



# Proyecto de Ingeniería Mecánica integrador de conocimientos. Cuarto cuatrimestre del Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales

S. Cardona Foix<sup>1</sup>, L. Jordi Nebot, J. Puig-Ortiz

*Departament d'Enginyeria Mecànica. Universitat Politècnica de Catalunya*  
lluisa.jordi@upc.edu

---

*El plan de estudios del grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona incluye en el cuarto cuatrimestre la asignatura Proyecto I cuyo objetivo es que el alumnado aprenda a plantear correctamente un problema de ingeniería concreto y encuentre una solución que pueda resolverlo a partir de los conocimientos básicos que posee de matemáticas, dibujo, programación y mecánica. En paralelo, está cursando Teoría de Máquinas y Mecanismos y Dinámica de Sistemas.*

*A partir de este entorno, se ha considerado que los alumnos con un cierto sesgo hacia la mecánica pueden realizar un proyecto cuya base científica sea el estudio de un manipulador plano paralelo de pantógrafo que incluye el estudio cinemático, el diseño y la implantación del accionamiento que se realiza mediante servomotores de modelismo. El control de los motores se realiza mediante una placa electrónica con un microcontrolador que se programa en un lenguaje muy parecido al C en un entorno simple mediante el cual también se carga del programa, vía bus USB, a la placa para su funcionamiento autónomo.*

*Los resultados obtenidos después de un cuatrimestre de impartición son satisfactorios tanto por parte del profesorado como del alumnado.*

---

## 1. INTRODUCCIÓN

El plan de estudios de los tres grados que se imparten en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona –ETSII Barcelona– [1]: grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales (GITI), grado de Ingeniería Química (GIQ) y grado de Ingeniería de Materiales (GIM), incluyen en el cuarto cuatrimestre la asignatura Proyecto I, de 3 ECTS. El objetivo principal de esta asignatura es que el alumnado aprenda a plantear correctamente un problema de ingeniería concreto y encuentre una solución que pueda resolverlo, a partir de los conocimientos básicos de las asignaturas que ha cursado en los cuatrimestres anteriores. Las asignaturas cursadas durante el primer curso (primer y segundo cuatrimestres) son las mismas para los tres grados, mientras que las cursadas en el tercer cuatrimestre difieren ligeramente.

Así pues, todos los alumnos poseen conocimientos de matemáticas, dibujo, programación y mecánica. En paralelo, los estudiantes del GITI están cursando Teoría de Máquinas y Mecanismos y Dinámica de Sistemas.

Desde la Dirección de la ETSII de Barcelona, se hizo un llamamiento a los departamentos con la finalidad de que éstos propusieran problemas de ingeniería que pudieran realizarse en este entorno.

Desde el Departamento de Ingeniería Mecánica, los profesores que presentan esta ponencia consideraron que los alumnos con un cierto sesgo hacia la mecánica podrían realizar un proyecto [2] cuya base científica fuera el estudio de un manipulador plano paralelo de pantógrafo.

Teniendo en cuenta que el número de alumnos que cursa el cuarto cuatrimestre, entre los tres grados, es de alrededor de 250, la Dirección escogió 12 temas de entre los propuestos por los distintos departamentos, para impartir en el cuatrimestre de primavera del curso 2011-2012, con la finalidad que cada tema tuviera alrededor de 20 alumnos matriculados. Uno de ellos fue el que se presenta en este artículo. La lista de temas se muestra a continuación.

- ¿Es capaz nuestra máquina-herramienta de fabricar las piezas con la precisión necesaria?
- ¿En qué se diferencia el agua que bebemos del agua de los ríos y mares?
- Implantación básica de plantas industriales
- Aprovechamiento de la luz natural en las aulas de la ETSII Barcelona
- Críticas PIB per cápita como indicador de bienestar de la población de un país y construcción de su propio índice de bienestar.
- ¿Cómo mejorar la seguridad de los vehículos frente a impactos?
- Diseño y montaje de un termómetro digital.
- Diseño y desarrollo de software en python para el análisis y gestión de información.
- Sistemas de comunicación industrial.
- Manipulador plano paralelo de pantógrafo.
- Instalación eléctrica de una vivienda.
- Composite: variación de la resistencia y rigidez de una viga compuesta de resina armada, en función de la composición de los materiales.

