

DESARROLLO CURRICULAR DE LA ELECTRÓNICA DIGITAL: UN CASO PRÁCTICO

Fernando Pescador, Miguel A. Freire, Matías J. Garrido, M. César Rodríguez y César Sanz

*Universidad Politécnica de Madrid.
{pescador, mafreire, matias, mcesar, cesar}@sec.upm.es.*

RESUMEN

En este trabajo se presenta la experiencia obtenida tras la organización de las enseñanzas prácticas de las diferentes asignaturas que componen la trayectoria de aprendizaje de la Electrónica Digital en torno a una plataforma hardware común (la tarjeta PRINCE) que fue desarrollada para este propósito. Se justifica la necesidad del cambio de estrategia docente, se comentan brevemente las asignaturas implicadas y se exponen los resultados, conclusiones y ventajas observadas en esta experiencia.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años las metodologías y técnicas de diseño digital han sufrido una importante transformación que viene asociada fundamentalmente a los avances tecnológicos que se han producido y a los cuales han debido adaptarse para poder sacarles provecho.

En el ámbito de los circuitos integrados de aplicación específica (ASIC), las geometrías nanométricas son ya una realidad, permitiendo la integración de sistemas complejos en un solo circuito (SoC), y haciendo referencia a los dispositivos lógicos programables (PLD), actualmente existen dispositivos que ofrecen al diseñador densidades de integración de varios millones de puertas. Este avance tecnológico, que permite la integración de complejos sistemas en un solo circuito (SoC), ha forzado también un cambio en las metodologías de diseño que, de la mano de los lenguajes de descripción hardware (HDL) y de las herramientas de síntesis lógica, intentan facilitar y hacer posible el desarrollo de tales sistemas en márgenes de tiempo razonables. Por último, este avance tecnológico también está reduciendo el uso industrial de la lógica basada en series estándar (TTL y CMOS), con excepción de la lógica para buses.

Por su parte, las enseñanzas universitarias intentan adaptarse a este cambio incluyendo en los currículos de los estudiantes asignaturas que tratan el estudio de estas tecnologías y el aprendizaje de estas herramientas. En este sentido hay titulaciones que proponen el empleo de entornos de CAD electrónico y de dispositivos programables para estudiantes de últimos cursos, mientras que es bastante generalizado aún el uso de las series estándar en las asignaturas básicas o de introducción a la Electrónica Digital que están llamadas a corto plazo a desaparecer por imposición del propio mercado.

Siendo conscientes de esta problemática general y de la necesidad concreta de introducir un cambio importante en todo el proceso de enseñanza de la Electrónica Digital afectando a todos los niveles, desde los primeros cursos hasta los de mayor especialización, el Grupo de Diseño Electrónico y Microelectrónico (GDEM) del departamento de Sistemas

Electrónicos y de Control de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) realizó el proyecto “*Desarrollo de Recursos Didácticos para la Enseñanza de la Electrónica Digital*”, financiado por la UPM dentro de su convocatoria de *Proyectos de Innovación para Mejora de la Calidad de la Enseñanza*, en cuyo marco se desarrolló, entre otros recursos [1], una plataforma hardware –la tarjeta PRINCE– de soporte a la enseñanza práctica de la Electrónica Digital que posibilitara la integración de estas metodologías y tecnologías en toda la trayectoria de aprendizaje de la Electrónica Digital: los fundamentos, el diseño con lenguajes de descripción hardware, la formación en dispositivos lógicos programables y microprocesadores y las técnicas de codiseño hardware-software.

Con esta filosofía y por medio de esta plataforma hardware común, es como se está desarrollando actualmente la docencia de la Electrónica Digital dentro de nuestra titulación tal y como se describe en este artículo. La disponibilidad de un núcleo común –plataforma más herramientas CAD relacionadas– da continuidad a las asignaturas que es apreciada por los estudiantes y facilita su aprendizaje al no requerir estudiar un nuevo sistema de desarrollo en cada asignatura.

