control en modo deslizante.

Por último, tal y como se explicará de una forma más exhaustiva en la sección 4 del artículo, la generación de código para la implementación de los controladores de fuerza puede realizarse directamente a partir de esquemas Simulink, lo que simplifica mucho el desarrollo de dichos controladores.

### 3. ADQUISICIÓN DE LOS MOVIMIENTOS HUMANOS SOBRE LOS ASIENTOS DE AUTOMÓVILES

Las arquitecturas de control de fuerza presentadas en el apartado anterior han constituido el núcleo de la aplicación desarrollada para analizar la respuesta dinámica de los asientos de automóvil. Para ello, inicialmente se simulan los movimientos que realiza una persona al sentarse y levantarse del asiento. Gracias al control de la fuerza que se establece, no sólo se reproducen los movimientos de los pasajeros, sino que se puede recrear también el efecto que tienen éstos sobre los asientos.

Con el fin de desarrollar este banco de pruebas experimentales, han sido capturados primeramente los movimientos realizados

por los pasajeros al sentarse y levantarse de un asiento. Para ello, se ha utilizado un sistema de fotogrametría de 4 cámaras, calibrándose el interior del coche con una estructura rígida de 18 marcadores con posiciones relativas conocidas. Además, también se ha medido (a una frecuencia de 20 Hz) la fuerza que ejercen las personas sobre el asiento mediante una manta de presión. La posición de la manta de presión se ha calibrado colocando marcadores en el centro y los lados de la manta antes de las mediciones.

Por otro lado, dado que las cámaras se colocaron fuera del automóvil, para medir el movimiento respecto al asiento hubo que tener en cuenta el movimiento vertical del vehículo debido al sistema de amortiguación durante los movimientos de entrada y salida. Para ello, se restó el movimiento de un marcador externo (calibrado separadamente) fijo en la carrocería del coche.

Los movimientos de cada pierna se obtuvieron simultáneamente mediante 3 marcadores reflectantes. Para la pelvis, se utilizaron 6 marcadores, 2 de ellos ubicados en las crestas ilíacas antero-superiores (ASIS).

Utilizando como posición de referencia aquella en la que el individuo estaba completamente sentado, la posición de cada pierna y la pelvis en los demás instantes se definió como un desplazamiento finito, combinación de rotación y traslación (6 grados de libertad por cuerpo) que, aplicadas a cada conjunto de marcadores, mejor reproducían el cambio de posición experimentado por los mismos. Para ello, se siguió un método de cálculo basado en los principios de desplazamiento espacial de cuerpos sólidos (Beggs, 1983).

Este procedimiento proporciona una descripción del movimiento humano más compleja que la que puede reproducirse con un maniquí estándar como los definidos por SAE (1995) o ISO (1999). En este tipo de maniqués, el conjunto de las dos piernas y la pelvis está formado por un solo bloque rígido, por lo que ha sido necesario definir un movimiento simplificado, con sólo 6 grados de libertad, que reproduzca de la forma más adecuada posible el movimiento humano observado. Este movimiento simplificado se ha determinado calculando una traslación y una rotación, como se describe a continuación y está esquematizado en la figura 5.

El punto de referencia para definir la traslación fue el punto H entre las caderas, usado como una referencia estándar en la industria del automóvil y que está bien determinado en los maniqués normalizados. Este punto H se determinó primero en la postura sentada siguiendo el modelo propuesto por (Brodeur, et al., 1996) mediante las posiciones de las ASIS y las tuberosidades isquiáticas (IT). La posición de las ASIS se obtuvo a partir de los marcadores de la pelvis y la de las IT a partir de las coordenadas espaciales de los máximos relativos en el mapa de presión, obtenido por la manta. La posición del punto H en cualquier otro instante se calculó aplicando los movimientos rígidos 3D medidos para la pelvis.

Conocida la posición del punto H, la rotación del maniquí determina cómo está orientada su superficie de contacto respecto a dicho punto. En el módulo inferior del maniquí, la superficie de contacto representa mayoritariamente el contorno de las piernas, por lo que se consideró adecuado utilizar la orientación de las piernas para definir la rotación del maniquí. El problema principal es que existe un movimiento relativo entre las dos

piernas, que no puede ser efectuado por el maniquí. Se probaron dos soluciones para eliminar este movimiento relativo. Una de ellas (marcada con "(a)" en la figura 5) fue definir una rotación "intermedia" entre la observada para ambas piernas. Esto es equivalente a aplicar el método de cálculo de desplazamiento espacial a los 6 marcadores de las piernas en conjunto, como si formarían parte de un solo cuerpo, y asumiendo que los movimientos relativos entre marcadores se deben a deformaciones simétricas que se obvian en el análisis.

