



# VNiVERSiDAD D SALAMANCA

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial**

**Memoria de resultados del proyecto de  
innovación ID10/122**

**“Diseño de nuevas actividades docentes en  
Mecánica de Robots aplicadas sobre un  
robot ABB IRB140”**

**Participantes:**

Carmen Blanco Herrera

José Antonio Cabezas Flores

Juan Carlos Pérez Cerdán

Leticia Aguado Ferreira

Miguel Ángel Lorenzo Fernández

VNiVERSiTAS  
STVDII  
SALAMANTIINI

Béjar, 30 de junio de 2011



# Índice

<b>1. Objeto del proyecto.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Introducción.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Objetivos del proyecto.....</b>	<b>5</b>
<b>2. Desarrollo del proyecto.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1. Descripción de las actividades realizadas.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2. Proceso de evaluación.....</b>	<b>20</b>
<b>3. Resultados.....</b>	<b>21</b>
<b>4. Conclusiones.....</b>	<b>23</b>
<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>23</b>

## 1. Objeto del proyecto

### 1.1. Introducción

La adaptación de los nuevos títulos al Espacio Europeo de Educación Superior (EEES) exige actuar en una serie de ámbitos que en pocos años modificarán de manera notable la interacción profesor/estudiante y el sistema de aprendizaje en el campo universitario. El objetivo de estas actividades es facilitar el proceso de cambio al nuevo rol tanto para los estudiantes como para los profesores universitarios. Los primeros deben asumir una actitud más activa, más allá de ser meros receptores de conocimientos, y los segundos deben cambiar de transmisores de conocimiento en clases magistrales a impulsor (incluyendo diseño, planificación y coordinación) de diversas actividades docentes que aseguren la adquisición de competencias por los estudiantes [1]. Estos cambios son particularmente útiles en las enseñanzas técnicas donde los estudiantes se enfrentan a los múltiples y variados problemas que engloba la ingeniería. Por tanto, conviene establecer de antemano cuáles son las metodologías didácticas y sistemas de evaluación más apropiados, o las actividades de nuevo diseño más eficaces. En particular, de la implantación de los nuevos títulos de Grado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial (ETSII) de Béjar, surge la necesidad de idear una serie de nuevas actividades que complementen la formación teórico-práctica del estudiante en diferentes disciplinas de la Ingeniería Mecánica. Dentro de este marco, en el presente proyecto se han desarrollado una serie de actividades docentes encaminadas a mejorar el aprendizaje de las diversas técnicas utilizadas en el análisis mecánico de robots industriales y así incrementar el interés de los estudiantes por los contenidos incluidos en la asignatura "Mecánica de Robots".

Las actividades docentes se han planificado a partir del equipamiento disponible en la "Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial" (ETSII) de la Universidad de Salamanca: un robot industrial ABB IRB140, Fig. 1a, que puede ser controlado, bien, *on-line* con la unidad remota flexpendent, o bien, *off-line* mediante un ordenador, y una pinza de sujeción de accionamiento eléctrico SCHUNK EZ64, Fig. 1b. El diseño de tales actividades persigue como objetivo vencer las dificultades que los estudiantes encuentran en el aprendizaje de los contenidos de la asignatura "Mecánica de Robots". En esencia, dichas dificultades [2] se pueden resumir en dos: (i) la correcta interpretación y comprensión de los resultados del análisis mecánico de un manipulador (mecanismo 3D) y (ii) los laboriosos y repetitivos procedimientos matemáticos utilizados en dicho análisis mecánico.

Las actividades docentes propuestas se han diseñado para aplicar en un robot industrial real las soluciones obtenidas del análisis mecánico (incluyendo tanto el análisis de posición directo e inverso como el análisis cinemático), y para simular diversos procesos industriales donde es necesario realizar un análisis mecánico, tales como la manipulación de objetos y procesos de soldadura y corte entre otros. El objetivo es superar las dificultades que tradicionalmente los estudiantes encuentran en el proceso de aprendizaje, mejorando la comprensión de los conceptos y métodos de cálculo estudiados en el análisis de posición, cinemático y dinámico de manipuladores mediante la combinación de los equipamientos técnicos disponibles con las ventajas que aportan en la actualidad los programas informáticos de diseño y simulación dinámica como, *i.e.*, Autodesk Inventor®, para el análisis de sistemas multicuerpo de sistemas mecánicos.

De acuerdo con trabajos anteriores [3, 4] la aplicación de metodologías docentes activas basadas en la adquisición de competencias con un rol activo y directo de los estudiantes proporciona una sustancial mejora del proceso de aprendizaje.

Alguna de las actividades propuestas están basadas en trabajos anteriores de los autores, en los que una aplicación desarrollada en el entorno Mathematica® (el bien reconocido programa comercial de análisis matemático) para el análisis de mecanismos se adaptó al estudio de manipuladores. La aplicación está planteada desde un enfoque puramente didáctico desarrollando el análisis mecánico "paso a paso" e incluyendo además una visualización tridimensional y simulación de los resultados obtenidos [5]. A pesar de ser una herramienta muy potente para la enseñanza de la "Mecánica de Robots" se desveló que los estudiantes necesitaban una serie de conocimientos avanzados del entorno Mathematica®. Para evitar este inconveniente, los profesores responsables de la asignatura han desarrollado una aplicación bajo el mismo planteamiento "paso a paso" en un programa de análisis matemático comercial más flexible (Mathcad®) donde la formación previa del usuario es menos estricta y exigente debido a la utilización de comandos muy intuitivos, más visuales y fáciles de usar [3, 4, 6].



(a)



(b)

Figura 1. (a) Robot ABB IRB140 con la unidad de control remoto flexpendant y (b) pinza de accionamiento eléctrico SCHUNK EZ64 con placa de sujeción.

En el lado opuesto, el enfoque de "caja negra" en el que solo se muestra el resultado final (este enfoque se utiliza ampliamente en los programas comerciales de los fabricantes de robots más importantes, tales como ABB o KUKA [7,8] o en los programas de simulación dinámica tales como Autodesk Inventor®) es también interesante para la enseñanza de los contenidos de la asignatura "Mecánica de Robots" en ciertas circunstancias [9]. Ambos enfoques pueden ser muy útiles puesto que se complementan entre sí en el proceso de aprendizaje, tal como se mostró en [9] donde se realizó una comparativa entre ambas orientaciones didácticas para la enseñanza de la asignatura "Mecánica de Robots" mostrando las ventajas y desventajas de cada planteamiento. La utilización de ambas aplicaciones por parte de los estudiantes podría

ser muy útil tanto para comprobar la validez de las soluciones analíticas como para reforzar su auto-aprendizaje.

Además de ayudar a superar las dificultades de comprensión mencionadas previamente, el desarrollo de este proyecto ha supuesto una gran oportunidad para que los estudiantes se familiaricen con medios técnicos y programas informáticos propios de la ingeniería mecánica actual, habitualmente usados en el mundo industrial. También consideramos que ha supuesto una mejora del proceso de aprendizaje, por asumir los estudiantes un rol más activo, mediante la utilización de metodologías activas que facilitan, además, una evaluación basada en la adquisición de competencias.

## 1.2. Objetivos del proyecto

Los objetivos fundamentales de este proyecto planteados inicialmente han sido:

- 1) Conseguir que el estudiante mejore la comprensión de los conceptos teóricos y procedimientos de análisis de posición y cinemático de robots, desarrollados en la asignatura Mecánica de Robots mediante el uso de:
  - A) Material didáctico específicamente desarrollado con este fin.
  - B) Simulaciones del comportamiento cinemático de diversos tipos de manipuladores habitualmente utilizados en la industria, realizadas mediante programas CAE (computer-aided engineering), que permitan la visualización del movimiento de los robots.
  - C) Una serie de prácticas y actividades basadas en el robot ABB IRB140.
- 2) Que el estudiante se familiarice con medios técnicos e informáticos propios de una ingeniería actual.
- 3) Que la participación activa del estudiante aumente su motivación y mejore el proceso de aprendizaje.

A partir de los resultados de la aplicación de las actividades docentes desarrolladas dentro del ámbito de este proyecto de innovación docente, realizados este año sobre los alumnos matriculados en las asignaturas de Mecánica de Robots de la titulación del segundo ciclo de Ingeniero Industrial (4º curso) de la ETSII, se puede considerar que la consecución de los objetivos propuestos en este proyecto ha sido la siguiente:

En relación con el objetivo 1, la mejora de la comprensión de los conceptos teóricos y procedimientos de análisis que abarca el estudio mecánico de manipuladores, se ha conseguido satisfactoriamente tal como ha revelado los resultados de la evaluación continua realizada mediante las actividades desarrolladas, en forma resolución autónoma de ejercicios propuestos, seminarios tutelados, prácticas de laboratorio y trabajos finales que se describirán posteriormente en esta memoria con más detalle, en las que se han utilizado diversos materiales didácticos específicamente desarrollados y simulaciones con programas CAE que permiten la visualización del movimiento de los robots.

