

Construcción modular de robots móviles. Proyecto basado en portafolio para estudiantes de grado

Cecilio Angulo, Pere Ponsa y Cristóbal Raya

Abstract— Engineering is defined as “the application of scientific principles and knowledge to the systematic design and construction of devices, machines or systems of a certain economic value”. Often, the engineers instruct themselves on scientific knowledge applied to the design, but the phase of the construction is omitted. It is proposed in this article to use like developmental pattern a project on mobile robotics with the strategy of portfolio during a degree course or like final work. The students motivate themselves through the challenge to solve complex problems of the real world in a controlled framework.

Index Terms— Engineering education, Mecatronics, Mobile robotics.

I. INTRODUCCIÓN

Un proyecto de robótica móvil puede diseñarse como un modelo que focaliza sobre los conceptos y los principios centrales de muchas disciplinas de la ingeniería, implicando a los estudiantes en tareas de solución de problemas, y culminando en productos realistas generados por el estudiante. Básicamente, para construir un robot [1] es necesario: un cuerpo físico (ingeniería mecánica), un microprocesador que controle el robot (ingeniería de control e informática), varios sensores que detecten el entorno (ingeniería electrónica), motores para actuar (ingeniería de control y eléctrica) y un programa que defina el comportamiento del robot (ingeniería informática). En suma, puede considerarse como un trabajo en mecatrónica.

Si existe una infraestructura mínima, el coste total de construir un robot móvil educativo es reducido, por debajo de los €80, ya que los componentes informáticos y electrónicos son baratos, la parte mecánica no tiene por qué ser extremadamente robusta, el software es libre de licencias en la mayoría de los casos, y son accesibles en línea numerosos tutoriales e información técnica.

Un proyecto de estas características, gestionado a través de un portafolio, favorece un aprendizaje multidisciplinario y modular, propone nuevas perspectivas de conocimiento respecto a la educación tradicional de una cierta disciplina y

supone un método estructurado para que los estudiantes aprendan conceptos en una cierta profundidad. Además, estas estrategias realzan capacidades como el auto-aprendizaje (aprendiendo a aprender), la auto-gestión, la capacidad de innovación y otras habilidades de la vida real [2,3].

La estrategia del portafolio proviene del mundo empresarial y su uso en docencia se fecha en los años 90 del pasado siglo, con el objetivo de medir algunos aspectos y habilidades del aprendizaje que no son medibles a través de pruebas [4]. Además, ayuda al estudiante a un mejor uso y reflejo de los conocimientos, habilidades adquiridas, destrezas, etc. [5]. Experiencias similares a la aquí presentada están siendo también analizadas y desarrolladas con cierto éxito como instrumento docente habitual en diferentes áreas de conocimiento (Diseño Gráfico, Historia, Derecho) y universidades (Univ. Autònoma de Barcelona, Univ. Politècnica de Catalunya, Univ. de Barcelona) de nuestro contexto cercano [6,7].

En la Sección II se comentará en detalle el desarrollo del proyecto propuesto y su aplicación en el ámbito de la robótica móvil. En la Sección III se mostrará la metodología del uso del portafolio sobre el caso de estos proyectos de robótica móvil, mientras en la Sección IV se sintetizarán los resultados de las diversas experiencias llevadas a cabo. Finalmente, se presentarán conclusiones sobre el trabajo presentado.

II. PROYECTOS EN ROBÓTICA MÓVIL

A. Definición del proyecto

La definición del proyecto es esencial para el éxito del aprendizaje. Los proyectos que se proponen en este trabajo se adaptan a las características de cada estudiante mediante una complejidad y una profundidad del aprendizaje ajustable a la habilidad particular del alumnado. Además, se combina la teoría clásica con la tecnología más reciente como ejercicio para aprender sobre la evolución de técnicas en un área.

Para desarrollar la capacidad de diseño en modularidad de los estudiantes es necesario definir el proyecto no solamente como meta por sí mismo, sino como un complemento y punto de partida para otros. La cooperación es posible con un planeamiento inicial apropiado.

La figura del profesor varía a lo largo del proyecto. De inicio, su papel es el de un profesor estándar que establece

Los autores forman parte del Departamento de Automática (ESAI) de la Universidad Politècnica de Catalunya (e-mail: cecilio.angulo@upc.edu).
DOI (Digital Object Identifier) Pendiente

claramente los objetivos del proyecto (con diversos grados de dificultad) y las especificaciones para permitir modularidad entre diversos proyectos al mismo tiempo o en diversas etapas. Los estudiantes, por su parte, expresan al profesor sus preferencias y se alcanza un acuerdo, de forma que ahora el profesor es su ingeniero-jefe y trabajan bajo su supervisión. Para evitar que el proyecto se aparte de las metas principales, se fijan ciertos hitos o plazos de tiempo. Los estudiantes mantienen entrevistas de forma regular con el profesor, quizá junto con otros estudiantes implicados en proyectos relacionados, y utilizan las herramientas y los recursos de forma autónoma. Finalmente, los estudiantes comienzan la construcción o la modificación del ingenio asociado al proyecto y a partir de este momento el profesor es considerado como un cliente o usuario que espera que el producto final cumpla con todas las especificaciones y objetivos marcados inicialmente. Así, las tareas asignadas al profesor son:

1. Como diseñador de objetivos: definir la meta, las condiciones de contorno y su división en un conjunto de hitos.
2. Como supervisor: seguir la evolución de cada hito y de la tarea global, así como la detección de comportamientos anómalos y sus correcciones.
3. Como cliente: comprobar la calidad del producto final, el ajuste del coste y del tiempo utilizado para construir el robot.
4. Como tutor: ayuda en línea, desarrollo de materiales didácticos, selección de bibliografía.

