

Experiencias en el aprendizaje basado en proyectos del diseño de sistemas empotrados

Julio Pastor Mendoza, José Manuel Villadangos Carrizo, Francisco Javier Rodríguez Sánchez

Departamento de Electrónica
Universidad de Alcalá (UAH)
Alcalá de Henares (Madrid) - España
julio.pastor@uah.es

Abstract— En el artículo se presentan los contenidos, la metodología docente y de evaluación de una asignatura obligatoria orientada al diseño de sistemas empotrados de tiempo real basados en microcontrolador impartida en los últimos cursos de los grados del área de Ingeniería de Telecomunicación. La metodología utilizada se basa en el aprendizaje basado en proyectos y la evaluación está basada en competencias. El artículo se completa con una reflexión sobre el funcionamiento de la asignatura.

Keywords— Microcontrolador, aprendizaje basado en proyectos, sistemas empotrados

I. INTRODUCCIÓN

En los actuales grados de ingeniería del Espacio Europeo de Educación Superior es necesario acreditar, no sólo que los estudiantes tienen unos conocimientos determinados, sino que son capaces, además, de aplicarlos en la realización de proyectos de ingeniería.

Esto es especialmente importante si se desea obtener el sello de calidad EUR-ACE® que se creó en el año 2000 con el apoyo inicial de la Comisión Europea y que desde 2006 se gestiona desde la European Network for the Accreditation of Engineering Education (ENAE) de manera descentralizada a través de agencias nacionales [1]. Para obtener este sello, además de demostrar que el grado corresponde con determinados estándares de calidad, es de especial importancia que se alcancen determinados resultados de aprendizaje, especialmente aquellos relacionados con “Proyectos de Ingeniería” y con la “Aplicación práctica en Ingeniería”.

Para ayudar a desarrollar estos resultados de aprendizaje, se planifica la asignatura de Sistemas Electrónicos Digitales Avanzados impartida en los grados del área de Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad de Alcalá, con una componente fundamental centrada en la realización de un proyecto de complejidad media.

II. CONTEXTO DE LA ASIGNATURA

La asignatura de Sistemas Electrónicos Digitales Avanzados [2] se imparte en tercer curso del Grado en Ingeniería en Electrónica de Comunicaciones y en cuarto curso del Grado en Ingeniería en Tecnologías de la Telecomunicación, en ambos estudios con carácter obligatorio [3]. También se oferta como optativa en cuarto curso del Grado en Ingeniería Telemática y en el Grado en Sistemas de Telecomunicación. Se desarrolla a lo

largo de 15 semanas, con un total de 60 horas lectivas, la mitad dedicadas a la parte teórica y el resto al desarrollo del proyecto, que los alumnos deberán completar con una dedicación añadida de 90 horas de trabajo personal.

Es la continuación de una asignatura común a todos estos grados llamada Sistemas Electrónicos Digitales donde se estudian los conceptos básicos de los sistemas basados en microprocesador y se introduce el microcontrolador LPC1768 y sus herramientas de desarrollo, que luego se utilizarán en la asignatura posterior.

Los alumnos cuando se enfrentan a la asignatura tienen conocimientos de programación en C, electrónica analógica y digital, subsistemas electrónicos y diseño de sistemas electrónicos con FPGAs.

III. RESULTADOS DE APRENDIZAJE

Según el último plan de estudios verificado, cuando un alumno supera la asignatura de Sistemas Electrónicos Digitales Avanzados debe ser capaz de:

- RA1: Describir las diferentes tecnologías que se pueden integrar en el diseño de un sistema electrónico digital diseñado para una aplicación específica entre los que están los microcontroladores, DSP's y SoCs.
- RA2: Utilizar en el diseño de aplicaciones de complejidad media, los periféricos integrados en un microcontrolador como son los convertidores A/D y D/A, temporizadores, dispositivos de comunicación, etc. interactuando con periféricos externos (memorias, micrófonos y altavoces, sensores y actuadores, ...) desde el punto de vista hardware y software.
- RA3: Utilizar adecuadamente algunas de las técnicas más comunes en el diseño de sistemas empotrados de complejidad media (modelado de comportamiento utilizando máquinas de estados y “StateChart”, planificación de tareas y análisis de ejecutabilidad, uso de un sistema operativo de tiempo real, ...)
- RA4: Diseñar íntegramente un sistema empotrado de complejidad media desde el punto de vista Hardware y Software incluyendo la documentación técnica correspondiente.