En cuanto al objetivo 2, se ha conseguido plenamente puesto que las diversas actividades desarrolladas han permitido a los alumnos tener un contacto directo con el programa de diseño CAE Autodesk Inventor®, el programa de análisis de robots ABB

Robostudio® y con el robot ABB IRB140 que dispone la ETSII. La implantación de estas actividades docentes ha supuesto un notable aumento del interés y motivación de los estudiantes matriculados en la asignatura Mecánica de Robots por los contenidos de la asignatura tal como refleja finalmente la tasa de éxito de la asignatura como indicador objetivo del nivel del aprendizaje por los estudiantes de los conocimientos incluidos en esta asignatura. Por este motivo también se considera que el objetivo 3 de este proyecto también se ha cumplido satisfactoriamente.

Para comprender mejor la aplicación de las actividades propuestas se ha considerado apropiado hacer un breve resumen del contexto de la asignatura sobre la que han sido aplicadas. La asignatura "Mecánica de Robots" es una asignatura optativa incluida en el grado de Ingeniero Mecánico dentro del segundo semestre del cuarto curso. En la actualidad, la ETSII de la Universidad de Salamanca ha empezado a impartir la docencia del primer curso de dicho grado y está previsto que la enseñanza de la asignatura "Mecánica de Robots" comience en el curso académico 2012/2013. De acuerdo con la planificación docente del grado, la asignatura abarca 6 ECTS (*i.e.*, 150 horas de dedicación del estudiante) de los que 2.7 ECTS (*i.e.*, 67.5 horas) son presenciales y el resto 3.3 ECTS (*i.e.*, 82.5 horas) se dedican al trabajo autónomo del estudiante. Los diferentes tipos de actividades que contempla la planificación docente del grado se clasifican en función del número de estudiantes que forman los grupos de clase:

- Clases magistrales en grupos grandes sin limitación del número de estudiantes que forman el grupo.
- Actividades de grupo medio (con un máximo de 30 estudiantes por grupo).
- Actividades de grupo reducido, *i.e.*, prácticas de laboratorio (con un máximo de 15 estudiantes).
- Seminarios (con un máximo de 25 estudiantes por grupo).
- Tutorías que pueden ser individuales o grupales.
- Exámenes o pruebas de evaluación.
- Actividades no presenciales.

Para superar la asignatura los estudiantes deben demostrar la adquisición de las siguientes competencias durante el desarrollo de las diversas actividades docentes: (i) capacidad de análisis y síntesis, (ii) capacidad de resolución de problemas y (iii) conocimiento del análisis de posición, cinemático y dinámico de manipuladores. Para alcanzar dichas competencias la asignatura está dividida en los siguientes temas:

- **Tema 1: Introducción.** Evolución histórica de los robots, concepto de robot, componentes de un robot industrial, estructura mecánica de un manipulador, aplicaciones industriales de los robots.
- **Tema 2: Análisis de posición:** Introducción, estudio de manipuladores (formalismo de Denavit-Hartenberg, problemas de posición directo e inverso, aplicación al robot ABB IRB140), espacio de trabajo.
- **Tema 3: Análisis cinemático:** Introducción, definición del Jacobiano, problemas cinemático directo e inverso, aplicación al robot ABB IRB 140, configuraciones singulares, cálculo recurrente de velocidades y aceleraciones.
- **Tema 4: Análisis dinámico:** Introducción, formulación de Newton-Euler, ecuaciones recurrentes hacia atrás, problema dinámico inverso, aplicación a un manipulador 3R plano.

El desarrollo de las diversas actividades presenciales se debe llevar a cabo durante cuatro horas a la semana distribuidas en dos bloques de dos horas durante el semestre. A partir de las estadísticas de años anteriores se prevé que el número de estudiantes matriculados en la asignatura sea de 30 aproximadamente. Por lo tanto, la distribución en grupos de acuerdo con los límites establecidos es la siguiente: un grupo único para las clases magistrales (grupo grande) y las de problemas (grupo medio), y dos grupos para las clases prácticas de laboratorio y seminarios (grupo pequeño). Teniendo en cuenta que la asignatura es optativa y además está situada en el último curso de la titulación de grado, se considera que los estudiantes matriculados están fuertemente interesados en los contenidos que se desarrollan en la misma.

## **2. Desarrollo del proyecto**

Para la consecución de los objetivos propuestos, se consideró necesario el desarrollo de las siguientes actuaciones, ordenadas por fases y que han sido desarrolladas de acuerdo con el calendario de ejecución establecido inicialmente en el proyecto:

Fase I) Diseñar y desarrollar, mediante programas CAE, aplicaciones informáticas interactivas de simulación de robots.

Fase II) Idear y planificar actividades docentes, basadas en las aplicaciones CAE y otros materiales específicos, que permitan aplicar los conocimientos adquiridos sobre el análisis de posición y cinemático de manipuladores.

Fase III) Adquirir los componentes necesarios para la realización de las actividades y creación de los materiales docentes. Inicialmente se contaba con la parte fundamental del equipo: un robot ABB IRB140 y una pinza Schunk EZN64 de accionamiento eléctrico.

Fase IV) Puesta en marcha de las prácticas y actividades docentes en la asignatura de Mecánica de Robots de 2º ciclo de Ingeniería Industrial, para usarlas posteriormente en la asignatura correspondiente de la titulación de Grado en Ingeniería Mecánica.

Fase V) Cuantificar la mejora del aprendizaje conseguida con la realización de las actividades docentes desarrolladas en las fases I, II y IV, introduciendo nuevos sistemas de evaluación basados en competencias.

Fase VI) Realizar encuestas de satisfacción de los estudiantes.

Con objeto de alcanzar los objetivos enumerados anteriormente, las actividades desarrolladas, que se describen con más detalle a continuación, se centraron en los siguientes campos:

- Simulación mediante programación CAE.
- Nociones básicas de simulación y programación del robot ABB IRB140 en el lenguaje RAPID.
- Análisis de posición: resolución de los problemas de posición directo e inverso.

- Análisis cinemático.
- Diseño de tareas de un proceso de fabricación automatizado.

Para la realización de las actividades se ha empleado los recursos de los que disponía inicialmente la ETSII, un robot ABB IRB140 y una pinza Schunk EZN64 de accionamiento eléctrico, y del diverso material adquirido con la ayuda económica aportada por el este proyecto consistente en la compra de una mesa de coordenadas sobre la que se ha colocado el robot que permite, mediante la utilización del medidor de distancias laser (también adquirido gracias a la aportación económica de este proyecto), obtener información experimental de la posición del elemento terminal del robot en las prácticas de laboratorio. También parte de la aportación económica se ha utilizado en el diseño y fabricación de una placa de sujeción (cf. Fig. 1b) de la pinza Schunk EZN64 a la brida de unión del elemento terminal del robot ABB IRB140 así como del mecanizado de diversas piezas para el desarrollo de las prácticas de laboratorio. Además se ha comprado un juego de micrómetros que deben ser utilizados por los estudiantes para determinar con la precisión requerida las dimensiones de las piezas a manipular. Finalmente, se han diseñado e imprimido, gracias a la financiación del área de Ingeniería Mecánica, dos posters (cf. Fig. 5 y 6) que incluyen la información esencial tanto de las especificaciones técnicas como del análisis mecánico del manipulador ABB IRB140. Estos posters, colocados estratégicamente en el laboratorio de la ETSII donde está alojado el robot, sirven como referencia directa para los estudiantes durante el desarrollo de las prácticas de laboratorio.

## **2.1. Descripción de las actividades realizadas**

Las diversas actividades docentes propuestas se han desarrollado de acuerdo con los formatos anteriormente establecidos: clases magistrales, clases de problemas, prácticas de laboratorio, seminarios, tutorías individuales y colectivas y un examen de evaluación final o, alternativamente, la defensa de un trabajo desarrollado durante la última parte del semestre en el que los estudiantes demuestren individualmente la adquisición de las competencias de la asignatura. Cada una de las actividades propuestas permite la adaptación de los contenidos a la formación académica del estudiante al tiempo que se complementan entre sí, resolviendo las más comunes y habituales dificultades de aprendizaje que han sido observadas en los estudiantes durante los años de experiencia docente de los autores. A continuación se discute de forma breve cada una de las actividades docentes incluyendo una descripción más detallada de aquellas nuevas actividades especialmente enfocadas a la participación activa de los estudiantes (seminarios y prácticas de laboratorio).

Las clases magistrales (impartidas en un grupo único) se han planificado como el punto de partida de la formación básica de los estudiantes en los conceptos desarrollados en la asignatura. Estas clases están encaminadas principalmente al desarrollo de los aspectos esenciales de los diferentes temas en los que se divide la asignatura, con indicaciones sobre cómo y dónde profundizar en los contenidos. Desde el principio del curso los estudiantes disponen de los apuntes de la asignatura para el seguimiento de las clases.

Las clases de problemas se consideran como una aplicación directa de los conceptos desarrollados en las clases magistrales y permiten a los estudiantes tener un primer contacto con el análisis mecánico de manipuladores desarrollado en esta asignatura.