En cualquier caso, si el proyecto está bien definido desde el principio con objetivos e hitos acordados muy claros, la figura del profesor no es crítica en este tipo de aprendizaje. El profesor puede proponer una metodología específica, pero es el estudiante quien debe contribuir con su conocimiento y autonomía personal. Es deseable alcanzar un equilibrio entre la rigurosa metodología, la imaginación y la artesanía. Es necesario, entonces, que el profesor anime las capacidades personales a lo largo de la tarea de elaboración del proyecto.

Para completar el proyecto de una manera profesional, se debe crear documentación que satisfaga el doble propósito: demostrar avances y resultados del actual trabajo y facilite el desarrollo de módulos futuros basados en la estructura o componentes desarrollados.

B. Proyecto en robótica móvil

Un proyecto integrado sobre robótica móvil es de interés en la educación de la ingeniería por:

1) *Contenido Competencial*: Este método de trabajo permite evaluar de una manera muy objetiva la capacidad de una futura ingeniera en la formulación de problemas, su desarrollo y la búsqueda de soluciones. Es necesario un esfuerzo de análisis para justificar sus elecciones y sintetizar conclusiones sobre los resultados obtenidos.

2) *Condiciones Globales*: Los estudiantes desarrollan un proyecto de principio a fin, ocupándose de todos los problemas desafiantes asociados. Esta forma de aprendizaje es didáctica porque existe una componente importante de motivación. Los estudiantes se ocupan de los contenidos de

una manera que les interesa y les es relevante. Por otra parte, para desarrollar un proyecto es necesario un período de búsqueda de información sobre los componentes a utilizar tanto en Internet o la biblioteca, como visitando minoristas y distribuidores, para obtener información directa y reciente, lo que favorece el desarrollo de “comportamientos sociales de ingeniería” fuera de la Universidad.

3) *Resultados Positivos*: Los estudiantes obtienen un resultado productivo al final del proyecto. Se crea, partiendo de un papel blanco, un dispositivo capaz de realizar tareas específicas.

Se alega en ocasiones que la construcción de un robot es una tarea muy dura, que requiere un buen equipo de investigadores en diversas disciplinas y una inyección importante de dinero. Esto no es así cuando la robustez no es un aspecto crítico en el desarrollo del robot. El objetivo final en esta clase de proyectos no es el robot móvil en sí mismo, sino el diseño, la fabricación y el proceso de evaluación del dispositivo, es decir, un objetivo educativo, lejos de desarrollos avanzados, pero quizás un estímulo para futuros investigadores.

Además es importante la diferenciación entre la robótica en la automatización industrial y la robótica móvil. La robótica industrial presenta una clasificación de estructuras mecánicas y un conjunto de aplicaciones industriales que son el resultado de más de 40 años de experiencia en esta área. La robótica móvil es un campo multidisciplinario que emerge con problemas sin resolver en el ámbito de la robótica autónoma [8]. Los expertos comparten diferentes visiones: desde un robot simple a un robot inteligente en el sentido de una criatura mecánica que puede trabajar de forma autónoma [9].

La Figura 1 muestra diferentes acercamientos al trabajo en robótica móvil: el Tipo I define la construcción de un robot, con la mecánica básica, una combinación interesante de sensores y comportamiento y sin el uso de la programación; el Tipo II también construye un robot con disposiciones mecánicas flexibles pero sólo un subsistema motorizado y no muchos sensores, mientras se mantiene una programación interesante de alto nivel; el Tipo III persigue trabajar sobre un robot base con los dispositivos mecánicos y electrónicos convenientes, y centrarse en el diseño de algoritmos sofisticados de control. Ninguna de las tipologías definidas se ajusta muy bien a un curso de grado, y por lo tanto se propone una alternativa en este artículo.

Los sensores con los que se dota al robot son elementos claves para integrar diversas disciplinas y definir un proyecto emocionante con objetivos claros según las preferencias y el background de los estudiantes. Por otra parte, el estudio de sensores permite a los estudiantes aprender y practicar muchos de los fundamentos prácticos de una manera motivadora, demostrándoles que las teorías clásicas son interesantes y útiles.

Se puede afirmar que en algunos casos es posible seguir una receta totalmente determinista para construir un robot móvil completo: diseño, integración de los sensores y actuadores, control electrónico, comportamiento y ambiente.

Este punto de vista presenta dos problemas específicos. El primero es el particular de cada diseñador, que supondrá un obstáculo para la integración del robot en un campo de trabajo genérico. El segundo es el comportamiento pasivo del estudiante, que actúa en modo de lazo abierto, en el sentido que él/ella sigue simplemente una lista de instrucciones.

	BACKGROUND		
	MECÁNICA	ELECTRÓNICA	SOFTWARE
I	BÁSICO	MEDIO	NINGUNO
II	MEDIO	BÁSICO	MEDIO – BÁSICO
III	NO DEFINIDO	NO DEFINIDO	ALTO

Fig. 1. Diversos acercamientos a la Robótica Móvil.

Una forma de solucionar el primer problema es mirar más allá de la tarea de construcción de un robot. Otros trabajos son también necesarios, por ejemplo: un gráfico que muestre la evolución del robot móvil; una tabla comparativa entre diversos microcontroladores, motores, sensores; una discusión sobre el tipo de rueda a ser utilizada.