- RA5: Utilizar adecuadamente manuales, hojas de características, especificaciones y normativas relacionadas con dispositivos electrónicos utilizados en el diseño de sistemas empotrados.

Los tres primeros resultados de aprendizaje están más relacionados con el conocimiento teórico-práctico de los contenidos de la asignatura, el cuarto está orientado a la realización de un proyecto de complejidad media y el quinto tiene un carácter transversal ya que se desarrolla tanto en la parte teórica como práctica.

IV. EL CONTENIDO PRÁCTICO DE LA ASIGNATURA

La asignatura está diseñada de tal forma que el eje central de la misma sea la realización de un proyecto de complejidad media basado en el diseño de un sistema empotrado basado en microcontrolador. Al principio de la asignatura se presentan a los alumnos las especificaciones del proyecto que deben desarrollar y se insiste en que los contenidos teóricos explicados en las clases de teoría tiene una inmediata aplicación en el proyecto.

El microcontrolador estudiado es el LPC1768 de NXP [4] con una CPU Cortex-M3 de ARM. Como herramientas de desarrollo se utiliza la versión profesional del entorno KEIL [5].

A continuación se muestran algunos de los proyectos que se han realizado en los últimos años:

A. Sistema de seguimiento de un objeto guiado por visión

El proyecto consiste en el diseño de un sistema de seguimiento de un objeto guiado por visión con posibilidad de comunicación remota por TCP/IP y con acceso local mediante un TFT gráfico con pantalla táctil. En la Figura 1. se muestra un esquema general del sistema. Como sensor de imagen se utiliza el OV7670 y dos servomotores para mover la cámara.

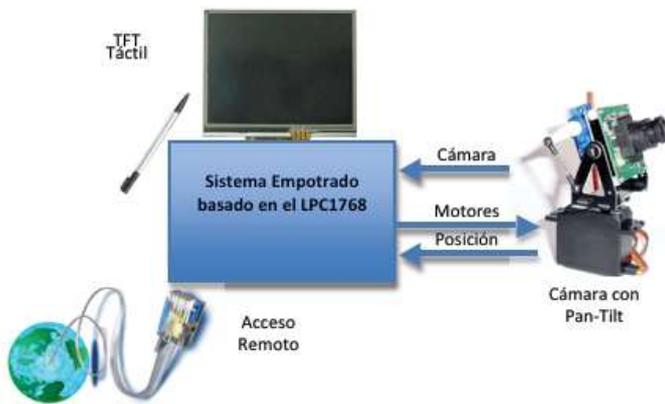


Figura 1. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO DE UN OBJETO POR VISIÓN

B. Osciloscopio, analizador lógico y voltímetro acústico con conexión a Internet

Se propone diseñar un sistema empotrado basado en el microcontrolador LPC1768 (Cortex-M3) con objeto de implementar un osciloscopio, analizador lógico de 4 canales y voltímetro digital acústico, con capacidad de ser controlado de

forma remota desde un ordenador mediante una interfaz serie asíncrona, y desde un entorno WEB. El diagrama de bloques del sistema se representa en la Figura 2.