Durante dichas clases el profesor resuelve paso a paso una serie de problemas incluidos en una colección de la que disponen los alumnos. Al final de cada clase se propone un problema con una dificultad similar al resuelto en clase para que los estudiantes lo resuelvan de forma independiente como tarea no presencial. Las dudas que les puedan surgir durante su resolución se tratarán en horas de tutoría. Los problemas propuestos pueden ser de dos tipos: (i) los que deben ser resueltos analíticamente e (ii) los que se resuelven con ayuda de las aplicaciones informáticas preparadas por los autores cuando se requiere un desarrollo matemático más largo y repetitivo. La formación básica sobre el uso de dichas aplicaciones se realiza en seminarios específicos tal como se describirá posteriormente. De este modo, se pueden analizar problemas más complejos cuya solución analítica requeriría un desarrollo matemático largo, repetitivo y, consecuentemente, tedioso y poco atractivo para los estudiantes.

Se han considerado dos tipos de seminarios diferentes: los primeros se dedican a la resolución por parte del estudiante, con la ayuda del profesor, de algunos ejercicios de la colección de problemas con cierto interés desde el punto de vista docente. Durante esta actividad, se pone de manifiesto los posibles fallos conceptuales o cuestiones malentendidas. A partir de esta información, en caso de ser necesario, el profesor establece actividades complementarias de refuerzo que favorezcan y faciliten a los estudiantes la comprensión correcta de tales conceptos.

Los seminarios del segundo tipo son aquellas actividades, que proporcionan a los estudiantes una formación complementaria de los contenidos de la asignatura, *i.e.*, en el uso de las diversas aplicaciones informáticas tales como Mathcad® o los programas de simulación dinámica (Autodesk Inventor® para el análisis de cualquier robot, o Robostudio® para el análisis de los robots fabricados por la empresa ABB). La utilización de dichas aplicaciones informáticas favorece el auto-aprendizaje de los estudiantes [3-4]. Además, estas actividades permiten introducir una serie de nociones básicas de programación en el lenguaje Rapid utilizado por los robots ABB que, posteriormente, será muy útil en el desarrollo de las prácticas con el robot ABB IRB140. Estos seminarios se plantean desde un punto de vista puramente práctico, con una participación directa y activa de los estudiantes durante la impartición del mismo. Por dichos motivos, estas clases se deben desarrollar en el aula de informática. A continuación se describe con más detalle cada uno de los seminarios propuestos:

- **Seminario 1:** Aplicación Mathcad®: la finalidad de esta actividad es llevar a cabo, con la aplicación desarrollada en Mathcad® por los autores, el análisis mecánico del robot ABB IRB140 resuelto paso a paso analíticamente con anterioridad en las clases de problemas. De esta forma, los estudiantes pueden descubrir cómo dicho análisis se puede desarrollar automáticamente y cómo se puede generalizar en problemas más complejos en los que se consideran más variables.
- **Seminario 2:** Autodesk Inventor®: esta actividad proporciona los conocimientos básicos sobre la simulación dinámica de sistemas multicuerpo con Autodesk Inventor® y muestra cómo analizar los resultados obtenidos de la simulación del movimiento de cualquier manipulador. Las piezas que constituyen la estructura mecánica del manipulador están disponibles en las páginas web de la mayoría de los fabricantes de robots industriales, tales como ABB o Kuka, y, una vez impuestas las restricciones a los ejes de los pares del manipulador, se puede generar la simulación del movimiento.

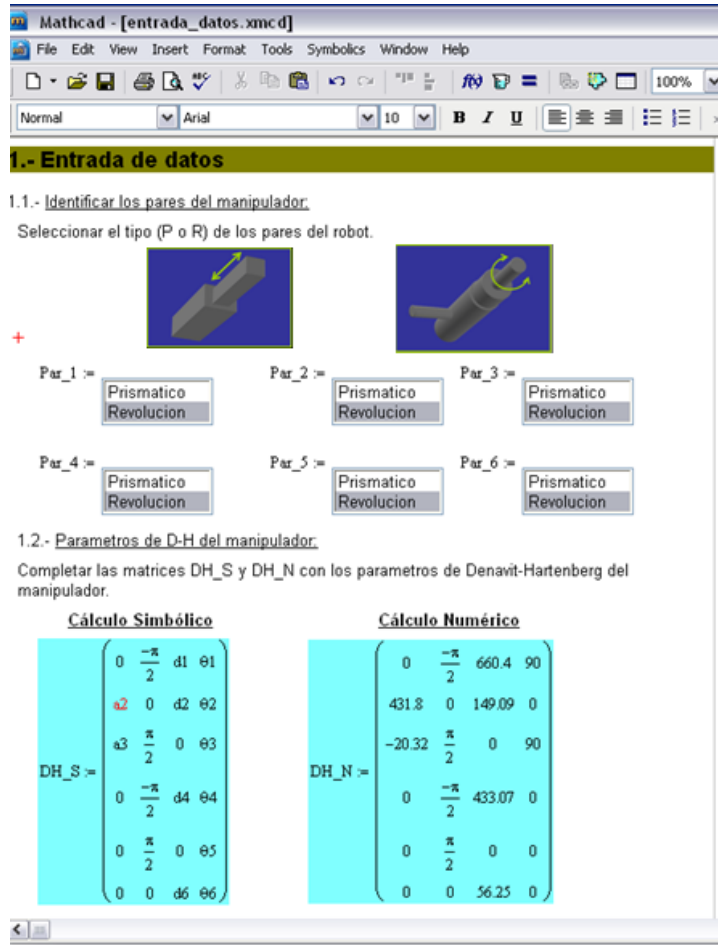


Figura 2. Captura de la entrada de datos de la aplicación desarrollada en Mathcad® para el análisis mecánico de manipuladores.

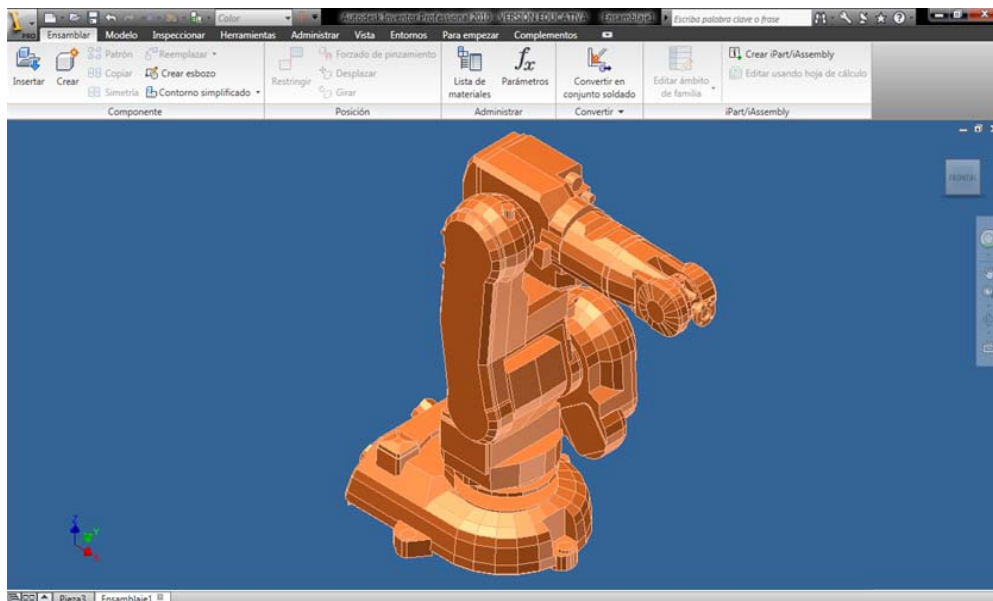


Figura 3. Captura de la aplicación Inventor® para el análisis mecánico de manipuladores.

- **Seminario 3: Robostudio®/Rapid:** este programa informático permite particularizar el análisis mecánico a robots fabricados por la empresa ABB. En este seminario se introducen los conocimientos básicos del componente Flexpendant (cf. Fig. 1a) que permite el control directo del robot y el acceso al entorno de programación con el que se puede crear, editar y ejecutar una tarea programada en el lenguaje Rapid. Además, esta aplicación permite la simulación del movimiento del robot en un proceso de fabricación utilizando diversos elementos que están incluidos en la biblioteca de componentes del programa. Es importante impartir este seminario previamente al desarrollo de la práctica 2 (que se describirá posteriormente) para familiarizar a los estudiantes con el entorno del robot ABB.