Al ser una asignatura en la que participan doce departamentos de la Escuela, la coordinación entre ellos es fundamental y se decidió que ésta sería responsabilidad de uno de los miembros del equipo directivo; en concreto, la coordinación corre a cargo de la Subdirección Jefatura de Estudios de Máster y Postgrado.

La asignatura está estructurada en 15 sesiones de 2h semanales. Tres de estas sesiones corren a cargo del Departamento de Proyectos en Ingeniería –DPI– en las que se explica al alumnado en qué consiste realizar un proyecto de ingeniería. El resto de sesiones se dedican a fijar criterios y objetivos a la vez que a explicar fundamentos teóricos y técnicos básicos para el avance del proyecto. Parte del tiempo restante de las sesiones se dedica a la realización de tareas concretas del proyecto, en grupos de entre tres y cinco alumnos. Durante las seis primeras semanas de curso, las sesiones que son responsabilidad del DPI se intercalan con las sesiones que se realizan por parte de los responsables de los proyectos.

El sistema de evaluación es el mismo, evidentemente, para los doce temas que se desarrollan dentro de esta asignatura aunque dependan de diferentes departamentos. Se basa en las tareas realizadas, su presentación y defensa.

## 2. PLANTEAMIENTO

Con la finalidad de aunar las competencias genéricas asociadas a esta asignatura – Comunicación eficaz oral y escrita, Aprendizaje autónomo y Trabajo en equipo–, los conocimientos adquiridos por los estudiantes en la mayoría de las materias cursadas anteriormente y la curiosidad propia del espíritu ingenieril, los autores proponen el estudio de un manipulador con movimiento plano. En la etapa previa a esta decisión, se planteó el estudio de otro tipo de mecanismos que se analizaron con la colaboración y la participación de dos becarios estudiantes de la titulación de Ingeniero Industrial especialidad Mecánica. Esta participación fue de gran interés por su aportación sobre los conocimientos que realmente habían adquirido en las materias anteriores al Proyecto y por la manifestación de los temas que les eran atractivos y de interés.

Finalmente, se ha escogido un manipulador plano paralelo de pantógrafo por ser un mecanismo de dos grados de libertad en el que el elemento de salida realiza un movimiento de traslación paralela a la base del manipulador. Esto hace que sea fácil acoplar a este elemento un utillaje para realizar una tarea concreta que se corresponda con una aplicación realista y simple que deberán decidir los alumnos. El estudio del manipulador incluye el

estudio cinemático, la selección de los actuadores y del control, el diseño de una maniobra y la implementación del control de los actuadores para su ejecución.

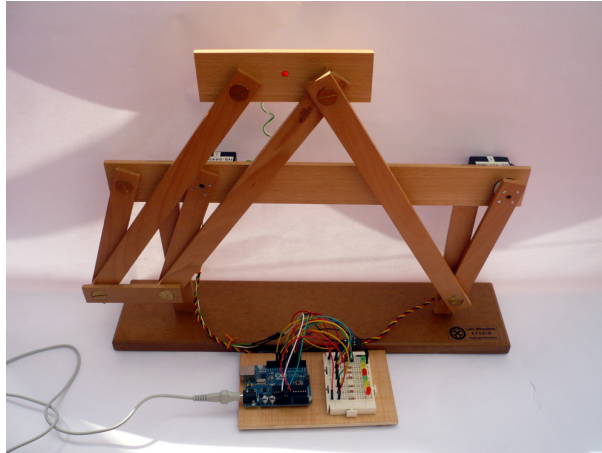


Figura 1. Prototipo de manipulador plano paralelo de pantógrafo

En el Laboratorio de Máquinas se dispone de un prototipo de este manipulador (figura 1) que se ha desarrollado, construido y puesto a punto en el mismo laboratorio. Todos los grupos de estudiantes de este proyecto han trabajado con la misma maqueta. Prever que cada grupo de alumnos diseñe su propia maqueta y se construya requiere unos conocimientos y capacidades que el estudiante no tiene porqué tener y unas disposiciones económica y de taller de las cuales realmente no se dispone. La utilización de elementos estándar (Meccano, Fisher...) permitiría resolver el problema de las horas de taller pero limita la libertad de diseño y de momento no se ha contemplado su utilización. Los conocimientos necesarios para el diseño mecánico de la maqueta no está previsto que se adquieran en los estudios de grado de la ETSII Barcelona.