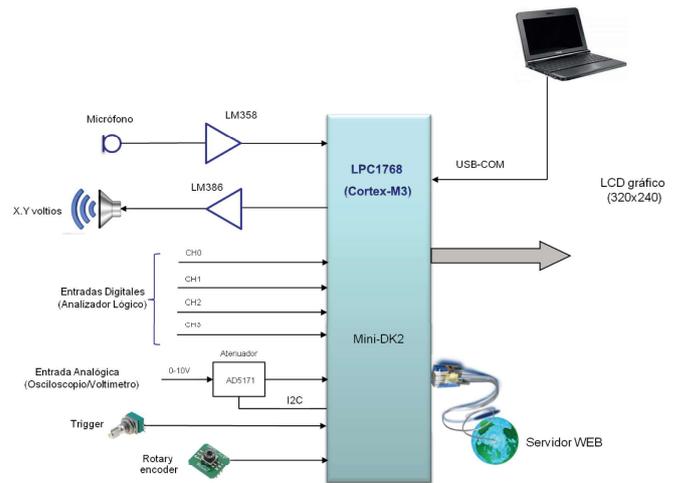


Figura 2. DIGRAMA DE BLOQUES DEL OSCILOSCOPIO, ANALIZADOR LÓGICO Y VOLTÍMETRO ACÚSTICO CON CONEXIÓN A INTERNET

C. Sistema de detección de obstáculos por ultrasonidos

Se propone diseñar un sistema empotrado capaz de detectar la aproximación de objetos basado en el microcontrolador LPC1768 (Cortex-M3). Para ello el sistema contará con un motor que hará girar un sensor de distancia por ultrasonidos que podrá ser controlado mediante una página web, una conexión Bluetooth, o un mando a distancia de infrarrojos. Con el fin de tener una mejor precisión en la medida, el sistema dispondrá de un sensor de temperatura y humedad cuyas magnitudes se tendrán en cuenta en el cálculo de la distancia. El diagrama de bloques del sistema se representa en la Figura 3.

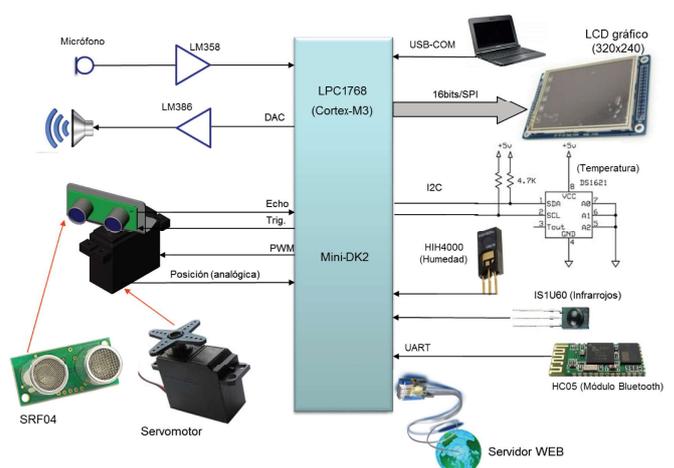


Figura 3. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS POR ULTRASONIDOS

D. Diseño de un robot espía con tracción diferencial

Se propone diseñar un sistema empotrado basado en el microcontrolador LPC1768 (Cortex-M3) con objeto de implementar un robot espía con tracción diferencial capaz de ser telecontrolado y de realizar recorridos previamente establecidos hasta alcanzar una posición, para iniciar una grabación de audio y una posterior reproducción. Para ello, se partirá de una plataforma robótica que incluye dos motores de corriente continua que proporcionarán la tracción a las dos ruedas delanteras, además de una tercera rueda que da la estabilidad al sistema. Cada rueda dispondrá de un encoder óptico que será utilizado para la medida de la velocidad y la distancia recorrida. El movimiento a realizar por el robot será cargado de forma inalámbrica desde un Smartphone o un ordenador mediante una conexión Bluetooth. El robot dispondrá además de un sensor de distancia para la detección de obstáculos, un sistema de alarma o aviso acústico, y una tarjeta microSD como sistema de almacenamiento de audio. El diagrama de bloques del sistema se representa en la Figura 4.

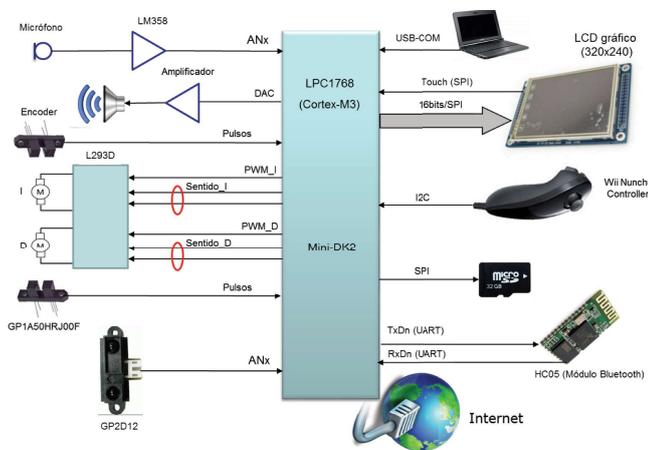


Figura 4. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL DISEÑO DE UN ROBOT ESPÍA CON TRACCIÓN DIFERENCIA