Para atacar el segundo problema, se debe de cambiar el comportamiento pasivo del alumnado en uno activo, en un proceso dinámico que permita trabajar en modo de lazo cerrado y facilite el mecanismo de aprendizaje. El papel del profesor en este punto es importante, pues su interacción con el estudiante condiciona el desarrollo de las actividades.

El estudiante debe definir un conjunto de opciones dentro de cada actividad y tomar una decisión razonada por sí mismo. Entonces, el profesor actúa como un subsistema de ayuda humano con respuestas cualitativas. El estudiante actúa como en una secuencia de decisiones ligadas (una decisión para cada uno de los hitos). Ésta podría no ser la manera óptima pero será en cualquier caso una manera razonada personal.

Esta compleja relación entre el profesor y el estudiante requiere realizarse dentro de un entorno físico de trabajo apropiado con las herramientas adecuadas [10]. El laboratorio en robótica móvil es una sala con espacio flexible dividido en dos zonas. La primera está dedicada al planeamiento de la tarea, la discusión de ideas, la formación inicial de estudiantes, los entornos multimedia, etc. La segunda área es el lugar de trabajo experimental típico con posibilidad para construir un robot móvil.

Finalmente, una lección aprendida es que son necesarios mecanismos docentes que reduzcan la distancia entre la manera académica de enseñar y el realismo industrial. Así, existen tres conceptos importantes a tratar durante el proyecto: el coste del robot, su robustez, y su mantenimiento. Existe una relación compleja entre estos conceptos. En la visión

académica tradicional, se asume que el robot móvil debe ser de bajo coste, robustez reducida, y alto mantenimiento, mientras que en la industria el coste y la robustez son más elevados y el mantenimiento se reduce casi a cero. Esta carencia de realismo es un problema sin resolver en la Universidad.

III. METODOLOGÍA Y GUÍA DEL PORTAFOLIO

La construcción de un robot móvil desde un punto de vista académico debe ser una mezcla inteligente de imaginación, de artesanía, y de método. La mayoría de tareas a realizarse se pueden manejar como metas independientes en un plan a largo plazo, el portafolio, y realizadas como un ejercicio de artesanía, donde el estudiante aplica el conocimiento aprendido y su autonomía. Por supuesto, el método debe ser lo bastante flexible como para adecuarse mejor a la enseñanza que a puros propósitos productivos, y debe ser entendido como una serie de etapas en una trayectoria difuminada hacia el objetivo final de conseguir un robot móvil funcional.

Acorde al propósito motivacional de la robótica móvil, se propone utilizar la metodología [11] mostrada en la Figura 2, donde cada etapa es modelada por un bloque cuadrado de tamaño proporcional al coste de tiempo de la tarea definida. Después de terminar ciertas tareas, se obtiene un conjunto de documentos o guías de puesta en marcha, para ser utilizados como entradas por las etapas subsecuentes del método.

A. Especificación

Especificar un proyecto es la técnica de describir sin ambigüedades todos los objetivos que se desean alcanzar, y las restricciones que se asumen. Una buena especificación aumenta de forma significativa la probabilidad de éxito de un proyecto, pero es una de las tareas más difíciles a realizar.

En el caso de robots móviles, los ítems que cualquier especificación al menos debería describir son: Comportamiento básico; Dimensiones globales; Peso máximo incluyendo carga; Nivel de autonomía: a corriente, baterías, tiempo de autonomía; Tipo de locomoción: ruedas, oruga; Tipo y forma del terreno de trabajo; Velocidad y aceleración máximas requeridas; Nivel de interacción con el entorno; Escalabilidad: diseño cerrado o posibilidad de módulos adicionales; Reusabilidad: un diseño ad-hoc difícil de reproducir, o un robot basado en componentes fácilmente replicables; Coste económico máximo.

La primera premisa para realizar una especificación es disponer de un mercado, es decir, un grupo objetivo que nos emplee para construir un robot móvil. Primero se debe escribir una especificación informal de lo que se supone el robot podrá hacer, y de lo que no. Este documento refleja en su escrito las proyecciones completas del estudiante para su robot futuro. Inicialmente, sobre un redactado no demasiado específico, el profesor discute con el estudiante unos requisitos mínimos de especificación. El resultado final es una especificación formal:

“Se desea construir un robot móvil con ruedas que reconozca sonidos ruidosos repentinos y capaz de moverse

hacia la fuente de sonido. Además, el robot debe ser capaz de reproducir algunas frases grabadas de antemano como ‘No oigo nada’ o ‘¿Quién está ahí?’ La estructura del robot tiene que estar contenida en unas dimensiones máximas de 15x15x15 centímetros, y debe poder llevar una carga máxima de 1 kilogramo. Se desea que el robot trabaje con baterías recargables permitiendo una autonomía mínima de 1 hora antes de recargar. El robot debe funcionar solamente sobre superficies duras y relativamente limpias como las de un edificio público típico, con pendientes máximas de 10°. El robot debe poder evitar colisiones peligrosas con el entorno en la dirección de su avance. Tiene que estar construido con módulos estandarizados, siempre que sea posible, y debe costar entorno a €100...”

B. Revisión del estado del arte

De la primera versión de la especificación formal se extrae un conjunto de palabras claves que ayudarán a realizar una revisión exhaustiva del estado del arte. La meta principal en esta fase es encontrar y analizar diseños de robots reales cercanos a la especificación acordada. La búsqueda tiene que ser restringida a centros de investigación y empresas comerciales de prestigio, y las fuentes de información son principalmente Internet, catálogos de vendedores, actas de conferencias y revistas especializadas.