En la aplicación que se hizo con el robot, se observó que esta solución hacía que el maniquí estuviese demasiado inclinado cuando entraba en contacto con el asiento y el movimiento no fuese compatible con la limitación física del asiento.

La segunda solución, que sí resultó compatible, consistió en aplicar al maniquí la rotación medida para la pierna derecha, que es la que está más tiempo en contacto con el asiento, dado que la entrada se realizaba por la puerta izquierda del vehículo.

Finalmente, el actuador mecánico del robot sólo puede aplicar la fuerza en el punto de conexión del maniquí, por lo que también es necesario simplificar la información registrada por la manta de presiones a un vector de fuerzas. Este vector de fuerzas se definió haciendo una integral espacial del mapa de presiones, de lo que resulta una fuerza en la dirección normal al asiento. Según la rotación del maniquí, se determinó la fuerza que habría que aplicar en su eje local para que la componente normal al asiento igualase a la calculada. La distribución de presiones resultante no podría ser igual a la observada, pero la fuerza normal aplicada sí sería la misma y la región en la que se ejercerían las presiones sería similar, debido a que la posición y orientación del maniquí se asemejaría a la posición y orientación de las piernas.

Mediante análisis funcional de datos (Page, et al., 2006), se obtuvo una medida de los movimientos de 3 personas: una mujer de percentil 5 y dos hombres de percentil 50 y 95. La figura 4 muestra un fotograma de los movimientos filmados por la fotogrametría de uno de los colaboradores.



Figura 4. Hombre de percentil 95 filmado por la fotogrametría

Existe variabilidad en las medidas del movimiento correspondiente a los distintos sujetos que participaron en el experimento. Por su parte, el movimiento reproducido por el actuador mecánico, esto es el robot, corresponde a una media funcional de dichas medidas.