El planteamiento de este proyecto ha obligado al profesorado a recordar la necesidad de tener una visión de conjunto de todos los campos implicados en el funcionamiento de una máquina; ésta es una visión que, con el tiempo, a veces se pierde por el hecho de centrarse demasiado en una misma asignatura o en un tema de investigación, a menudo, unitemático y quizás alejado de la realidad ingenieril productiva.

En general, los conocimientos de las materias que no son de la especialidad no se pueden usar con la misma desenvoltura que los propios en una explicación ante el alumnado. Por ello, los autores, profesores de Teoría de Máquinas y Mecanismos y de Vibraciones Mecánicas, se han visto con la necesidad de reciclarse en materias de programación, control y electrónica y en el uso de las herramientas actuales.

Debe remarcarse que en el desarrollo del proyecto no se ha previsto el uso de sensores de ningún tipo excepto el de un pulsador que da la orden de inicio de la maniobra. Este hecho es debido a:

- Ser un tema desconocido, a priori, por el alumnado.
- La utilización de sensores debería servir para algo más que mostrar eventos en un panel puesto que esto no aporta lo que el profesorado desea. La utilización de sensores requeriría utilizarlos para una realimentación modificando la acción del manipulador en función del entorno. Esto añade una complejidad no asumible al contenido del proyecto.

También se considera que si bien los alumnos son capaces de realizar los cálculos dinámicos pertinentes, es mejor prescindir de ellos sin olvidar de hacerles notar que es una limitación del proyecto a favor de llegar a un resultado tangible en el tiempo disponible. Así pues, se supone que la zona de trabajo de los actuadores –par-velocidad– es suficientemente amplia como para no limitar el objetivo de la maniobra propuesta.

Pensando en un proceso de aprendizaje incremental, los aspectos dinámicos se prevé utilizarlos en la asignatura Proyectos II que el alumnado cursará en el sexto cuatrimestre del grado.

### 3. DESARROLLO

Las sesiones se llevan a cabo a partir de una exposición del profesorado en la que se utiliza una aplicación TiddlyWiki –aplicación tipo wiki libre y autocontenida en un único archivo que puede editarse directamente en un navegador web lo que la hace fácil de gestionar, usar y actualizar– que contiene toda la información necesaria para el desarrollo del proyecto y que está organizada por temas, algunos de los cuales incluyen ejercicios que los estudiantes deben realizar para familiarizarse con los aspectos más complejos del proyecto.

En todas las sesiones presenciales se encarga al alumnado que realice para la siguiente (excepto en la última) una serie de trabajos que le conducirán a hacer realidad el proyecto y a la consecución de las competencias transversales asociadas a éste.

Las tareas básicas que debe realizar el alumnado son:

- Realización de un análisis comparativo de los manipuladores serie y paralelo.
- Estudio cinemático, determinación del espacio de trabajo y diseño de una trayectoria contenida en éste.
- Elección de sensores e implementación del control del prototipo con un microcontrolador Arduino [3].
- Ejecución de la representación gráfica y de los planos del prototipo,
- Diseño y materialización de un soporte para realizar la tarea concreta que cada grupo haya decidido.

Estas tareas se han programado en las siguientes sesiones:

Sesión 1: Buscar información sobre los manipuladores y realizar una comparación entre manipuladores serie y paralelo, de extensión máxima 1 página. Se entregará en la siguiente sesión transcurridas dos semanas.

Instalar en su ordenador portátil el programa de cálculo SciLab, de lenguaje similar a MatLab pero de código libre.

Sesión 2: Estudiar y determinar el espacio de trabajo (configuraciones accesibles) y la trayectoria del punto de interés del manipulador plano utilizado en el proyecto. Se dispone de dos semanas para realizar esta tarea, que deberá ser entregada.