En el estadio final, se realiza un análisis del estado del arte centrándose en los robots más cercanos a la especificación. Se resumirán las desventajas principales encontradas, las debilidades estructurales, limitaciones de la autonomía, precios elevados. Estas desventajas conformarán la discusión principal de la argumentación del proyecto, que de hecho es un proyecto de ingeniería y por lo tanto, teóricamente, una mejora sobre la competencia. Por otra parte, también se debe de adjuntar información técnica que se considere relevante para ayudar en el diseño final.

Tras la revisión del estado del arte, se modifica la especificación formal añadiendo aquellos nuevos objetivos o restricciones que se han encontrado interesantes.

C. Elección de una arquitectura

La arquitectura base del robot móvil es el marco de trabajo sobre el que se encajan todos sus componentes para alcanzar el comportamiento previsto. En un sentido más técnico, es un arreglo específico entre los componentes de software y de hardware que controlan el robot.

Desafortunadamente, los sistemas robóticos son complejos y difíciles de controlar pues integran muchos sensores y actuadores de una manera no muy clara, y por lo tanto el diseño de arquitecturas robóticas convenientes es más bien un campo importante de investigación que un tema propio de un grado. A pesar de esto, existen tres arquitecturas muy populares entre constructores de robots y por lo tanto muy documentadas y convenientes para propósitos académicos [12]: la arquitectura Sensor-Planificar-Actuar (con una unidad central de proceso que recibe todas las entradas sensorias y genera todas las salidas de los actuadores), la arquitectura de

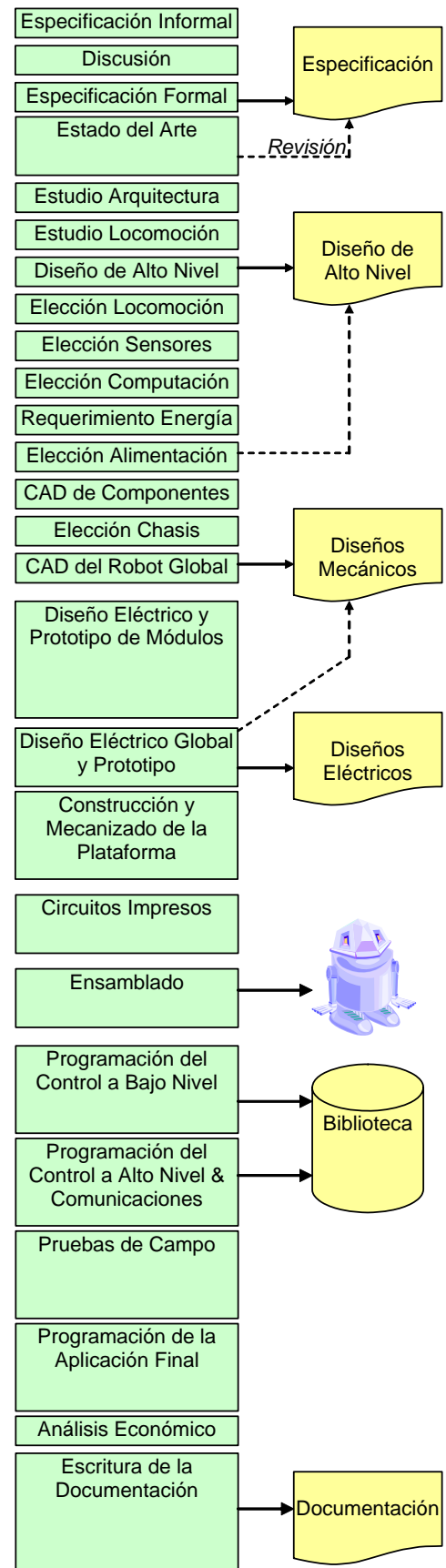


Fig. 2. Metodología de trabajo: la estructura modular del portafolio.

Subsumption [13] (una opción muy altamente reactiva sin procesador central alguno, y con un acople muy cercano entre los sensores y los actuadores), y la arquitectura de Tres-Capas (una mezcla entre las aproximaciones reactiva y deliberativa).

D. Elección de una configuración para locomoción

La configuración de la locomoción describe el tipo y la forma de los elementos de tracción, de la geometría del chasis, de los esquemas de actuación para conducir y dirigir, de la articulación y de la suspensión para los movimientos tridimensionales sobre el terreno [14]. Además, la configuración de la locomoción será determinante para la estabilidad (estática y dinámica) y la cinemática del robot. En esta fase los estudiantes aplican los conocimientos de mecánica para la ingeniería obtenidos en asignaturas de cuatrimestres precedentes, como por ejemplo ‘Sistemas mecánicos’ dentro del plan de estudios de la titulación de Ingeniería Técnica Industrial, especialidad en Electrónica Industrial.

Varios esquemas son posibles para la locomoción, pero la mayoría de ellos pertenecen al dominio de la investigación. Específicamente, dependiendo de la configuración elegida, algunas características de la cinemática serían muy difíciles o aún imposibles de calcular [15]. La configuración más conveniente en el caso general es la de dos ruedas motoras directrices fijas situadas diametralmente opuestas en paralelo, con hasta dos ruedas locas para propósitos de estabilidad. La conducción diferencial es el método más común para conseguir el cambio de dirección de estos robots.