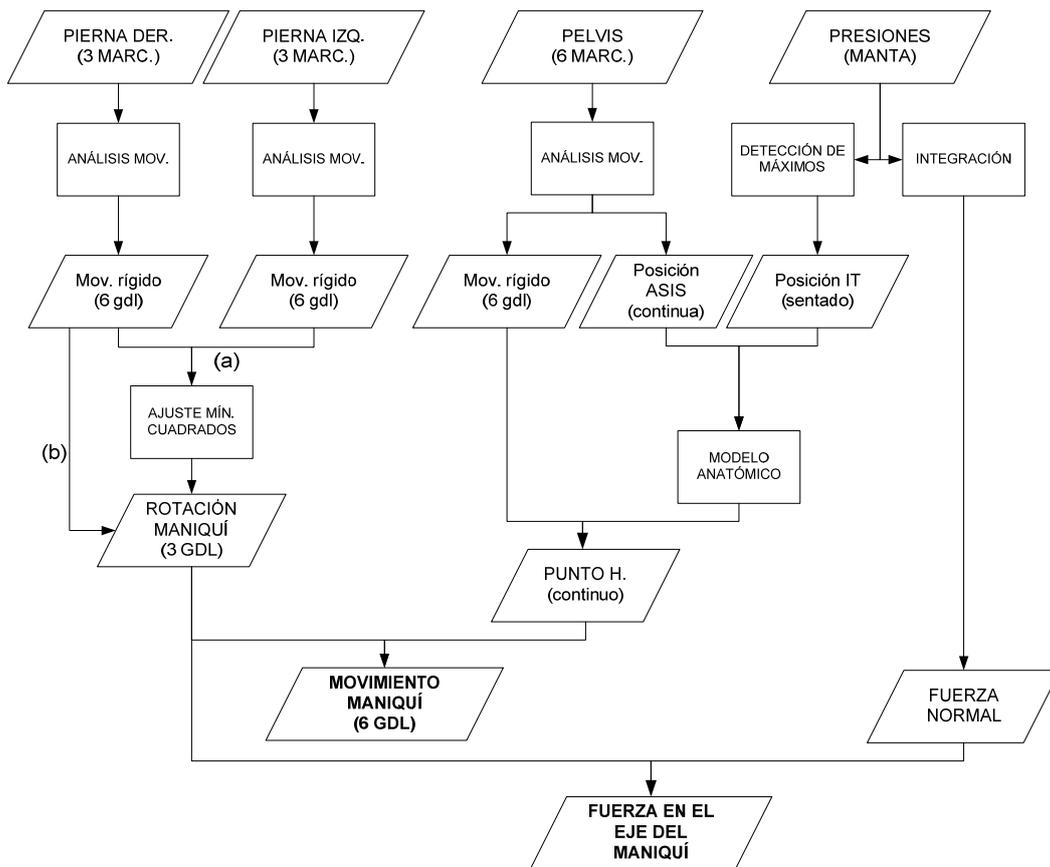


Figura 5. Esquema del proceso de análisis y conversión de los movimientos humanos al movimiento equivalente en un maniquí rígido

Esta variación se ha representado gráficamente en las figuras 6 y 7, donde se muestra en línea continua la media funcional de las medidas (que corresponde a la trayectoria seguida por el robot), y en línea discontinua la envolvente (valores máximos y mínimos) de las medidas tomadas de los sujetos.

En la figura 6, puede verse la evolución de la orientación tanto para el movimiento de entrada (gráficas de la izquierda) como para el de salida (gráficas de la derecha), siendo W, P y R los ángulos de Euler correspondientes a la rotación en el eje X, Y y Z, respectivamente.

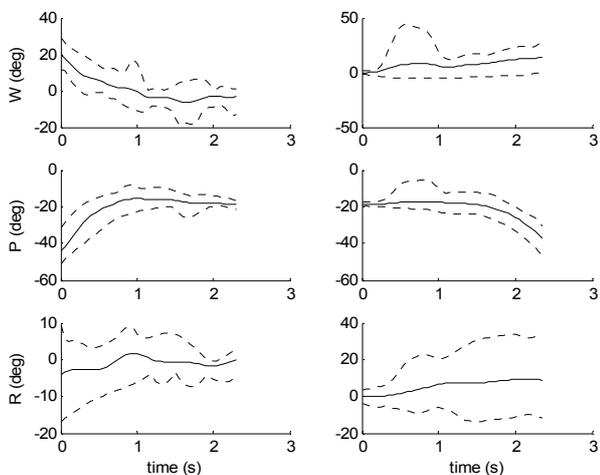


Figura 6. Evolución de la orientación durante los movimientos de entrada (izquierda) y salida (derecha)

Análogamente, la figura 7 muestra la evolución de la posición correspondiente al punto H para los movimientos de entrada y salida en los ejes X, Y y Z.

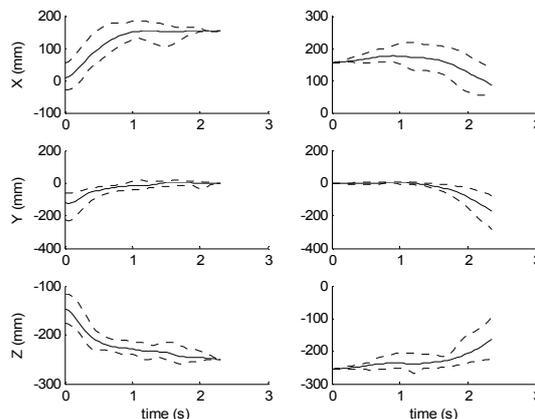


Figura 7. Evolución de la posición del punto H durante los movimientos de entrada (izquierda) y salida (derecha).

Para conseguir fuerzas como las observadas, resultaba necesario corregir las posiciones calculadas. Hay que considerar que, en el contacto con el asiento, los tejidos blandos del cuerpo humano se comprimen al igual que el asiento, por lo que la distancia entre el punto H y la superficie de las piernas varía. Esto no ocurre en un maniquí rígido y, si se intentase colocar su punto H en el mismo punto que el del cuerpo humano, la deformación impuesta al asiento podría ser demasiado elevada, alejándose de la observada en la realidad.