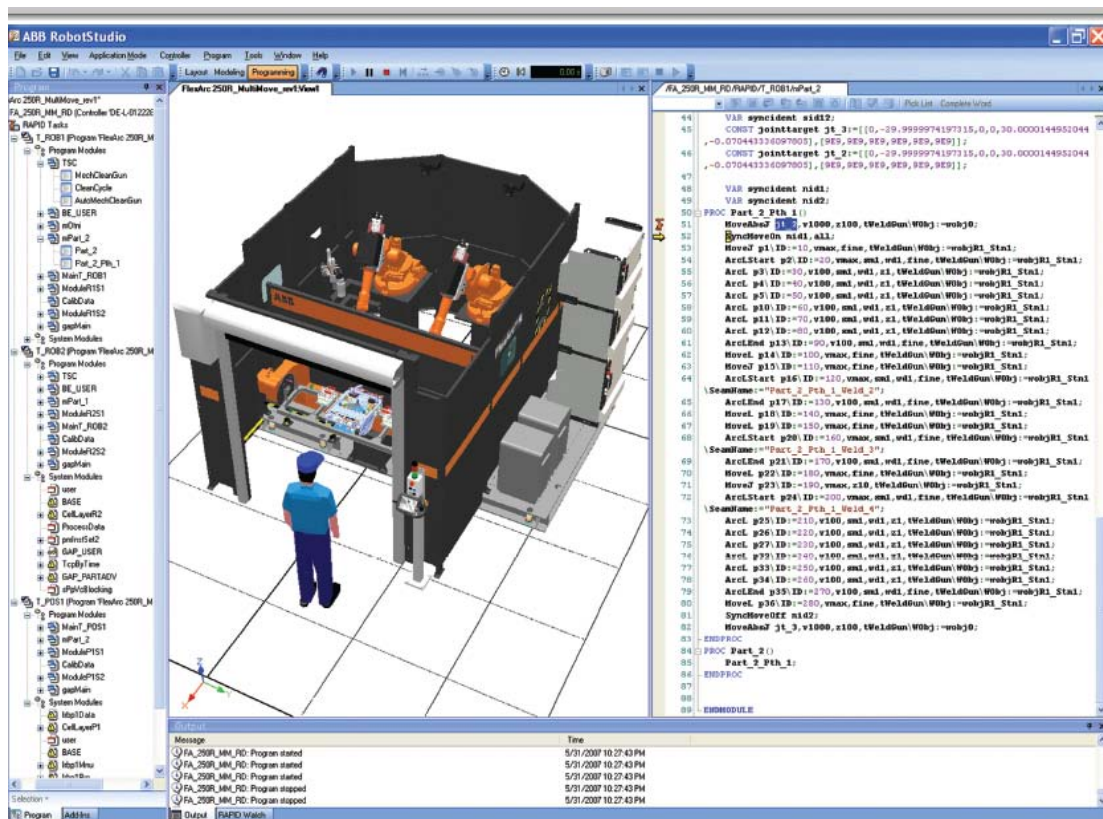


Figura 4. Captura de la aplicación Robostudio® para el análisis mecánico de manipuladores ABB.

Las prácticas de laboratorio representan el primer contacto físico con un robot industrial, y permiten la visualización directa y comprobación de los resultados obtenidos mediante dos puntos de vista complementarios: teóricamente, a través de la resolución analítica del problema (clases de problemas), y mediante el uso de diversas herramientas informáticas (Mathcad®, Inventor®, Robostudio®). Estas actividades se desarrollan en grupos pequeños de 15 estudiantes que, a su vez, son divididos en cinco subgrupos durante la clase práctica. A modo de resumen del análisis teórico-práctico realizado al manipulador ABB IRB140 en las clases previas a la prácticas, y con la finalidad de que la información esencial de dicho análisis esté durante el desarrollo de las prácticas, se han diseñado dos pósters (Fig. 5 y 6). A continuación se describe de forma más detallada cada una de dichas prácticas:

- Práctica 1: Especificaciones técnicas del robot ABB IRB 140.** El principal objetivo de esta práctica es familiarizar a los estudiantes con el robot ABB IRB140 mediante el desarrollo de una serie de tareas simples, así como establecer las medidas de seguridad esenciales para la utilización del robot y describir una serie de parámetros relevantes como, *i.e.*, la repetibilidad del robot. Estas actividades consisten, en esencia, en la búsqueda de información en el libro de especificaciones técnicas, y, siempre que sea posible, identificarlas sobre el robot ABB IRB140. Esta actividad se desarrolla en los siguientes pasos: (i) identificar los diferentes elementos que componen el robot industrial, (ii) identificar los ejes de los pares del manipulador y los tipos de movimiento asociados, aplicando para ello el movimiento (Fig. 7) eje a eje de forma directa al robot ABB IRB140 con la unidad de control remoto Flexpendant (Fig. 1b). Para el desarrollo de esta práctica resulta necesario un conocimiento básico del uso de la unidad de control directo Flexpendant. Por este motivo, durante la práctica se explican *in situ* una serie de cuestiones básicas sobre el accionamiento del robot on-line mediante la unidad de control Flexpendant. Otra actividad incluida en esta práctica consiste en que los estudiantes decidan si una serie de posiciones del elemento terminal del robot son accesibles o no de acuerdo con el espacio de trabajo que viene fijado en las especificaciones técnicas del robot (Fig. 8). Posteriormente, en otra actividad, los estudiantes deben decidir de entre una serie de combinaciones de las variables articulares (*i.e.*, en este caso el giro de los pares de revolución) cuál de ellas se puede aplicar al robot ABB IRB140 en función de los rangos de giro que especifica el fabricante (cf. Tabla 1). Finalmente, la última tarea en el desarrollo de esta práctica consiste en determinar la carga máxima que admite el robot para una cierta distancia desde el extremo del elemento terminal a partir del diagrama de cargas que proporciona el fabricante (Fig. 9).

Tabla 1: Información proporcionada por el fabricante ABB utilizada por los estudiantes en la primera práctica: rangos de giro de los pares.

Tipo de movimiento	Área de movimiento
Eje 1: Movimiento de rotación	De +180° a -180°.
Eje 2: Movimiento del brazo	De +110° a -90°.
Eje 3: Movimiento del brazo	De +50° a -230°.
Eje 4: Movimiento de la muñeca	De +200° a -200° de forma predeterminada De +165 a -165 revoluciones como máximo <sup>3</sup>
Eje 5: Movimiento de doblado	De +115° a -115°.
Eje 6: Movimiento de giro	De +400° a -400° de forma predeterminada De +163 a -163 revoluciones como máximo <sup>3</sup>