E. Diseño de alto nivel para el robot completo

Este paso consiste en la identificación de todos los módulos que constituirán el robot completo, y de sus relaciones. Cada módulo tiene que ser una abstracción de una tarea específica a ser hecha, y las relaciones entre ellos son la abstracción del flujo de la información. El diseño de alto nivel es muy dependiente de la arquitectura elegida, y es así recomendable realizar un primer diseño aproximado justo después de seleccionar una arquitectura. Más adelante sobre la metodología, se terminará y refinará el diseño.

F. Selección de componentes

Ahora que se ha dividido el robot en módulos se puede iniciar una búsqueda exhaustiva de los componentes. Lejos de ofrecer un conjunto de componentes previamente seleccionado, el profesor debe inducir al estudiante a que visite a minoristas, telefonee distribuidores, etc. El estudiante aprende a leer e interpretar las hojas de datos técnicas, y a obrar en un aspecto importante del mundo de la ingeniería.

El primer elemento que se seleccionará y comprará son los motores porque son generalmente los elementos que consumen más energía en el robot y, por lo tanto, una vez elegidos determinan la energía máxima disponible para el resto de los componentes.

Se seleccionan después los sensores, incluyendo: sensores para alcanzar el comportamiento especificado (según la

aplicación en uso); sensores para alcanzar una navegación estándar (codificadores) y de seguridad (detectores de proximidad); y sensores propioceptivos (detección del nivel batería, y quizás un sensor de corte de corriente).

Comenzando por el diseño de alto nivel, se pueden identificar todos los elementos de programación necesarios. Una buena práctica es no sobredimensionar las unidades de procesado para reducir al mínimo el consumo, y simplificar la programación. Una arquitectura más reactiva tiende a requerir varios microprocesadores de baja potencia, mientras que una más deliberativa necesita a menudo un microprocesador de consumo medio. En ambos casos, una cuestión crítica es la comunicación entre las unidades de procesado.

G. Cálculo de los requerimientos de energía

El consumo de energía total es la suma de todos los consumos de los componentes principales elegidos. Una práctica útil es proporcionar dos fuentes de energía separadas, una para alimentar los motores y otra para accionar la lógica de programa. Esta opción es fundamental si se sospecha que los motores añadirán mucho ruido electromagnético a su fuente de alimentación. Otra alternativa es utilizar una sola fuente de energía y generar diversos voltajes por medio de un convertidor DC-DC y filtrado.

El consumo real de energía más la especificación del nivel de autonomía guiará la búsqueda de una fuente de energía conveniente. A menudo, las características de la fuente seleccionada implicarán una revisión del diseño de alto nivel.

H. Dibujo asistido por ordenador, CAD

Una vez que se han elegido todos los componentes principales, deben ser medidos y dibujados mediante un software de CAD (mejor en formato 3D). En nuestros cursos se utiliza el clásico Autocad y se diseñan prototipos mediante Unigraphics. Cada elemento (baterías, motores, sensores, etc.) debe ser tratado en este paso como un componente aislado.

Los requerimientos mínimos que se deben lograr son: Acomodo robusto de todos los elementos principales; Acceso fácil a las zonas de mantenimiento, como el espacio de las baterías, los conectores de expansión, etc; Situación apropiada de los sensores de acuerdo a sus características funcionales; Garantizar la estabilidad del robot situando su centro de gravedad en un lugar adecuado.

Un esquema de la forma del robot puede ayudar en la determinación de las características de su centro de gravedad y de estabilidad. Tras ello, se debe dibujar el CAD del ensamblado de todos los componentes diseñados previamente en su forma definitiva. Así se llega a la forma provisional del robot (muy explícita si utilizamos un modelado 3D con capacidad de renderizado).

I. Diseño eléctrico y prototipaje

En esta etapa será beneficiosa la técnica divide-y-vencerás ya que se tienen que diseñar e implementar por separado los módulos de hardware identificados durante el diseño de alto nivel. El prototipo de cada módulo debe ser probado de forma exhaustiva, y sus entradas emuladas por medio de

instrumentación electrónica. Al menos, es de esperar el diseño de: Alimentación a los motores de dirección; Interfase de los sensores; Gestión de la alimentación; Rutinas de control de bajo nivel sobre el microprocesador para dirigir los motores; Rutinas de servicio de interrupciones para el micro; Rutinas de comunicación en el micro.

Una vez que cada módulo es operativo, es hora de conectarlos todos juntos. Esto significa que se implementarán y probarán todas las comunicaciones entre los módulos. Debe realizarse un diseño eléctrico del robot entero, incluyendo ranuras de extensión y puertos de comunicación, y es posible que se necesite una revisión del CAD del robot completo.

J. Construcción de la plataforma completa

Asumiendo que el CAD del robot completo es correcto, el estudiante puede pasar a esta etapa con una pequeña ayuda del profesor. Se debe construir una plataforma física totalmente mecanizada a partir del CAD (la conclusión de un trabajo mecánico bien hecho), todos los módulos electrónicos tienen que ser implementados como circuitos impresos, y las conexiones entre ellos también. Una vez que se termine de montar y todos los componentes estén fijados y conectados correctamente, se dispondrá del robot completo en su forma definitiva.

K. Programación del control de bajo nivel

Sea cual fuere la arquitectura elegida, existirá por lo menos un actuador y un sensor, y cualquiera de ellos necesitará ser gestionado por elementos de cómputo. Se necesitará programación de bajo nivel para poder trabajar muy cerca del hardware. Típicamente, por lo menos el estudiante ha de programar un PWM para los motores (practicando así un campo muy orientado al mundo industrial), y la gestión de datos del sensor. Este paso es un ejercicio interesante de la programación de bajo nivel, donde se forzará al estudiante a trabajar probablemente con lenguajes tipo ensamblador, y deberá construir una biblioteca de control de bajo nivel.