Por último, para poder realizar esta corrección, es necesario obtener la curva de calibración fuerza-desplazamiento del asiento. Esta curva define cuánta fuerza hay que ejercer sobre una masa acolchada (el asiento) para que ésta se comprima una determinada medida y se puede utilizar a la inversa para conocer cuánto ha de “penetrar” el maniquí rígido en la superficie acolchada para aplicar la fuerza deseada. Esta medida se utiliza para corregir la posición del punto H en la dirección perpendicular al asiento. La curva de calibración se puede obtener mediante el procedimiento UNE-EN 1957 (*Camas y colchones. Métodos de ensayo para la determinación de las características funcionales*). En las pruebas, se ha utilizado un indente circular de 355mm. Éste se ubicó en el asiento a analizar mediante un cilindro neumático aplicando cargas desde 5.3kg. hasta 55.3kg. El desplazamiento causado por las cargas se ha medido con un dispositivo láser, proporcionando una precisión de 1mm. La figura 8 muestra las curvas de calibración obtenidas para 3 pruebas repetidas que se realizaron sobre el asiento del automóvil.

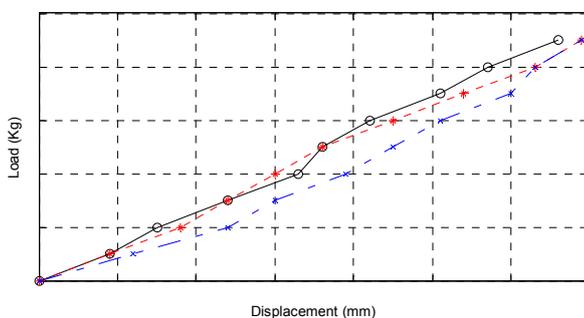


Figura 8. Curvas carga-desplazamiento del asiento obtenidas en las pruebas de calibración

En definitiva, se han definido unas trayectorias en 3D y unas fuerzas a aplicar sobre un maniquí normalizado para simular el movimiento de entrada-salida de los ocupantes de un vehículo. Las fuerzas se han calculado haciendo que la proyección normal al asiento sea igual a la suma de presiones observadas en cada instante. Las trayectorias se basan en la posición del punto H en la persona (reconstruido mediante modelos anatómicos) y en la orientación de las piernas. Sin embargo, la rotación de las dos piernas se ha tenido que simplificar eliminando el movimiento relativo entre ambas y la posición del punto H se ha corregido para que la fuerza obtenida sea equivalente a la observada, en función de la compresibilidad del asiento, que se ha ensayado por separado. Los resultados en las distintas pruebas con sujetos variaban según la antropometría y la forma de moverse de cada uno. Como movimiento y fuerzas representativas se calcularon unas medias funcionales.

#### 4. DESARROLLO DE UN BANCO DE PRUEBAS DE ANÁLISIS DE LA RESPUESTA MECÁNICA DE ASIENTOS DE COCHE

Una vez disponible la arquitectura de control de fuerza y los movimientos de los pasajeros, se puede abordar el desarrollo de la aplicación propuesta en el artículo. De esta forma, la aplicación reproduce el movimiento de entrada y salida de los pasajeros, controlando además la fuerza que se ejerce sobre el asiento.

Para que el robot pueda ejercer la fuerza requerida, se desarrolló un prototipo de maniquí consistente en una pieza que reproduce

las dimensiones del dispositivo de asiento del maniquí SAE J-826 con punto H (SAE, 1995) y que se trata de un maniquí normalizado que se utiliza en múltiples aplicaciones industriales, como modelo para estudiar la ergonomía en el diseño, pruebas de resistencia, deformación y desgaste, etc.

Tal y como se ha descrito en la sección 3, a partir de las filmaciones del sistema de la fotogrametría, se pudieron obtener los movimientos de entrada y salida de los pasajeros y, mediante la manta sensorizada, la fuerza que éstos ejercen sobre el asiento.

A partir de una media funcional de los experimentos previos realizados por los voluntarios humanos, se obtuvo la posición y orientación que debía adoptar el maniquí en cada punto de la trayectoria. Esta información, junto con el tiempo y la fuerza a aplicar, se guarda en un fichero de referencias que es utilizado por la aplicación de control de fuerza desarrollada.

A la hora de abordar el desarrollo de esta aplicación, se han utilizado las dos arquitecturas propuestas en el segundo apartado: la arquitectura basada en el controlador original del robot y la basada en una arquitectura abierta. Esto permite no sólo tener un banco de pruebas de control de fuerza, sino además analizar las propiedades y características más importantes de ambas soluciones.

Para la solución basada en la arquitectura original y el software WebWare SDK, se ha implementado una aplicación Visual C++ y un programa RAPID. La primera se ejecuta en el PC que tiene instalada la tarjeta receptora del sensor de fuerza JR3, mientras que el programa RAPID se ejecuta en el controlador del robot, estableciéndose entre ambos una comunicación TCP-IP.