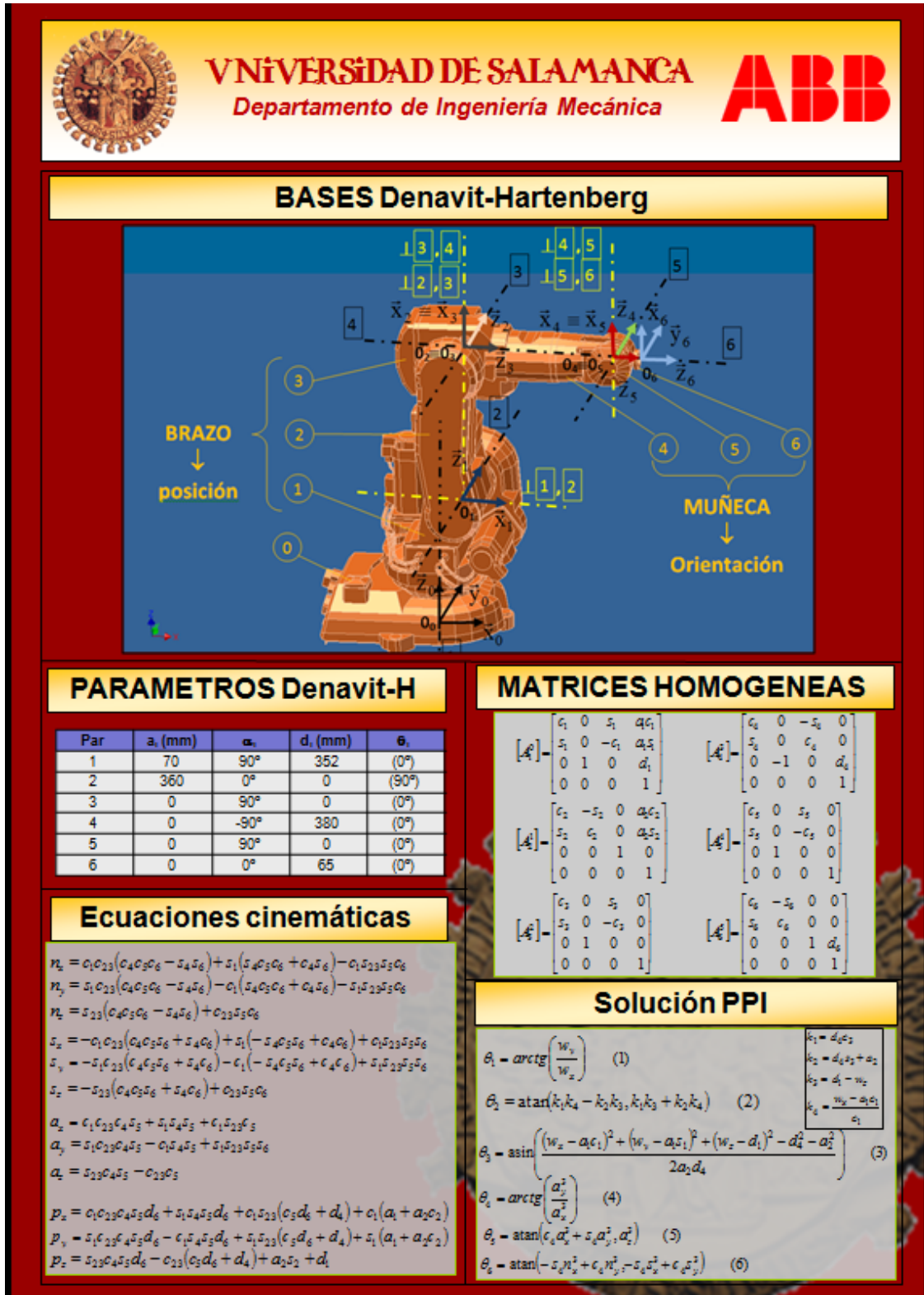


Figura 5. Póster 1 donde se incluye toda la información relativa a la aplicación del formalismo de Denavit-Hartenberg sobre la asignación de las bases sobre cada elemento, determinación de los parámetros asociados a dichas bases, las ecuaciones cinemáticas del manipulador y las ecuaciones que permiten resolver el problema de posición inverso (PPI).

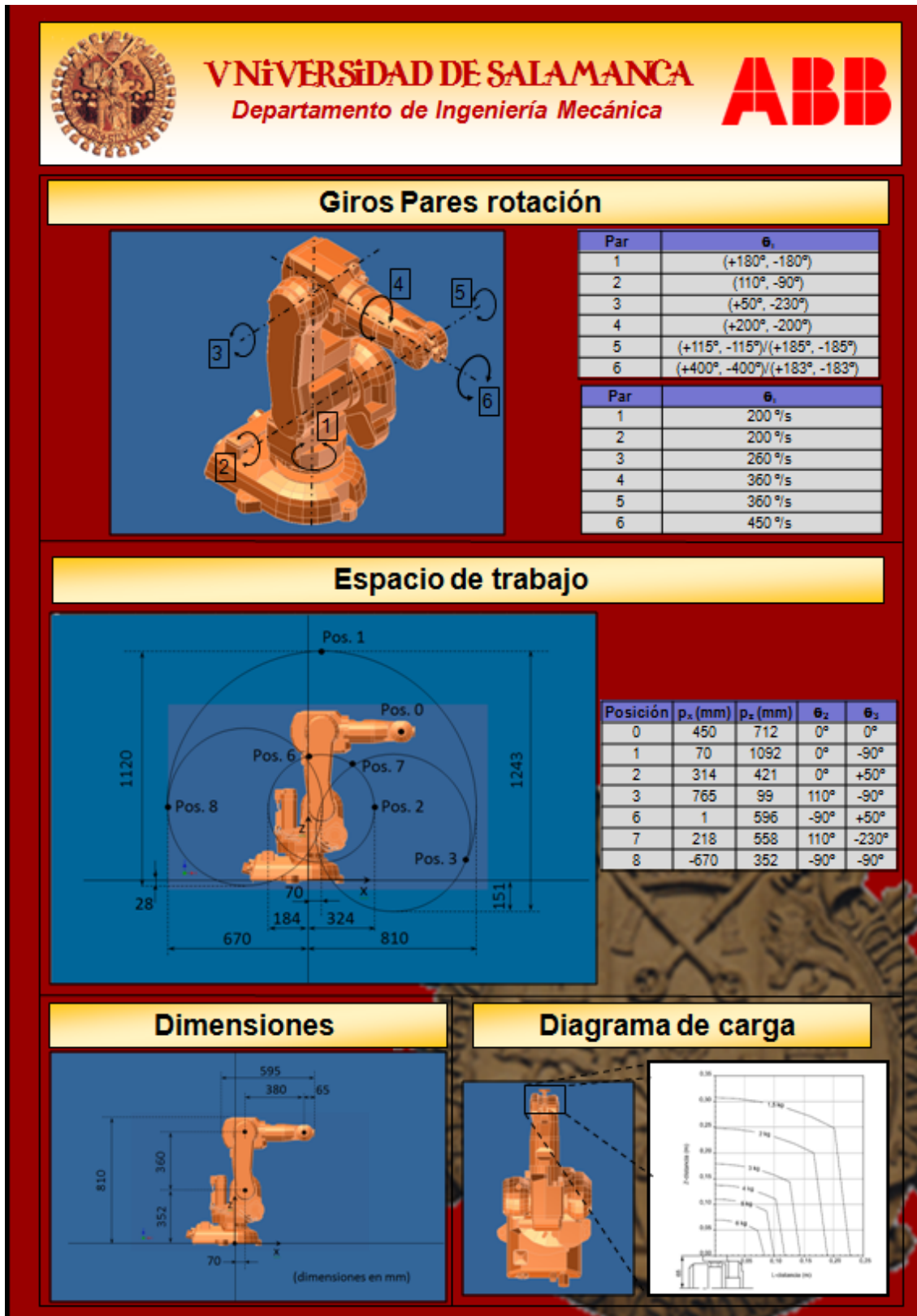


Figura 6. Póster 2 donde se incluye toda la información relativa a las especificaciones técnicas del robot ABB IRB140: ejes y movimientos de los pares, rangos de giro de los pares, velocidades máximas de giro, espacio de trabajo, dimensiones del robot, *i.e.*, distancias entre ejes de los pares y diagrama de carga.

Esta práctica se desarrolla al finalizar el primer tema de la asignatura, cuando los estudiantes tienen un conocimiento general de los componentes de un robot industrial, de los diferentes tipos de control, de las aplicaciones, etc.

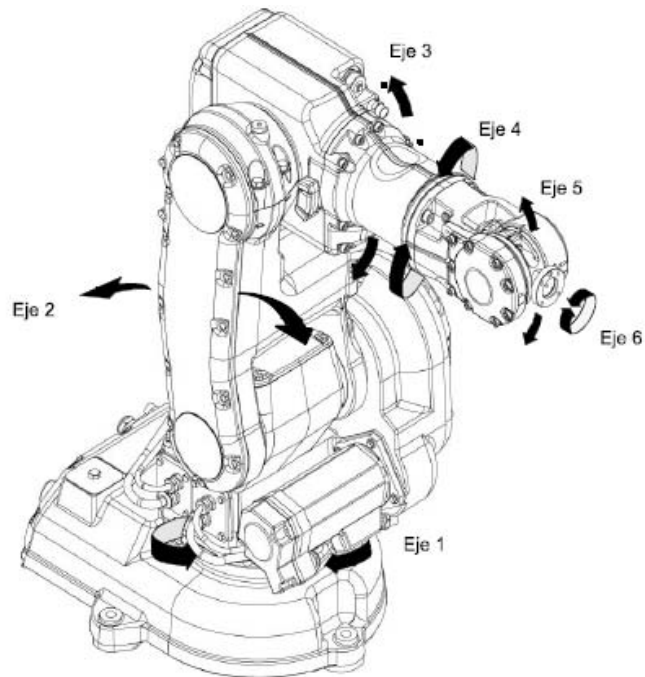


Figura 7. Información proporcionada por el fabricante ABB utilizada por los estudiantes en el desarrollo de la primera práctica: ejes y movimientos de los pares del manipulador.

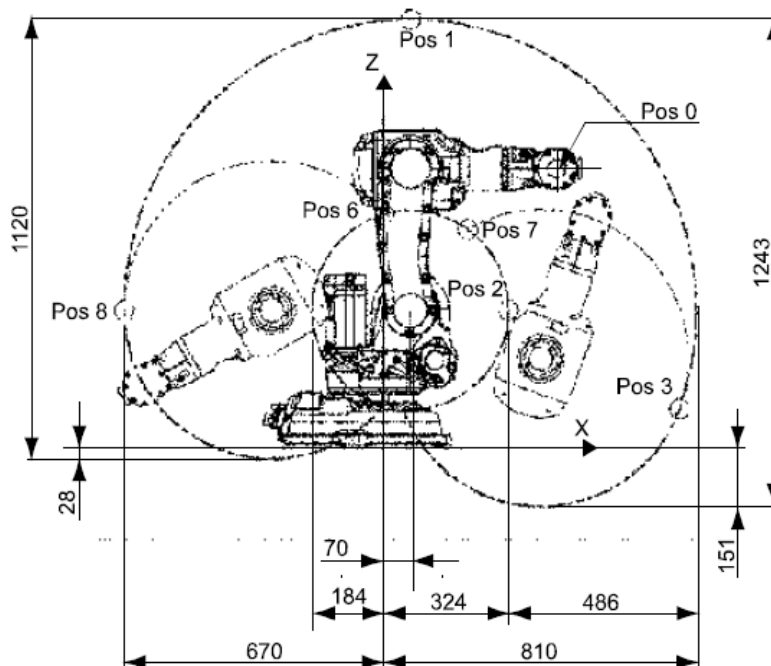


Figura 8. Información proporcionada por el fabricante ABB utilizada por los estudiantes en el desarrollo de la primera práctica: espacio de trabajo.