L. Control de alto nivel y comunicaciones

Para completar la gestión de todos los dispositivos de la plataforma, y para asegurar características básicas de navegación, debe ser programado y agregado a la biblioteca del software un conjunto de rutinas de medio-a-alto nivel. Típicamente, habrá rutinas de control de velocidad y posición, y algún tipo de gestión del sensor más complejo que los de bajo nivel (como por ejemplo el uso de cámaras fotográficas para la visión por ordenador). Además, debe ser ejecutada y testada la comunicación entre los módulos hardware y también deben ser seleccionados los protocolos de transmisión de datos adecuados para el buen funcionamiento del robot.

M. Prueba

Deben programarse varias aplicaciones de prueba exhaustivas, incluyendo el uso de la biblioteca de software construida en etapas anteriores, y el acople y la comunicación de los módulos deben ser comprobados. Como resultado, se deberán obtener las características técnicas finales del robot.

N. Programación de la aplicación final

Ahora que han sido probados todos los componentes de hardware y de software, y se conocen las características del robot, es hora de lograr satisfacer todas las especificaciones definidas. El estudiante tiene que ocuparse de las aplicaciones en la programación de alto nivel, realizando un diseño y una puesta en marcha del software final que dé al robot su comportamiento previsto.

O. Análisis económico

Debido al acercamiento ingenieril realista de este trabajo, se hace esencial un estudio de mercado. Esto implica calcular el coste del desarrollo del primer prototipo del robot, y estimar el precio que una implementación comercial tendría. Además, es muy interesante realizar una prospección de clientes potenciales, y desarrollar una estrategia de venta basada en el estudio de la competencia, en una etapa avanzada.

P. Redactado de la Documentación

Éste será el último esfuerzo para concluir la construcción de un robot móvil. A pesar de la gran cantidad de trabajo requerida, la mayoría de la información ya se ha recogido: se ha escrito una especificación formal, se ha elaborado un estado del arte, y también los dibujos y los cálculos. Todo lo que resta es combinarlo en una manera clara, recopilando todo el trabajo anterior en un texto conciso y significativo. Por lo menos deben ser escritos tres documentos: la memoria del proyecto, un manual de usuario y un manual técnico.

IV. EXPERIENCIAS

El primer banco de pruebas de la experiencia propuesta de usar un portafolio en educación basada en proyectos fue sobre proyectos final de carrera en Ingeniería Técnica Industrial, especialidad en Electrónica Industrial, porque los estudiantes ya tienen un bagaje amplio de ingeniería y se espera que estén motivados para obtener su titulación. Por lo tanto, cuatro educadores en tres Escuelas diferentes, con sedes en Manresa (asignatura 'Mecatrónica'), Vilanova i la Geltrú (asignatura 'Robótica móvil') y Terrassa ('Tecnología de sistemas de control'), de la Universidad Politécnica de Catalunya han iniciado un conjunto de proyectos modulares sobre la construcción de robots móviles para evaluar la motivación generada en los estudiantes con esta herramienta didáctica. La meta es crear una línea conductora de trabajo que pueda satisfacer la curiosidad de los alumnos y que los integre en un grupo dinámico: su esfuerzo se basa en los trabajos de ex-estudiantes y el éxito de los proyectos futuros depende de su grado de precisión en realizar la documentación sobre objetivos alcanzados.

El comportamiento motivacional de la línea educacional propuesta fue comprobado durante cuatro semestres académicos, desde 2000/2001 a 2002/2003. Una vez verificada esta hipótesis motivacional, se iniciaron varias experiencias por separado, comenzando en el período académico 2002/2003 hasta la fecha, que han servido como ejercicio para probar la validez de los proyectos de robótica

móvil basados en portafolio como una herramienta vehicular en el proceso de aprendizaje de un espectro de estudiantes más amplio. Estas experiencias incluyen, (i) mini-proyectos breves; (ii) mini-proyectos durante un curso; (iii) proyectos finales de carrera; (iv) actividades del profesorado.

A. *Mini-proyectos breves*

Consisten en trabajos específicos de tiempo limitado dentro de la asignatura de 'Robótica Móvil' con un peso en la evaluación final cercano al 40%. Esta asignatura de 3 créditos LRU (2 h/semana, 15 semanas lectivas) se imparte de forma cuatrimestral. La meta perseguida es acentuar qué conocimiento adquirido permite a un estudiante de electrónica acercarse al campo de la robótica móvil y cuáles son las limitaciones. Estos trabajos han confirmado el alto grado de interés de los estudiantes, su poca preparación para el diseño mecánico y la necesidad de aumentar sus habilidades de trabajo en equipo. Se realizaron trabajos con robots basados en microprocesadores PIC16F84 y con robots educaciones LEGO Mindstorms.