La aplicación desarrollada en Visual C++ se encarga de establecer el control de la fuerza a ejercer por el maniquí. Para ello, debe leer en primer lugar el fichero de referencias con los puntos 3D de la trayectoria y la correspondiente fuerza a aplicar. La orientación de la trayectoria está expresada en ángulos de Euler mediante rotaciones alrededor de los ejes X-Y-Z. Puesto que el robot utilizado trabaja con cuaterniones, es necesario realizar la conversión correspondiente.

Utilizando la posición y orientación de referencia de la trayectoria, la aplicación calcula un offset de la posición de referencia del robot que asegura que se está ejerciendo la fuerza requerida. El offset de posición se obtiene a partir de la expresión del controlador explícito PD con prealimentación de la fuerza de la ecuación (3) y se envía de forma periódica cada 200ms al programa RAPID.

La implementación del controlador de fuerza requiere programar un control proporcional-derivativo, prealimentando la fuerza de referencia. El ajuste de las constantes  $K_p$  y  $K_d$  del controlador depende, entre otros factores, de la rigidez del sistema. Actualmente, dicho ajuste se realiza mediante un proceso de prueba y error hasta obtener una respuesta del sistema adecuada. Para completar esta primera aplicación, ha sido necesario desarrollar también un programa RAPID. Este programa especifica los movimientos que debe realizar el robot en cada instante, de forma que éstos están en función de las posiciones que recibe desde la aplicación Visual C++. En el programa RAPID, se utiliza un sistema de referencia de herramienta del robot para el maniquí y un sistema de referencia de objeto de trabajo para el asiento.

Durante el movimiento del robot, tanto la posición y orientación real del maniquí como la fuerza real aplicada son periódicamente guardados en un fichero junto con el tiempo correspondiente de la medida. Además, las comunicaciones con el controlador del robot y el sensor de fuerza tienen lugar por medio de controles ActiveX, lo cual simplifica y reduce considerablemente la cantidad de código necesario para llamar a las funciones requeridas.

La segunda aplicación desarrollada está basada en la arquitectura abierta del controlador del robot descrita en el apartado 2.2 del artículo. En este caso, básicamente se desarrolló un programa RAPID donde se especifican los movimientos y las fuerzas a utilizar. Además, se implementó el algoritmo del controlador de fuerza a utilizar. Este algoritmo se ejecuta en Linux en la tarjeta Power-PC conectada al bus PCI del controlador S4CPlus.

Como en la aplicación anterior, el programa RAPID lee las posiciones y fuerzas a partir de un archivo de referencias generado como se ha descrito en la sección 3. Gracias a la arquitectura abierta desarrollada, se ha ampliado el conjunto de comandos RAPID de manera que ahora están disponibles nuevas funciones donde se puede especificar directamente la fuerza que debe ejercer el extremo del robot.

El controlador de fuerza se implementa y ejecuta en la tarjeta Power-PC. Éste recibe mediante memoria compartida la información que le suministra el computador principal del controlador del robot. A partir de la referencia de fuerza especificada en el programa RAPID y la lectura suministrada por el sensor JR3, el controlador de fuerza calcula las posiciones corregidas a las que se debe desplazar el robot. Estas posiciones se calculan cada 4ms y se transfieren, también mediante memoria compartida, al computador de ejes del S4CPlus del robot.

Para el desarrollo de los controladores de fuerza, en esta aplicación se utilizan esquemas de Simulink. Para ello, se ha hecho uso de la librería *Real-Time Workshop (RTW)* de Matlab, librería que produce código directamente desde modelos Simulink y genera programas automáticamente que pueden ser ejecutados en entornos de tiempo real como Linux, VxWorks, DOS, Windows, etc.

La figura 9 muestra uno de los esquemas Simulink que se ha empleado para la generación automática del control de fuerza. En el esquema se pueden observar los puertos de entrada (bloques Simulink de puertos de entrada etiquetados como *irb2ext[i]* o *jr3\_A[i]*) que proporcionan las posiciones, velocidades, aceleraciones y fuerzas de referencia desde el computador principal del controlador del robot. El control de fuerza se establece con el bloque etiquetado como “*controller*” a partir de la fuerza de referencia deseada y de la información proporcionada por el sensor de fuerza (previamente convertida a coordenadas de la herramienta con los bloques etiquetados como “*Force Offset + gravity + gravity compensation*” y “*Force sensor -> TCP*”).