V. EL CONTENIDO TEÓRICO DE LA ASIGNATURA

Para poder realizar el proyecto, los alumnos tienen que tener unos conocimientos teóricos que se intentan impartir lo antes posible. Las dos primeras semanas los alumnos tienen 4 horas de clase semanales sólo de teoría y durante 10 semanas tienen 3 horas de teoría y 2 de laboratorio.

Los contenidos teóricos están divididos en cuatro bloques de contenidos, que no se desarrollan secuencialmente en la temporización de la asignatura. El primer bloque de contenido se desarrolla al principio como introducción a los sistemas empotrados y al final como resumen de todo lo visto e introducción a tecnologías más avanzadas.

El segundo y tercer bloques de contenidos, dedicados a la explicación de la utilización de los diferentes elementos internos y externos disponibles en sistemas empotrados basados en microcontrolador, se imparten a la vez que el bloque cuarto de diseño de sistemas empotrados dedicando aproximadamente dos horas semanales a los primeros y una hora semanal al segundo.

Esto permite que los alumnos vayan teniendo poco a poco todas las herramientas necesarias para ir desarrollando el proyecto.

Los bloques de contenidos son los siguientes:

I - Introducción al diseño de Sistemas Empotrados (SSEE). 4 horas.

Características de los SSEE. Tendencias en el diseño de SSEE: DSP's, SoCs. Codiseño Hw-Sw.

II - Periféricos comunes en Sistemas Empotrados. 15 horas.

Puertos de comunicación serie: SPI, I2C, UART. Conversión A/D, D/A. Temporizadores: PWM, captura y generación de señales. Comunicación Ethernet. Acceso directo a memoria. Dispositivos de representación (LCD, TFT)

III - Memorias de Semiconductor. 6 horas

FIFO. Dual Port. Síncronas. Dinámicas.

VI - Diseño software de Sistemas Empotrados. 7 horas.

Planificación de tareas para SSEE. Máquinas de estado finitas. Statechart. Sistemas operativos en tiempo real para SSEE.

VI. METODOLOGÍA DOCENTE

En la asignatura se considera que se utiliza una metodología de aprendizaje basada en proyectos debido a que los alumnos deben dedicar gran parte de su tiempo a la realización de un proyecto. El proyecto tiene la suficiente complejidad para que no se pueda realizar si los alumnos no tienen asimilados los diferentes conceptos teóricos explicados en las clases de teoría.

Con el fin de potenciar la capacidad de planificación de los alumnos y el trabajo autónomo, el trabajo del laboratorio sólo tiene un objetivo: realizar el proyecto de manera que cumpla con las especificaciones. No hay una secuencia de prácticas que el alumno deba hacer para poco a poco ir construyendo el proyecto sino que cada grupo de alumnos es libre de desarrollar el proyecto como considere conveniente.

El reducido número de alumnos por grupo de prácticas (máximo de 20 alumnos organizados en grupos de 2), permite a los profesores realizar un seguimiento semanal de la evolución de los alumnos, teniendo una función de guía y apoyo al trabajo realizado por los alumnos.

Todos los estudiantes del curso tienen el mismo proyecto con las mismas especificaciones aunque se les deja cierta libertad para que personalicen el proyecto como crean conveniente. Esto tiene un doble objetivo, por un lado se fomenta la creatividad de los estudiantes al tener que tomar decisiones sobre la implementación final del proyecto, y por otro lado disminuye la posibilidad de copias entre los diferentes grupos y facilita su detección en caso de producirse.

Por otro lado, en las clases de teoría se presentan los conceptos teóricos necesarios para realizar el proyecto, acompañados de diversos ejemplos de aplicación. Se propone a los estudiantes que descarguen los ejemplos, que los simulen, los entiendan y realicen algunas modificaciones propuestas para

comprobar que realmente entienden el funcionamiento de los diferentes subsistemas.