Sesión 3: Buscar información sobre servomotores y el microcontrolador Arduino y realizar un breve resumen, de extensión máxima 1 página. Se entregará en la siguiente sesión transcurridas dos semanas.

Sesión 4: Instalar en su ordenador el software de la placa Arduino y definir e implementar una aplicación de control con leds inspirada en un ejercicio propuesto por el profesorado pero mejorándolo, con la finalidad de familiarizarse en el uso y la programación de la placa. La aplicación deberá ser presentada, explicada y defendida en la siguiente sesión por todos integrantes de cada grupo y será evaluada por el resto de grupos.

Sesión 5: Realizar la calibración del servomotor proporcionado.

Sesión 6: Definir un movimiento del servomotor y conseguir que lo describa. Deberá presentarse al grupo-clase en la siguiente sesión.

Sesión 7: Definir y calcular mediante SciLab el movimiento del elemento de salida del manipulador. Dibujar los planos y el modelo 3D del manipulador que se utilizará.

Sesión 8: Implementar el control de los servomotores para que el manipulador realice el movimiento definido.

Sesión 9: Diseñar y construir (mediante una máquina de prototipaje rápido disponible en el Laboratorio) un utillaje para el manipulador.

Sesión 10: Acabar las tareas y preparar el informe final.

Sesión 11: Redactar el informe final y preparar la presentación del proyecto.

Sesión 12: Presentar el proyecto, evaluar el del resto de los grupos y autoevaluar la tarea realizada por todos los miembros del grupo durante la realización del proyecto.

#### 4. MATERIAL UTILIZADO

Tal como se ha comentado, el manipulador plano paralelo de pantógrafo utilizado por los alumnos es una maqueta construida en el Laboratorio. La maqueta del manipulador utilizada es de barras de madera con articulaciones metálicas. Esto la hace liviana y muy segura de manipulación. La utilización de este tipo de construcción puede resultar atractiva a un grupo considerable de alumnos que por primera vez acercan sus manos a una máquina. Además, es también el tipo de construcción utilizado en un buen número de maquetas que se les presentan en las clases y en las practicas de Teoría de Máquinas y Mecanismos con lo cual tienen una referencia de su uso.

Con la finalidad de focalizar la dificultad en los puntos de interés y plantear cuestiones que sean abordables por el alumnado, el accionamiento del pantógrafo se realiza mediante servomotores de radiocontrol (RC) utilizados en el modelismo. Su medida y capacidad de carga, en general, son razonables y el hecho de que sean muy utilizados los hace accesibles tanto por su localización como por su coste económico. Este tipo de motor permite un control absoluto y directo del ángulo girado por él a diferencia, por ejemplo, de los motores paso a paso que necesitan de un encóder absoluto o de una estrategia de inicio de movimiento. Los servomotores RC tienen un ángulo de giro limitado entre  $90^\circ$  y  $270^\circ$ , según los modelos, y elevadas prestaciones de par y rigidez, lo que permite evitar la preocupación de encontrarse dentro o fuera de la zona de trabajo del actuador (figura 2).