En este trabajo, se ha implementado un controlador por impedancia mecánica basado en la expresión de la ecuación (4). Como se menciona en el segundo apartado del artículo, en este controlador se deben especificar la constantes  $M$ ,  $B$  y  $K$  que definen la impedancia mecánica deseada como respuesta del sistema. El ajuste de dichas constantes dependerá de la rigidez

del sistema y del comportamiento deseado (amortiguación de la respuesta del sistema, tiempo de establecimiento, etc.). Al igual que en el controlador PD con prealimentación de fuerza de la primera implementación, actualmente se realiza un ajuste manual mediante un proceso de prueba y error.

Es necesario tener en cuenta que el control de fuerza se establece en el espacio cartesiano. Por ello, para poder obtener las referencias de velocidades y posiciones modificadas de los elementos del robot que permitan que éste aplique las fuerzas de referencias especificadas, es necesario utilizar el jacobiano inverso, mediante el cual se pueden obtener las velocidades de articulación a partir de las velocidades cartesianas del extremo del robot. Esta transformación se realiza en el bloque etiquetado como “*Velocity Update and Dynamic compensation*”

Por último, las nuevas referencias de posición y velocidad de las articulaciones del robot son enviadas al computador de ejes del controlador S4CPlus mediante los puertos de salida (bloques Simulink de puertos de salida etiquetados como *ext2irb[i]*).

En las figuras 10 y 11, se muestra un ejemplo de los datos medidos durante la ejecución de un fragmento de la trayectoria definida, que se ha repetido “sentando” al maniquí en 4 puntos distintos del asiento. La primera figura muestra la fuerza aplicada por el robot en el eje Z del maniquí cuando éste se sitúa sobre el asiento del automóvil, que se corresponde con la línea del torso según se define en la norma correspondiente (SAE, 1995). Como se puede apreciar, tras un breve lapso de tiempo, la fuerza alcanza la referencia (-15 N) que se le había especificado. La segunda muestra la coordenada Z de la posición del robot. En cada posición, la coordenada Z es distinta debido a que en el asiento se tienen zonas con diferente firmeza, lo que provoca que, para ejercer la misma fuerza, la altura deba cambiar ligeramente de un punto a otro.

Las figuras 12 y 13 muestran parte de la plataforma experimental compuesta de un brazo robot industrial con un sensor de fuerza y el maniquí completo utilizado para aplicar la fuerza sobre el asiento.

## 5. CONCLUSIÓN

En este trabajo, se ha presentado una aplicación de control de fuerza en la que se ha utilizado un robot industrial de ABB equipado con un sensor de fuerza de 6 grados de libertad. Con esta aplicación, se ha podido desarrollar una plataforma de ensayos que permite determinar la respuesta mecánica de asientos de automóvil en la entrada y salida de pasajeros. Gracias al banco de pruebas desarrollado, se puede analizar la firmeza de los asientos de los coches o el desgaste que sufre la tapicería de los asientos.

Se han mostrado las dos arquitecturas de control utilizadas en este trabajo. La basada en el software WebWare SDK tiene como principal ventaja el hecho de tratarse de un software comercial y, por lo tanto, poder utilizarse para el desarrollo de aplicaciones con cualquier robot industrial ABB. Con la segunda arquitectura de control mostrada, debido a que es una arquitectura abierta que permite acceder a las variables de estado del robot (posición, velocidad, aceleración, fuerzas y pares, etc.), es posible implementar controladores de movimiento y/o fuerza mucho más complejos, permitiendo periodos de muestreo de 4ms (periodos mucho más pequeños que con la primera