B. *Mini-proyectos durante un curso*

Una vez obtenidos resultados positivos con los primeros mini-proyectos breves, se consideró formalizar de forma definitiva esta dinámica y desarrollar un curso entero que siguiera la herramienta didáctica del portafolio. Como experiencia concreta, el procedimiento educativo ha sido aplicado en la asignatura opcional de 'Laboratorio de Sistemas de Control' para los estudiantes de ingeniería técnica industrial, especialización en electrónica industrial, de la Universidad Politécnica de Catalunya en la sede de Vilanova i la Geltrú (EPSEVG). Esta asignatura de 3 créditos LRU se imparte de forma cuatrimestral. Los estudiantes disponen ya de un bagaje técnico importante en esta etapa que les posibilita para la realización de proyectos a escala pequeña. Inicialmente, el profesor expone los objetivos y pautas a seguir durante el curso, los estudiantes, en grupos de 3 personas, analizan los portafolios de módulos disponibles, eligen el contenido principal de sus proyectos y firman un acuerdo. Los proyectos se exponen al acabar el curso en una sesión oral pública con herramientas multimedia, y los estudiantes entregan el portafolio original, mencionando el material agregado y los informes técnicos anteriores actualizados. Sobre el formato del portafolio, se prefirió la realización de CDs o webs con informes en formato electrónico. A destacar en este sentido que los estudiantes valoran positivamente la evaluación de sus trabajos en el marco de la exposición oral y debate, ya que observan el trabajo efectuado por el resto de grupos y reciben críticas constructivas por parte de compañeros y profesores docentes de otras materias.

A continuación se expone una lista a modo de ejemplos ilustrativos de algunos de los trabajos diversos elaborados hasta el momento: Diseño de la mecánica de un robot móvil cumpliendo con ciertas especificaciones; Ensamblado de robots comerciales y su mejora para tareas específicas;

Desarrollo de un entrenador para microcontroladores; Contenidos multimedia de Robótica Móvil e Industrial [16].

La lista de experiencias se ha ido ampliando a lo largo de los años. En el marco del "buzón del profesor" de la asignatura 'Automatización Industrial' de ingeniería técnica industrial, especialidad electrónica industrial, se ha llevado a cabo la valoración de un total de 64 mini proyectos de diversos ámbitos de aplicación. La valoración pública actualizada en un enlace URL de la Universidad, no se analiza en profundidad por motivos de limitación de espacio [17].

Se ha comprobado que la dedicación a los proyectos excede en muchas ocasiones el tiempo inicial del acuerdo debido a que la acertada motivación del curso favorece que los estudiantes adquieran capacidades que de ser introducidas de otro modo podrían resultar no tan interesantes o hubieran podido ser consideradas distantes a su objeto de estudio, la electrónica industrial. En este sentido se ha optado por reducir el número de horas de impartición de conocimientos por parte del profesor, e incrementar las tareas de aprendizaje cooperativo por parte de los grupos de estudiantes en sesiones prácticas. Se pretende también ajustar el número de horas que el estudiante debe invertir fuera de las horas de clase y prácticas en el centro. Sin duda sería beneficioso aplicar el aprendizaje basado en proyectos sobre portafolios en asignaturas de 6 créditos LRU ya que sería una propuesta mucho más realista de la dedicación de tiempo que el estudiante debe aportar.

La evaluación se realiza en dos sentidos, una evaluación de equipo y una del esfuerzo individual, por medio de criterios cualitativos. Los estudiantes observan que la evaluación es continuada, la pueden comparar durante el curso con aquella que ellos considerarían adecuada y con la del trabajo del resto de grupos. El trabajo colectivo refuerza así los resultados de forma positiva y no se ha producido ningún tipo de crítica al sistema acordado de evaluación individual. En este sentido se ofrece *realimentación* de forma que el grupo o el estudiante en concreto puedan analizar qué pasos deben realizar para mejorar el rendimiento propio y el del grupo. A nivel de evaluación se considera la forma de presentar el trabajo, la originalidad del proyecto, la dificultad técnica, la capacidad de síntesis de los objetivos y propuestas, y la capacidad de resolver los problemas que pudieran bloquear la buena ejecución y finalización con éxito del proyecto. Un ejemplo numérico de la evaluación sería:

- forma (objetivos, planificación, calidad memoria): 10%
- contenido (dificultad técnica, solución problemas): 30%
- opinión (debate con profesor, mejora borradores): 10%
- producto (calidad producto final tras proceso): 25%
- defensa pública oral del proyecto: 25%

Las sesiones orales públicas se han demostrado también como un hecho positivo, pues se muestra la necesidad al futuro ingeniero de argumentar y defender de forma pública el proyecto realizado. Al tribunal se ha invitado a exalumnos del centro, a la responsable de biblioteca, al Director del centro.

C. Proyectos Finales de Carrera

Usados como experimentación inicial de la herramienta motivadora, un proyecto muy ilustrativo desarrollado sobre tres proyectos finales de carrera es el del 'Control del estado de carga de la batería de un microbot', que enfatizó sobre la mejora del diseño de un robot móvil creado por un diseñador previo (concepto de modularidad), realizó un estudio en profundidad del uso de baterías en robótica móvil (estado del arte) y diseñó un paquete para usuarios de estudio de la vida útil de las baterías (mejora del portafolio). Desde el período 1998 hasta la actualidad, el número de proyectos del centro EPSEVG en el área de la robótica y la automatización se ha incrementado notablemente hasta el punto de ser merecedores de premios en la convocatoria de mejor proyecto final de carrera del centro EPSEVG en las ediciones de 2004 y 2005.