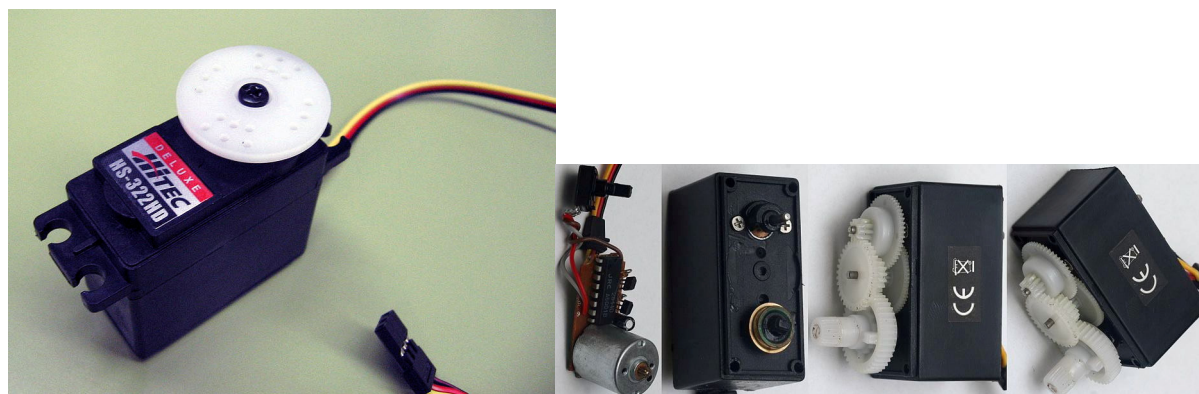


Figura 2. Fotografía de un servomotor utilizado en la realización del proyecto y detalles de su interior

El control de los servomotores se realiza mediante una placa electrónica *Arduino*, plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar en un entorno simple. Esta placa dispone de un microprocesador Atmel que se programa en un lenguaje muy parecido al C (figura 3). El programa se carga en el microprocesador, vía bus USB, de la placa para su funcionamiento autónomo. Desde la página web de la empresa [3], se puede descargar el entorno de desarrollo integrado (IDE) para su programación y carga del programa en el microcontrolador. El software contiene, entre otras, una librería de funciones adecuadas para la manipulación de los servomotores.

Para que el alumnado se familiarice con la programación del microcontrolador y el uso *Arduino* se les proporciona una placa de prototipaje, un pulsador, un conjunto de leds, cables y resistencias para que realicen una aplicación en la que se enciendan y se apaguen los leds siguiendo unas órdenes que se correspondan con una aplicación realista: semáforos de vehículos, semáforos combinados de vehículos y peatones, barreras de peaje de

autopistas... Es interesante notar su interés por explorar situaciones originales y no utilizar los ejemplos que se encuentran en la red.

```

delay(2000); // S'espera un temps per començar la trajectòria.
t0= millis(); // Es guarda l'instant inicial del recorregut.

for(int i=1; i<n_punts; i++)
{
  leds(0,fi_1[i-1],fi_1[i]); // encen els leds verd/roig
  leds(1,fi_2[i-1],fi_2[i]);
  t= int(millis()-t0);
  while(t<temps[i])
  {
    pos_1=map(t,temps[i-1],temps[i],180-fi_1[i-1],180-fi_1[i]);
    pos_2=map(t,temps[i-1],temps[i],fi_2[i-1],fi_2[i]);
    servo_1.write(pos_1);
    servo_2.write(pos_2);
    t= int (millis()-t0);
  }
}
apaga();

delay(2000); // S'espera un temps per retrocedir.
leds(0,fi_1[n_punts-1],90);
leds(1,fi_2[n_punts-1],90);

for(int i=0; i<=20; i++)
{
  pos_1=map(i,0,20,180-fi_1[n_punts-1],90);
  pos_2=map(i,0,20,fi_2[n_punts-1],90);
  servo_1.write(pos_1);
  servo_2.write(pos_2);
  delay(50);
}
}

```

Figura 3. Ejemplo de programación del microprocesador Arduino

Los cálculos necesarios para determinar, por ejemplo, el espacio de trabajo del manipulador, la trayectoria que debe describir el elemento de salida de éste, etc. se realizan mediante el programa de cálculo SciLab. La programación en SciLab es similar a la de MatLab pero tiene la ventaja que su uso es libre y por lo tanto este programa puede ser usado en cualquier ordenador permitiendo al alumnado realizar sus trabajos, reuniones ... en o fuera de la universidad.

Para las tareas complejas de programación, tanto del sistema mecánico como del control, se ha proporcionado al alumnado una serie de plantillas que pueden ser modificadas y adaptadas a las necesidades de aplicación de cada grupo de trabajo.

Para fabricar el utillaje que debe realizar la tarea que corresponde a la aplicación que cada grupo de alumnos ha decidido para el manipulador, se dispone de una máquina de prototipaje rápido de fabricación por adición de material (figura 4).