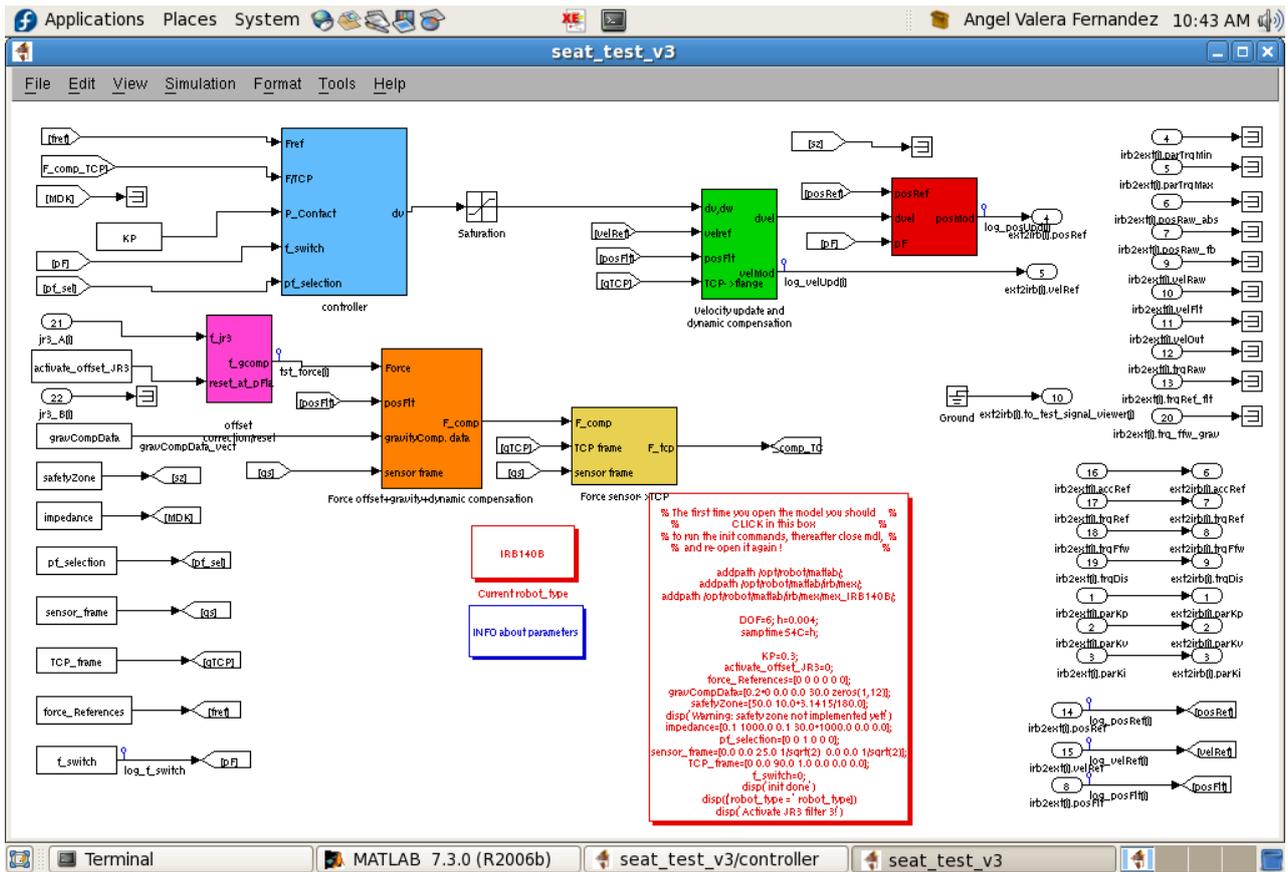


Figura 9. Esquema Simulink utilizado para la generación automática del controlador de fuerza del robot