VII. EVALUACIÓN

A. *Condicionantes externos*

En la Normativa Reguladora de los Procesos de Evaluación de los Aprendizajes de los Estudios de Grado de la Universidad de Alcalá [6], se indica que “todo el proceso de evaluación estará inspirado en la evaluación continua del estudiante”, entendiéndose por evaluación continua “como una herramienta de corresponsabilidad educativa y como elemento del proceso de enseñanza-aprendizaje que informa al estudiante sobre el progreso de su aprendizaje”. Por otro lado se indica que “El proceso de evaluación continua utiliza diferentes estrategias y recoge evidencias que guardan relación con todo el proceso de enseñanza-aprendizaje durante la impartición de la asignatura. Ello no obsta a que se puedan recoger evidencias de una prueba final: examen, trabajo o proyecto. En ningún caso esta prueba final podrá tener, en el conjunto de la calificación, una ponderación superior al cuarenta por ciento.”

En relación con las prácticas realizadas en las asignaturas, la normativa establece que “excepcionalmente, en las asignaturas cuya guía docente expresa y motivadamente así lo establezca, la superación de las prácticas obligatorias presenciales podrá ser considerada elemento imprescindible de la evaluación, tanto en la convocatoria ordinaria como en la extraordinaria.”

Es decir, que ninguna prueba puede condicionar más del 40% de la calificación de la asignatura y que si se justifica, la superación de las prácticas puede condicionar el aprobado de la asignatura.

B. *Discusión sobre la Evaluación Continua*

La evaluación continua entendida como un conjunto de exámenes parciales con los que se va acumulando nota a la evaluación final (evaluación sumativa) puede dar lugar a disfunciones en la evaluación que hagan que un alumno apruebe sin haber alcanzado realmente los resultados de aprendizaje. Esto es especialmente crítico en asignaturas que tienen un claro enfoque a diseño donde es importante, además de saber aplicar cada una de las técnicas, saber analizar un problema y escoger las técnicas más adecuadas.

Es común en otras asignaturas, que alumnos que sacan buena calificación en los primeros parciales, dejen de estudiar la asignatura al final, al tener el aprobado casi seguro, dedicando esfuerzos a otras asignaturas. En estos casos los alumnos aprueban pero muchas veces no son realmente competentes al tener grandes deficiencias en la integración de conocimiento de toda la asignatura.

Esto suele solucionarse con la existencia de un examen final en el que es necesario obtener un mínimo de nota para aprobar la asignatura. Sin embargo, en nuestro caso, según la Normativa de Evaluación de los Aprendizajes vigente de la Universidad de Alcalá, ninguna prueba puede comprometer por sí misma más del 40% de la calificación de la asignatura, es decir, que no se pueden poner mínimos en un examen final ya que esta prueba condicionaría la calificación de toda la asignatura.

Otro riesgo de la evaluación continua son los “minipuntos”. Es el creer que se debe valorar todo el trabajo que realiza el alumno en actividades, prácticas, entregas, exámenes, tests, perdiendo de vista que la función del profesor no es poner una calificación a un examen o a una práctica y luego sumarlo, sino que es el valorar el nivel de competencia que tienen los alumnos al demostrar la adquisición de los resultados de aprendizaje de la asignatura y que este nivel de competencia debe realizarse al final de la misma. Suele confundirse el concepto de evaluación continua con el de calificación continua.

Pueden realizarse varias actividades de evaluación a lo largo del curso que son tenidas en cuenta por los profesores a la hora de poner la calificación de la asignatura pero no necesariamente tiene por qué tener cada una un valor determinado.

C. *Evaluación de contenidos teóricos de la asignatura*

En la asignatura se identifican cinco resultados de aprendizaje ya expuestos anteriormente que se concretan en doce criterios de evaluación. En la siguiente tabla se muestra la relación entre los criterios de evaluación y los resultados de aprendizaje. Existe un quinto resultado de aprendizaje que es transversal al resto como ya se comentó.