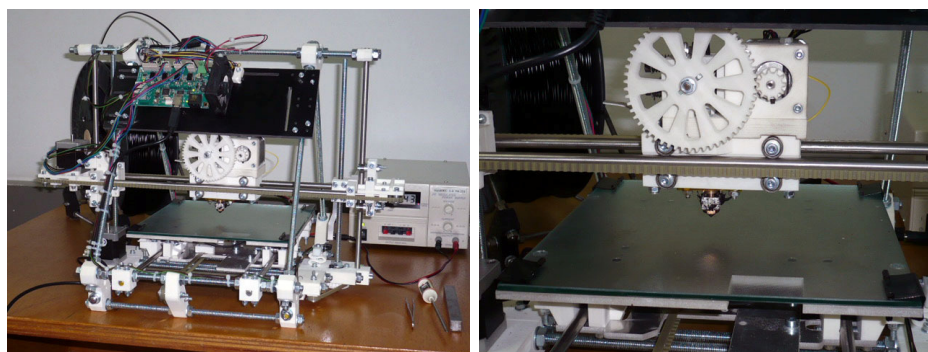


Figura 4. Máquina de fabricación por adición de los utillajes diseñados y detalle del extrusor

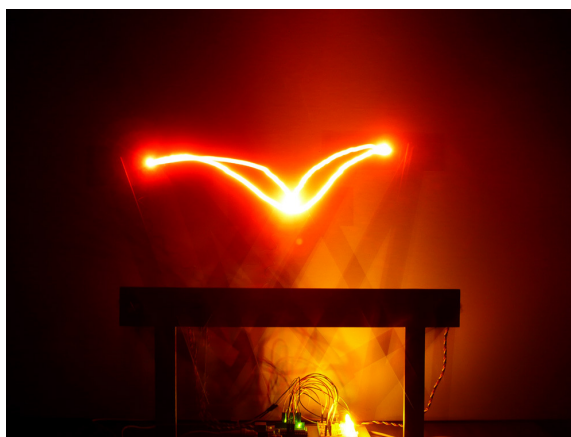
## 5. RESULTADOS

Todos los grupos han conseguido definir una tarea realista y concreta para cada etapa del proyecto.

La maniobra que debe realizar el elemento de salida del manipulador paralelo de pantógrafo estudiado ha sido decisión de cada grupo de trabajo. Con el material proporcionado, el alumnado ha sido capaz de plantear que este elemento realice la trayectoria adecuada para:

- Atornillar la rueda de un automóvil con cuatro tornillos.
- Mezclar dos componentes en un único recipiente.
- Imprimir la fecha de caducidad y etiquetar un envase.
- ...

Las tareas que realiza el elemento de salida del pantógrafo van acompañadas con el uso de leds que se apagan y se encienden según los criterios establecidos de funcionamiento. Un ejemplo de ello se muestra en la figura 5.



*Figura 5. Trayectoria del manipulador obtenida mediante una fotografía realizada con el obturador abierto durante el tiempo de maniobra*

## 6. CONCLUSIONES

Las tareas encargadas se han realizado, en la mayoría de los casos, dentro de los plazos previstos y con resultados satisfactorios.

El alumnado que ha participado en este proyecto ha mostrado una gran satisfacción al conseguir que el manipulador realizase la tarea que había previsto, aunque al principio fuera pesimista y pensara que el proyecto representaba mucho trabajo y dedicación.

El alumnado, también, ha reconocido estar satisfecho con el enfoque del proyecto porque es la primera vez que en los estudios que están realizando tienen la oportunidad de aunar los conocimientos adquiridos en las diferentes asignaturas previas y les ha proporcionado una primera visión de conjunto necesaria que debe tener un ingeniero.

El profesorado responsable del proyecto, aunque reconoce que la dedicación a él ha sido muy considerable, está plenamente satisfecho por los resultados obtenidos, cree que el enfoque es adecuado y no duda en proponer la continuidad del mismo y de nuevos temas con el mismo enfoque.

## 7. REFERENCIAS

- [1] <http://www.etseib.upc.edu/ca/cursactual/portal-dassignatures> (15-mayo-2012)
- [2] W. Singhose, J. Donnell, *Introductory Mechanical Design Tools*, Georgia Institute of Technology, (2009).
- [3] <http://www.arduino.cc> (15-mayo-2012)