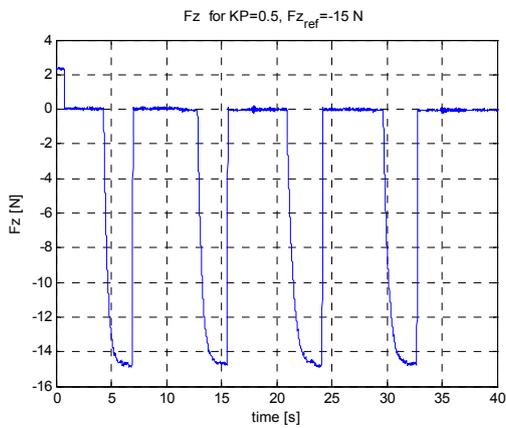


Figura 10. Fuerza aplicada al asiento del automóvil

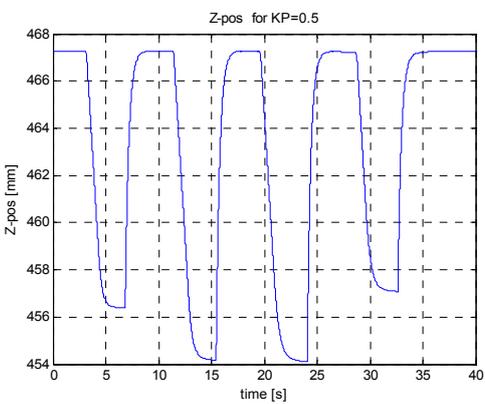


Figura 11. Posición Z del robot industrial

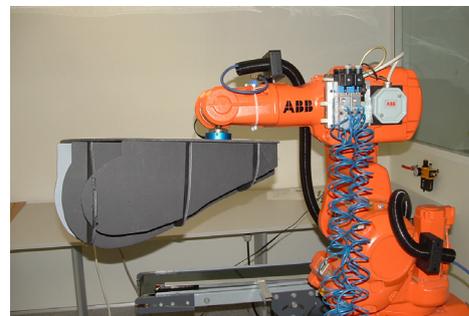


Figura 12. Robot del banco de pruebas experimental



Figura 13. Maniquí utilizado en la aplicación de control de fuerza.

arquitectura). La principal desventaja radica en que no es trivial hacer todos los cambios necesarios en el controlador S4CPlus del robot, puesto que se requieren unos conocimientos de este sistema de muy bajo nivel.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Plan Nacional de I+D, Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) y a la Conselleria de Educació de la Generalitat Valenciana por la financiación parcial de este trabajo bajo los proyectos DPI2005-08732-C02-02, DPI2005-09327-C02-01 y GVPRE/2008/375. Así mismo, los autores agradecen la ayuda prestada por Anders Blomdell por su trabajo en el desarrollo de la arquitectura abierta de control de los controladores industriales de ABB.

#### REFERENCIAS

- Afonso G., Pires, J.N., Estrela, N. (2007). Force control experiments for industrial applications: a test case using an industrial deburring example, *Assembly Automation Journal*, **26** (2), pp. 148-156.
- Beggs, J.S. (1983). *Advanced Mechanism*, Macmillan, New York.
- Blomdell A., G. Bolmsjö, T. Brogårdh, P. Cederberg, M. Isaksson, R. Johansson, M. Haage, K. Nilsson, M. Olsson, T. Olsson, A. Robertsson, J. Wang (2005). Implementation and Applications of a Fast Open Sensor Interface, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, **12** (3), pp. 85-94.
- Brodeur R.R., Y. Cui, H.M. Reynolds (1996). *Locating the pelvis in the seated automobile driver*, SAE Technical Paper 960481.
- Guía de Referencia RAPID, nº 3HAB 7541-1, ABB Robotics Products AB  
<http://www.dem.uc.pt/norberto/jr3pci/>.
- Hogan N. (1985). Impedance Control. An approach to manipulation. *ASME Journal of Dynamics, Systems, Measurements and Control*, **107**, pp. 1 -24.
- ISO 6549 (1999). Road vehicles - Procedure for H- and R-point determination. International Organization for Standardization.
- Lu Z., A. Goldenberg (1995). Robust Impedance Control and Force Regulation: Theory and Experiments. *The International Journal of Robotics Research*, **14** (3), pp. 225 - 254.
- Page A., P. Candelas, F. Belmar (2006). On the use of local fitting techniques for the analysis of physical dynamic systems, *European Journal of Physics*, **27** (2), pp. 273 - 279.
- Pholsiri. C, Rabindran. D, Pryor. M, C. Kapoor (2003). Extended Generalized Impedance Control for Redundant Manipulators, *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, **4**, pp. 3331-3336.
- SAE J826. (1995). Devices for use in defining and measuring vehicle seating accommodation. SAE International.
- Sciavicco L., B. Siciliano (1996). *Modeling and Control of Robot Manipulators*. McGraw-Hill Company Inc. New York, ISBN 0-07-057217-8.
- Stewart R., T. O'Bannon, M. Müller, F. Beeh, B. Schnoor, J. Lentz (1999). *Creating the next generation ingress/egress robot*, SAE Technical paper 1999-01-0628.
- Valera A., V. Mata, M. Vallés, F. Valero, N. Rosillo, F. Benimeli (2003). Solving the Inverse Dynamics Control for Low Cost Real-Time Industrial Robot Control Applications, *Robotica*, **21** (3), pp. 261-269.
- Volpe R., P. Khosla (1993). A Theoretical and Experimental Investigation of Explicit Force Control Strategies for Robot Manipulators. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **38** (11), pp. 1634-1650.
- Whitney, D. (1987). Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control. *The International Journal of Robotics Research*, **6**, pp. 3-14