Para superar la asignatura el alumno debe demostrar haber adquirido los resultados de aprendizaje superando un determinado nivel de desempeño en cada uno de los criterios de evaluación de forma individual y global.

La asignatura tiene tres pruebas escritas con cuestiones teóricas, conceptuales y con problemas teórico-prácticos, dos pruebas parciales (semana 8 y semana 13 aproximadamente) y una prueba final global. También se ofrece a los alumnos la posibilidad de realizar entregas voluntarias de ejercicios que pueden realizar en casa. Los profesores identifican en cada una de las pruebas, su aportación a cada uno de los criterios de evaluación asignándoles una calificación de 0 a 10.

Los profesores al final, asignan una calificación a cada uno de los criterios de evaluación según las evidencias obtenidas en cada una de las pruebas, valorando el nivel de desarrollo de cada uno al final de la asignatura. Cada criterio de evaluación debe haberse evaluado en al menos dos pruebas y tiene una determinada aportación a la calificación final.

Para aprobar la asignatura, un alumno debe tener en el conjunto de todas las pruebas teóricas una calificación superior al 45% del máximo posible y debe demostrar unos mínimos en cada uno de los criterios de evaluación.

D. *Evaluación del proyecto*

La evaluación del proyecto se realiza al final de la asignatura. Los alumnos presentan una memoria donde explican el hardware y el software desarrollado y un pequeño vídeo explicando el funcionamiento del sistema. Los profesores visualizan el vídeo y leen la memoria y convocan a los alumnos a una presentación oral del proyecto donde tienen que defender el trabajo que han realizado. Se intenta siempre tener antes del examen oral la información de las calificaciones de las pruebas escritas ya que eso ayuda a evaluar mejor el trabajo que cada alumno ha realizado en la realización del proyecto.

| RRAA | Criterios de Evaluación |
|-----------|---|
| RA1 y RA2 | <ul style="list-style-type: none"> CE1 Describir los principios fundamentales del diseño de sistemas empotrados, así como las características y ámbito de aplicación de los DSP (Digital Signal Processors) y de los SoCs (System On Chips) CE2 Describir las memorias de semiconductores más utilizadas en sistemas empotrados de altas prestaciones (Dual-Port, FIFO, Memorias Dinámicas, Memorias Síncronas, etc.), su aplicación y ser capaz de interconectarlas con un procesador. Siempre sabiendo buscar, comprender y utilizar las especificaciones que proporcionan los fabricantes de los componentes electrónicos. CE3 Utilizar adecuadamente los temporizadores, conversores A/D y D/A y el DMA en el diseño de aplicaciones de adquisición, procesado de información y control (generación de señales temporizadas y de sincronismo, medida de tiempos de señales externas, generación de interrupciones periódicas, sabiendo buscar, analizar y utilizar las especificaciones que proporcionan los fabricantes de los componentes electrónicos. CE4 Utilizar adecuadamente los diferentes subsistemas de comunicaciones proporcionados por un microcontrolador (UART, SPI, I2C, Ethernet, ...) en el diseño de aplicaciones de complejidad media, siendo capaces de diseñar aplicaciones que permitan interactuar remotamente con otros sistemas. |
| RA3 | <ul style="list-style-type: none"> CE5 Ser capaz de modelar el comportamiento de un sistema utilizando máquinas de estados y "StateChart" y de codificarlo en un lenguaje de alto nivel para un sistema basado en microcontrolador. CE6 Analizar y planificar las tareas de una aplicación de un sistema empotrado identificando los parámetros que influyen en la ejecutabilidad del sistema y sus límites de funcionamiento. CE7 Describir las características de un sistema operativo de tiempo real y utilizar los recursos que éste proporciona para diseñar aplicaciones para sistemas empotrados. |