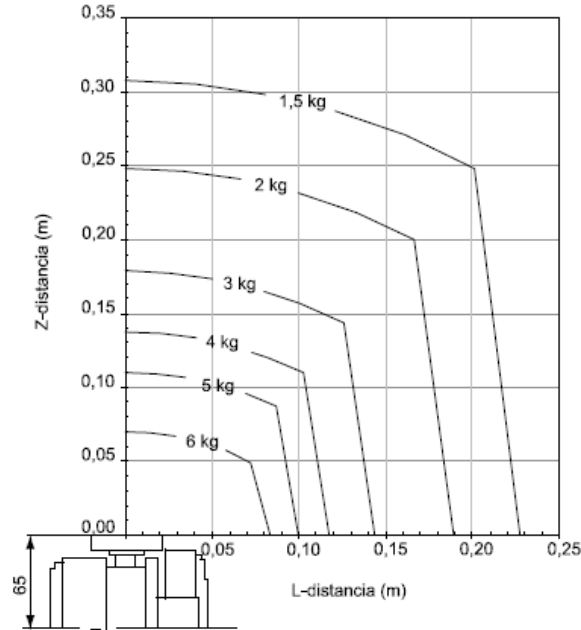
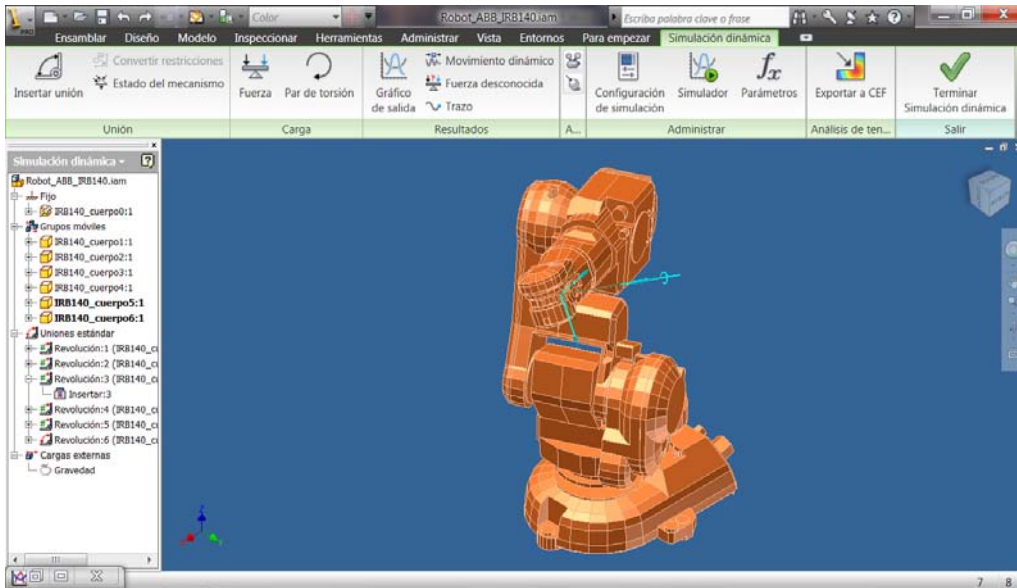


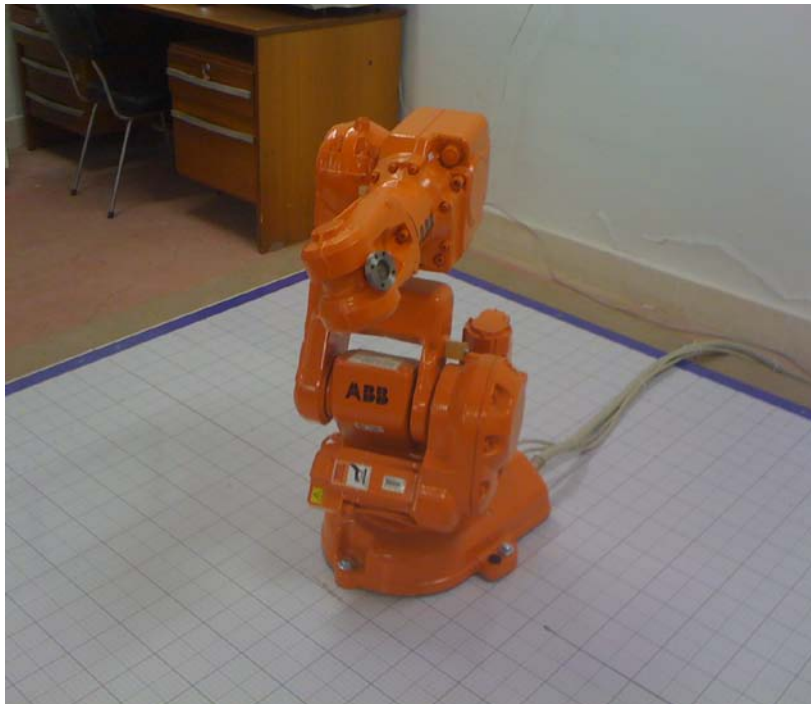
Figura 9. Información proporcionada por el fabricante ABB utilizada por los estudiantes en el desarrollo de la primera práctica: diagrama de carga.

- **Práctica 2: Análisis de posición aplicado al robot ABB IRB 140.** En esta práctica se tratan dos tipos diferentes de problemas de posición (directo e inverso). Cada una de ellos se desarrolla en dos fases: en primer lugar, la simulación y, en segundo, la aplicación en el robot ABB IRB140. El problema de posición directo (PPD) consiste en obtener la posición final del extremo del robot para un conjunto dado de variables articulares (ángulos de los pares de rotación). La primera fase se realiza mediante la simulación por ordenador de una configuración (combinación de las seis variables articulares, *i.e.*, giros de los pares) del manipulador, obteniendo la posición final del elemento terminal a través de las componentes del vector de posición de la pinza. Para llevar a cabo esta práctica el estudiante debe haber adquirido conocimientos de la simulación del movimiento con Inventor® y Robostudio® y, por este motivo, se debe realizar con posterioridad a los seminarios Inventor® y Robostudio®. Los estudiantes deben capturar una imagen del robot en la posición simulada para incluirla en el informe de la práctica. A continuación, los estudiantes utilizan el robot ABB IRB140 para colocar el robot en la posición deseada aplicando un movimiento eje a eje hasta alcanzar los valores de las variables articulares del PPD y, una vez posicionado, toman una foto de la configuración final del robot. Una vez que el robot está en estado de reposo, por cuestiones de seguridad, los estudiantes comprueban la posición del elemento terminal con la ayuda de un medidor de distancias láser que proyecta un haz sobre la mesa de coordenadas sobre la que está situado el robot. El medidor láser proporciona la coordenada  $z$ ; las coordenadas  $x$  e  $y$  se pueden leer directamente a través de la proyección del haz sobre la rejilla milimetrada (Fig. 10b). En el informe final de la práctica, los estudiantes comparan ambas soluciones, la virtual, obtenida de la simulación, con la real, obtenida de trabajar con el propio robot ABB.





(a)



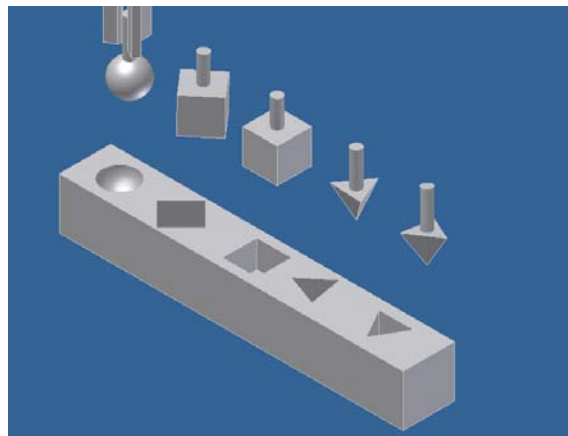
(b)

Figura 10. Una de las ocho posibles soluciones del problema de posición inverso utilizando (a) simulación con Inventor® y (b) el robot ABB IRB140.