D. Actividades del Profesorado

Los profesores implicados en el proyecto llevaron a cabo actividades en paralelo con objeto de seguir y mejorar el desarrollo educacional del proyecto. En particular, el éxito de la experiencia motivó encuentros entre diferentes departamentos de ingeniería (Mecánica, Automática, Electricidad y Electrónica) en las Escuelas para extender la metodología a otros cursos ('Mecatrónica') y crear un curso interdisciplinario específico sobre 'Robótica Móvil'. En la actualidad se trabaja en un proyecto de Mejora de la Calidad Docente en el área de introducción de metodologías activas en la ingeniería que ha culminado recientemente con la creación de las primeras jornadas de docencia del centro EPSEVG [18].

V. CONCLUSIONES

La construcción de un robot móvil de complejidad baja-media gestionado por medio de un portafolio es una forma excelente de integrar el conocimiento adquirido por los estudiantes de grado en diversas asignaturas no conectadas entre ellas de un currículum de ingeniería estándar. Además, es un trabajo muy adecuado para completar los conocimientos académicos más teóricos con un conjunto de apuntes industriales.

Se ha presentado una metodología basada en el sistema del portafolio que constituye una combinación equilibrada de imaginación, artesanía y metodología, persiguiendo conseguir unos resultados óptimos en la consecución de objetivos teniendo en consideración los recursos y tiempo limitados propios de la Universidad

AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran dedicar este trabajo a la memoria del profesor Carles Torrens, por su dedicación a este proyecto educacional y su conocimiento experto.

Este trabajo ha sido parcialmente realizado con el apoyo del proyecto ADA (DPI2006-15630-C02-01) del Ministerio de Educación y Ciencia de España.

REFERENCIAS

- [1] A. Ollero, *Robótica. Manipuladores y robots móviles*, Editorial Marcombo, 2001.
- [2] D. F. Kjersdam, S. Enemark, *The Aalborg Experiment, Project Innovation in University Education*. Aalborg University Press, 1994.
- [3] *Student Portfolios: Classroom Uses*. Office of Education Research Consumer Guide, Nº 9, 1993.
- [4] V. Klenowski, *Desarrollo de portafolios para el aprendizaje y la evaluación*, Nancea, S.A. de Ediciones, 2005.
- [5] C. Poyatos, "La evaluación alternativa de los aprendizajes", Primeras Jornadas de Docencia EPSEVG, Vilanova i la Geltrú, España, 2006.
- [6] *Jornada d'Innovació Docent a la UAB*. Bellaterra, España, 2005
- [7] A. Font et al., "L'ús del portafoli electrònic en entorns semipresencials i d'aprenentatge per problemes (Projecte CarpeTiki)", 4t Congrés Int. de Docència Universitària i Innovació, Barcelona, España, 2006.
- [8] J. Santos, R.J. Duro, "Evolución artificial y robótica autónoma". Editorial Ra-Ma, 2005.
- [9] R. R. Murphy, *Introduction to AI Robotics*. The MIT Press, 2000.
- [10] P. Ponsa, A. Català. "Actividades docentes en mecatrónica", en XXII Jornadas de Automática, Bellaterra, España, 2001.
- [11] C. Torrens, "Building a Mobile Robot as an Excellent Graduating Exercise", Workshop on Robotics Education and Training, Weingarten, Alemania, 2001.
- [12] D. Kortenkamp et al. (ed), *Artificial Intelligence and Mobile Robots*, AAAI Press/The MIT Press, 1998.
- [13] R. A. Brooks, "A Robust Layered Control System For A Mobile Robot", IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. 2(1), 1986.
- [14] D. Apostopoulos, "Systematic Configuration of Robotic Locomotion". Carnegie Mellon Univ. Tech. Rep. CMU-RI-TR-96-30, 1996.
- [15] P. F. Muir, C. P. Neuman, "Kinematic Modeling of Wheeled Mobile Robots", Carnegie Mellon Univ. Tech. Rep. CMU-RI-TR-86-12, 1986.
- [16] P. Ponsa, J. Aranda, "Creación de un aplicativo multimedia en robótica" XXIII Jornadas de Automática, Univ. La Laguna, España, 2002.
- [17] P. Ponsa, "Aplicación de la metodología PBL a materias de la titulación de Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Electrónica Industrial, en "El buzón del profesor" de la Biblioteca de la UPC, 2005.
- [18] J.A. Roman, P. Ponsa, "Primeras Jornadas de Docencia de EPSEVG", Vilanova i la Geltrú, España, 2006.



Cecilio Angulo. Barcelona, España, 1969. Recibió la Licenciatura en Matemáticas en 1993 por la Universidad de Barcelona y el título de Doctor en Ciencias por la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC) en 2001. El objeto de su investigación es el aprendizaje estadístico con aplicaciones en sistemas de control. Es profesor lector en el Depto. de Ingeniería de Sistemas, Automática e Informática Industrial de la UPC.



Pere Ponsa. Barcelona, España, 1966. Recibió la Licenciatura en Ciencias Físicas en 1994 por la Universidad Autónoma de Barcelona y el título de Doctor por la Universidad Politécnica de Catalunya en 2003. Es profesor colaborador en el Depto. de Ingeniería de Sistemas, Automática e Informática Industrial de la UPC. Su investigación está dirigida al razonamiento cualitativo con aplicaciones en control de sistemas.



Cristóbal Raya. Vilanova i la Geltrú, España, 1972. Recibió el título de Ingeniería en Electrónica en 1999 por la Universidad Politécnica de Catalunya. En la actualidad es doctorando de la UPC. Es profesor colaborador en el Depto. de Ingeniería de Sistemas, Automática e Informática Industrial de la UPC. El objeto de su investigación son los elementos electrónicos con aplicación en computación ubicua y ambientes inteligentes.