| RRAA | Criterios de Evaluación |
|------|---|
| RA4 | <ul style="list-style-type: none"> CE8 Exponer y defender de manera clara y razonada sus propuestas para la resolución de los problemas planteados, las prácticas y el proyecto desde el punto de vista formal y funcional. CE9 Generar documentación técnica (hardware y software) correctamente redactada, clara y precisa sobre el trabajo realizado en el laboratorio siguiendo unos estándares preestablecidos (código comentado, esquemas claros, referencias adecuadas,...) y sabiendo buscar, analizar y utilizar las especificaciones que proporcionan los fabricantes de los componentes electrónicos. CE10 Implementar en la práctica circuitos físicos que, siguiendo unos requisitos y especificaciones, den solución a los problemas planteados, integrando los conocimientos adquiridos en las clases teóricas y en asignaturas anteriores, haciendo uso de los recursos bibliográficos y herramientas informáticas a su alcance. CE11 Capacidad para trabajar en grupo y para planificar el trabajo durante la asignatura siguiendo las recomendaciones de planificación y organización expuestas por los profesores, cumplimiento de hitos, etc. CE12 Utilizar adecuadamente la instrumentación de laboratorio y las herramientas de desarrollo y depuración comúnmente utilizadas en la programación de sistemas empotrados. |

La entrega de la documentación del proyecto suele realizarse en la semana siguiente a la finalización de los exámenes finales y la presentación del proyecto un par de días después de la entrega de la documentación. De esta manera se evita saturar a los alumnos durante los exámenes. Si algún alumno, por alguna razón no puede presentar el proyecto en la semana siguiente a la finalización de los exámenes, se examina el mismo día del examen final de la asignatura.

Aunque los alumnos presentan el proyecto en parejas, la calificación es individual, pudiendo ser diferente si se observa diferente nivel de competencia o de dedicación al proyecto.

La superación del proyecto es condición necesaria para aprobar la asignatura. El proyecto tiene un peso del 40% de la calificación de la asignatura.

VIII. OPINIÓN DE LOS ALUMNOS

Los alumnos consideran que la asignatura requiere mucho esfuerzo, especialmente por el tiempo dedicado a la realización del proyecto pero les parece muy positivo tener la posibilidad de integrar conocimientos de varias asignaturas y realizar un

sistema real completo, que además debe funcionar, más allá de simulaciones.

Al principio es habitual que se sientan ‘perdidos’ y solo al final van encontrando sentido al trabajo que realizan, consiguiendo avances muy rápidos.

IX. OPINIÓN DE LOS PROFESORES

Los profesores observan que algunos alumnos dedican al proyecto mucho más tiempo del que deberían dedicar. El temario no es demasiado amplio, disponen de muchos ejemplos de aplicación donde comprobar que realmente han entendido los conceptos. En muchos casos, la tecnología que deben aplicar en el proyecto corresponde a sencillas modificaciones de estos ejemplos adaptándolos convenientemente a la aplicación.

A pesar de que los profesores insisten en que es imprescindible entender los conceptos para enfrentarse al proyecto, los alumnos intentan enfrentarse al proyecto intentando adaptar los ejemplos vistos en clase sin realmente entenderlos, lo que suele desembocar en muchas horas de frustración al hacer un uso abusivo de la técnica de prueba-error. Solo cuando los estudiantes se preparan seriamente los

exámenes de teoría realizando ejercicios y ejemplos, y comprenden los conceptos, es cuando realmente rentabilizan su trabajo en el laboratorio.

REFERENCES

- [1] Enlace al programa Acredita Plus de la ANECA donde se solicita el sello de calidad EURACE. <http://www.aneca.es/Programas/ACREDITA-PLUS/ACREDITA-PLUS-en-el-ambito-de-la-Ingenieria-sello-EUR-ACE>
- [2] Enlace a la Guía Docente de la asignatura de Sistemas Electrónicos Digitales Avanzados:
- [3] Enlace a los Grados del área de Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad de Alcalá: <http://www.uah.es/escuela-politecnica/estudios/grados.asp>
- [4] Enlace a la página de NXP donde se muestra la información del LPC1768: <http://www.nxp.com/products/microcontrollers-and-processors/arm-processors/lpc-cortex-m-mcus/lpc-cortex-m3/lpc1700-series/512kb-flash-64kb-sram-ethernet-usb-lqfp100-package:LPC1768FBD100>
- [5] Enlace a la página del Entrono de Desarrollo KEIL: <http://www.keil.com/>
- [6] Normativa Reguladora de los Procesos de Evaluación de los Aprendizajes de los Estudios de Grado de la Universidad de Alcalá