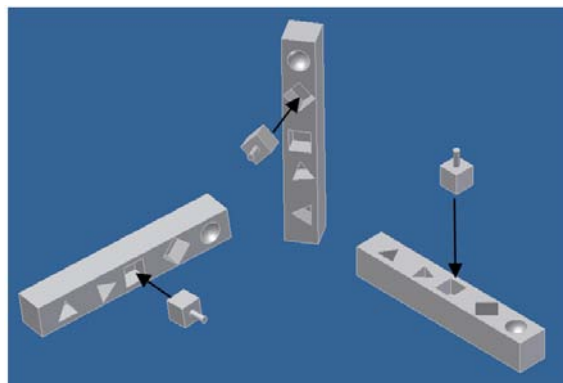
El problema de posición inverso consiste en obtener los valores de un conjunto de ángulos que aplicados sobre cada eje colocan al extremo terminal del robot en una posición dada. De acuerdo con la teoría, matemáticamente existen, para este tipo de manipuladores, ocho soluciones posibles del problema de posición inverso para alcanzar una determinada posición [10]. En primer lugar, el estudiante utiliza la aplicación informática en Mathcad® para obtener las ocho soluciones matemáticamente posibles del problema de posición inverso planteado en la práctica. Una vez obtenidas, debe comprobar cuáles de esas ocho soluciones son

mecánicamente posibles teniendo en cuenta los rangos de giro que permite el manipulador (cf. Tabla 1, vistos en la práctica 1). A continuación, los estudiantes simulan todas las soluciones obtenidas con el programa Inventor®, verificando si son mecánicamente posibles, *i.e.*, si existe una posible colisión entre los elementos del manipulador o si están situadas fuera del rango de giro de los pares del robot. Posteriormente, los estudiantes aplican al robot real todas las soluciones mecánicamente posibles, comprobando la posición final con el medidor láser. Como en el caso anterior, los estudiantes tomarán fotos del robot en cada posición para incluirlas posteriormente en el informe final de la práctica junto con las imágenes captadas en la simulación. Para la realización de esta práctica resulta necesario tener conocimientos previos del uso de las aplicaciones Mathcad® e Inventor®. Esta actividad se debe realizar una vez impartidos los seminarios 1 y 2.

- **Práctica 3: Simulación de procesos con el robot ABB IRB 140.** El objetivo de esta práctica es mostrar a los estudiantes como se puede programar y ejecutar un proceso industrial con un robot. Se han considerado tres procesos simples. El primero se refiere a la manipulación de objetos con diversas geometrías (Fig. 11a) desde un determinado punto dentro de una caja hasta otro punto situado en otra caja. El objetivo es hacer que el estudiante comprenda la importancia de determinar no sólo la posición, sino también la orientación final del elemento. Las cajas están situadas con diferentes orientaciones y posiciones sobre la cuadrícula del robot (Fig. 11b).



(a)



(b)

Figura 11. (a) Representación de los diferentes objetos que el robot debe manipular y de la caja con los agujeros donde debe el robot colocar los objetos y (b) colocación del objeto cubo con diferentes orientaciones de la caja.

El segundo proceso consiste en realizar una cierta trayectoria punto a punto con el robot en un plano dado. Esta trayectoria podría representar múltiples procesos de fabricación reales tales como la aplicación de un cordón de soldadura o un proceso de corte o la aplicación de un adhesivo en un proceso de montaje (Fig. 12).

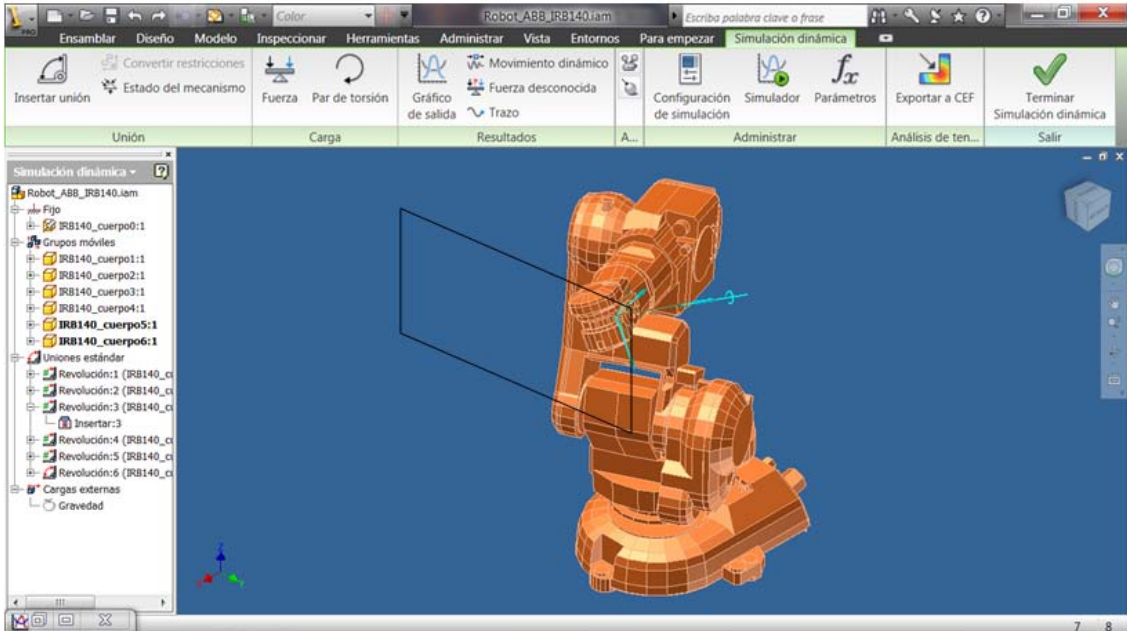


Figura 12. Simulación con Inventor® de la trayectoria en el plano YZ.

Durante la realización de esta práctica los estudiantes deben seguir los siguientes pasos: diseñar una trayectoria definida por puntos que recorre el cordón de soldadura, programación en Robostudio® del movimiento del robot a lo largo de los diferentes puntos que constituyen la trayectoria y simular el movimiento del robot recorriendo dicha trayectoria. Finalmente, los estudiantes aplican lo anterior al robot ABB IRB 140, donde el elemento terminal, que sujeta un lapicero, describe la trayectoria y dibuja la misma sobre una hoja de papel fijada en el plano de trabajo (Fig. 12).

- **Práctica 4: Análisis cinemático.** La última práctica consiste en el análisis de dos tipos de movimiento: el movimiento simple circular alrededor de un par y, otro más complejo, que consiste en el movimiento a lo largo de una trayectoria lineal con una velocidad determinada. En el primero se trata de mover uno de los pares un cierto ángulo y medir el tiempo transcurrido con un cronómetro y, a partir de estas medidas, obtener las velocidades lineal y angular del elemento terminal. Estos resultados se pueden comparar con los obtenidos tanto de las aplicaciones Mathcad® como Inventor®. El segundo tipo de movimiento requiere resolver el problema cinemático inverso. Por tanto, en primer lugar, los estudiantes deben usar la aplicación Mathcad® para obtener la solución numérica, utilizar los valores de las velocidades de los pares en la simulación con Inventor® y, finalmente, ejecutar el movimiento con el robot ABB IRB140. Esta práctica final debe ser llevada a cabo al finalizar el tema 3, donde se explica la teoría y se aplica el análisis cinemático de manipuladores.

## 2.2. Proceso de evaluación

Lógicamente, el cambio metodológico ha abarcado también cambios en el proceso de evaluación. Para ello, se ha introducido componentes en la evaluación que den cuenta del trabajo y logros del estudiante en relación con las actividades desarrolladas (dentro de un sistema de evaluación continua), y que contribuyan a motivar e incentivar su participación activa. La evaluación de las competencias adquiridas por el estudiante se ha realizado a través de la práctica de las actividades propuestas de la forma que se indica en el apartado resultados del proyecto.

Los cambios en la metodología docente deben incluir a su vez cambios en los procesos de evaluación. Desde esta premisa, los elementos de evaluación que proporcionan información sobre el trabajo y los logros de los estudiantes en relación con las actividades programadas (con un sistema de evaluación continua) deben contribuir a un incremento de la motivación e incentivar la participación activa de los estudiantes. En este sentido, el conocimiento real de las horas de trabajo dedicadas por los estudiantes en la elaboración de dichas actividades es una cuestión clave con el fin de realizar un ajuste adecuado de los ECTS.

La evaluación de las actividades que garantizan la adquisición de las competencias establecidas se ha planeado a partir de la siguiente consideración: aplicar un sistema de evaluación continua que favorezca e incentive el estudio progresivo de los estudiantes durante el desarrollo de la asignatura. Esta evaluación incluye las actividades no presenciales, tales como la entrega de los trabajos propuestos, y las presenciales, tales como los seminarios, en los que los estudiantes resuelven problemas más complejos con la orientación del profesor y la ayuda de las aplicaciones informáticas o las prácticas de laboratorio. Estas actividades facilitan al profesor conocer el grado de aprendizaje alcanzado por los estudiantes en las clases magistrales o de problemas. Además, permiten detectar las posibles dificultades puntuales en las que es necesario reforzar la enseñanza, o detectar problemas particulares que presenten algunos estudiantes. Para resolver dichos problemas se establecen ciertas actividades complementarias que permiten reforzar y reevaluar el proceso de aprendizaje.

Las acciones complementarias pueden ser de dos tipos dependiendo de si el problema está extendido sobre toda la clase o se detecta sólo en casos puntuales. Las primeras consideran el desarrollo de tutorías en grupos pequeños en los que se aplican actividades docentes adaptadas al problema detectado. Las segundas consideran la posibilidad de realizar tutorías individualizadas con el fin de orientar al estudiante en función de las necesidades particulares que presente. Teniendo en cuenta este planteamiento general, se ha considerado un sistema de evaluación de las actividades de la siguiente forma:

- **Prácticas.** Para superar la asignatura es obligatorio realizar todas las prácticas y entregar un informe de cada una de ellas a lo largo del semestre. El peso de estas actividades en la evaluación final es del 15%.
- **Ejercicios propuestos.** Como en el caso de las prácticas, estas actividades se distribuyen a lo largo del curso tratando de conseguir que los alumnos dediquen un tiempo razonable al estudio de la asignatura. Los ejercicios permiten al profesor conocer la rapidez del proceso de aprendizaje. El peso de los ejercicios o trabajos es del 15% de la nota final.

- **Seminarios.** Sólo los seminarios en los que los estudiantes resuelven los problemas de forma individual son evaluados para conocer si los estudiantes han adquirido las competencias establecidas en esta asignatura. Además, los resultados de estas actividades permiten validar el aprendizaje autónomo de los estudiantes. Teniendo en cuenta su importancia, su peso en la calificación final es de 20%.
- **Evaluación final.** Se considera que está constituida por dos opciones entre las que el estudiante puede elegir antes del primer tercio del semestre. La primera opción es un examen escrito convencional en el que los estudiantes demuestren la adquisición de las competencias propias de la asignatura a través del análisis de posición y cinemático de un robot industrial de similar dificultad que los problemas de análisis resueltos en clase. En la segunda opción los estudiantes deben realizar un trabajo que incluye el análisis de posición, cinemático y dinámico de un manipulador industrial (considerando la programación y aplicación de un proceso industrial con el robot ABB IRB140) con la ayuda de las aplicaciones informáticas Mathcad®, Inventor® y Robostudio® bajo la supervisión del profesor. La evaluación de dicho trabajo se realiza a través de los contenidos de la memoria del mismo y de su defensa por medio de una breve exposición (10 min.). En ambas opciones las pruebas propuestas permiten determinar el conocimiento global de la asignatura, el grado de aprendizaje de sus contenidos y la adquisición de las competencias propias de la asignatura. Por este motivo esta prueba es la que cuenta con un mayor peso en la nota final (50%). Los estudiantes deben obtener una puntuación mínima de 4 puntos sobre 10 para superar la asignatura.

### 3. Resultados

Los resultados obtenidos de las actividades propuestas incluidas en este trabajo han sido:

- Mejorar la visualización espacial y la interpretación de los resultados teóricos del análisis mecánico de un manipulador.
- Aplicar los conocimientos adquiridos en las clases magistrales y de problemas a un robot industrial real.
- Mejorar el proceso de aprendizaje del estudiante y promover su auto-aprendizaje a través del desarrollo de las actividades propuestas.
- Promover el nuevo papel del estudiante en el proceso de enseñanza/aprendizaje dentro del marco del EEES.
- Mejorar la adquisición de competencias tanto específicas como transversales incluidas en la asignatura "Mecánica de Robots".
- Ajustar una mejor distribución de los créditos ECTS mediante la cuantificación de las horas de trabajo personal dedicadas por los estudiantes a las nuevas tareas.
- Establecer nuevos procedimientos de evaluación continua, intentar estimar el grado de satisfacción, aceptación y valoración de las actividades y otros parámetros.
- Favorecer la comprensión de los conceptos teóricos y de los procedimientos de análisis para la visualización *in situ* de un manipulador real, ejercitar y poner en práctica los conocimientos previos adquiridos en las clases magistrales o seminarios.
- Poner en contacto directo a los estudiantes con un robot real en todas las etapas de los procesos automatizados con robots: diseño, programación, simulación y ejecución del proceso.

Los resultados de este proyecto se han recopilado y se han enviado a tres congresos internacionales. El primero de ellos corresponde a un congreso generalista de ingeniería mecánica dentro del ámbito iberoamericano y se presentará dentro del área temática de innovación docente durante los días 4 al 7 de septiembre de 2011 en Oporto (Portugal). Por otro lado también se ha enviado a dos congresos internacionales específicos de innovación docente que se celebrarán en Lisboa del 1 al 2 de octubre de 2011 y en Madrid del 4 al 7 de octubre de 2011. Este último está, en el momento de la entrega de esta memoria, en proceso de aceptación una vez que el resumen del artículo ha sido aceptado. Lamentablemente, debido a la alta cuota de inscripción de los congresos y a la ausencia de fuentes de financiación para los mismos es posible que solo se pueda asistir a dos de ellos con la ayuda económica parcial del área de ingeniería mecánica de Béjar y con la aportación económica de los propios autores. A continuación se detallan los artículos previamente mencionados.

**Autores:** M. Lorenzo, J.C. Pérez-Cerdán, C. Blanco, J.A. Cabezas, L. Aguado  
**Título:** Diseño de nuevas actividades docentes en la enseñanza de mecánica de robots  
**Congreso:** X Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica (CIBIM 2011), Oporto.  
**Fecha:** 2011. (Artículo aceptado).

**Autores:** M. Lorenzo, J.C. Pérez-Cerdán, J.A. Cabezas, C. Blanco, D. Vergara, L. Aguado  
**Título:** New teaching activities for learning Robot Mechanics  
**Congreso:** International Symposium on Project Approaches in Engineering Education (PAEE'2011), Lisboa.  
**Fecha:** 2011. (Artículo aceptado).

**Autores:** M. Lorenzo, J.C. Pérez-Cerdán, J.A. Cabezas, C. Blanco, D. Vergara, L. Aguado  
**Título:** Development of new teaching activities for learning Robot Mechanics  
**Congreso:** *Research in Engineering Education Symposium 2011* (REES 2011), Madrid,  
**Fecha:** 2011. (Resumen aceptado).

#### 4. Conclusiones

Dentro del nuevo marco común europeo de la educación superior (EEES) establecido por el tratado de Bolonia, se ha desarrollado una serie de actividades docentes aplicadas a la enseñanza de la asignatura "Mecánica de Robots" (materia impartida en el grado en Ingeniería Mecánica como asignatura optativa del último curso así como en la titulación Ingeniero Industrial) con el fin de superar los problemas que tradicionalmente han estado asociados con el aprendizaje del alumno, facilitando dicho proceso durante el desarrollo de la asignatura. Los resultados reales de estas actividades no se desvelarán hasta la implantación del cuarto curso del grado en Ingeniería Mecánica en el curso académico 2012/2013. Sin embargo, estas actividades ya han sido puestas en práctica durante el curso 2010/2011, durante el desarrollo de este proyecto de innovación docente, mostrando resultados prometedores, aumentando la motivación del estudiante, su participación activa, su interés por los contenidos de la asignatura y, consecuentemente, mejorando el proceso de aprendizaje. La evaluación continua ha conducido a la adquisición de competencias con un incremento en la tasa de éxito de la asignatura.

## Referencias bibliográficas

- [1] Ch Zoller *et al.*, Editores: Julia González y Robert Wagenaar, *Tuning Educational Structures in Europe, Informe Final, Fase I*, Universidad de Deusto (2003).
- [2] JA Cabezas, M Lorenzo, "La simulación de robots industriales como herramienta de aprendizaje en Mecánica de Robots". *I<sup>as</sup> Jornadas Innovación Educativa de la EPS de Zamora*, Zamora, España, 20-22 junio 2006.
- [3] D Vergara, M Lorenzo, MP Rubio, "Aplicación de las nuevas tecnologías en la innovación docente de la detección de defectos en piezas mediante radiología industrial". *II<sup>as</sup> Jornadas Innovación Educativa de la EPS de Zamora*, Zamora, España, 19-22 junio 2007.
- [4] D Vergara, MP Rubio, M Lorenzo, "Nuevas herramientas docentes para facilitar el autoaprendizaje de los diagramas de equilibrio ternario". *XVI Congreso Universitario de Innovación Educativa en las Enseñanzas Técnicas*, Cádiz, España, 23-26 septiembre 2008.
- [5] JA Cabezas, T Martínez, V Hernández, P Moreno, JC Pérez-Cerdán, "Aplicación de Mathematica a la simulación de Robots", *Actas del XV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, **3**:573-576, 2002.
- [6] M Lorenzo, JA Cabezas, "Aplicación de las TIC al análisis mecánico de robots industriales". *I<sup>as</sup> Jornadas Innovación Educativa de la EPS de Zamora*, Zamora, España, 20-22 junio 2006.
- [7] ABB, [www.abb.com](http://www.abb.com)
- [8] KUKA, [www.kuka.com](http://www.kuka.com)
- [9] JA Cabezas, M Lorenzo, JG Fueyo, M Dominguez, MP Rubio, "Simulación de robots: dos planteamientos didácticos". *XVII CNIM – 17º Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, Gijón, España, 14-15 febrero 2008.
- [10] KS Fu, RC Gonzalez, CGS Lee, *Robótica*. Editorial McGraw-Hill, Madrid, 1988.