En este artículo, por tanto, se describe la experiencia adquirida tras el empleo de esta estrategia en el desarrollo curricular de la Electrónica Digital dentro de la titulación de Ingeniero Técnico de Telecomunicación especialidad en Sistemas Electrónicos en la UPM, indicando las adaptaciones pedagógicas que se han realizado en cada una de ellas, la orientación que se ha dado a las prácticas y los recursos empleados.

2. PLATAFORMA HARDWARE

En el momento de comenzar el desarrollo de la tarjeta PRINCE (1999) se realizó un análisis detallado de las posibilidades comerciales que de este tipo de plataformas existían en el mercado obteniendo como conclusión que ninguna de ellas satisfacía las necesidades que se pretendían cubrir [2].

Sus características básicas se describen en [1-2] aunque seguidamente se resumen los elementos más relevantes que incorpora:

- FPGA de la familia 10K de Altera de 208 pines –con la circuitería necesaria para su configuración mediante memoria *Flash* y/o cable Byte-Blaster– .
- Microcontrolador AT89C51 –con 32 KB de memoria RAM externa–.
- Periféricos sencillos de entrada salida como son: pulsadores, microinterruptores, *displays* de siete segmentos y LEDs.
- Periféricos de entrada/salida más potentes como un *display* LCD de 16×2, un teclado hexadecimal y convertidores A/D y D/A cuádruples de 8 bits.
- Diversas interfaces: conector para un teclado de PC, dos interfaces RS-232C –uno asociado al microcontrolador y otro al FPGA– y una interfaz *Centronics*.

La Figura 1 muestra un diagrama de bloques simplificado y una fotografía de la tarjeta PRINCE.

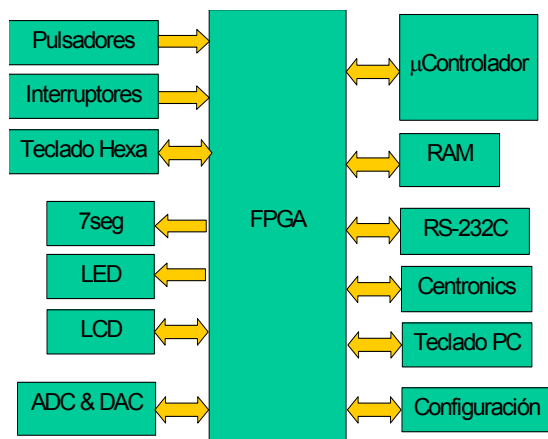


Figura 1. Diagrama de bloques y aspecto de la tarjeta PRINCE

Los requisitos de partida para la elección del FPGA y del microcontrolador fueron la existencia de herramientas de desarrollo profesionales y de libre distribución –MAX+plus II [3] para el FPGA y μ Vision2 [4] para el microcontrolador– y, en el caso del microcontrolador, también la existencia de sistemas operativos en tiempo real para el mismo.

Para dotar de una mayor flexibilidad a la tarjeta, poder afrontar desarrollos más complejos dando cobertura a asignaturas de últimos cursos y permitir la introducción de herramientas de emulación en el proceso de aprendizaje a un coste abordable, se ha diseñado una tarjeta complementaria denominada PRINCE+ (Figura 2) que incorpora un microcontrolador con núcleo 8051 y para el cual existe emulador –a través de un puerto JTAG– a muy bajo precio. Entre las diversas familias de este fabricante¹, se ha seleccionado el microcontrolador C8051F020, que posee las siguientes características:

- 64Kb de memoria *Flash* interna, 4352 bytes de RAM y posibilidad de memoria externa.
- Buses de comunicaciones serie SPI, I2C y 2 UARTs.
- 8 Puertos de E/S.
- 5 Temporizadores.
- Convertidor A/D de 12 bits y 8 canales a 100Ksps.
- Convertidor A/D de 8 bits y 8 canales a 500Ksps.
- Convertidor D/A de 12 bits y 2 canales.
- Tensión de referencia.
- 2 comparadores analógicos
- Sensor de temperatura.

¹ Del fabricante Silicon Laboratories (www.silabs.com), antes Cygnal.

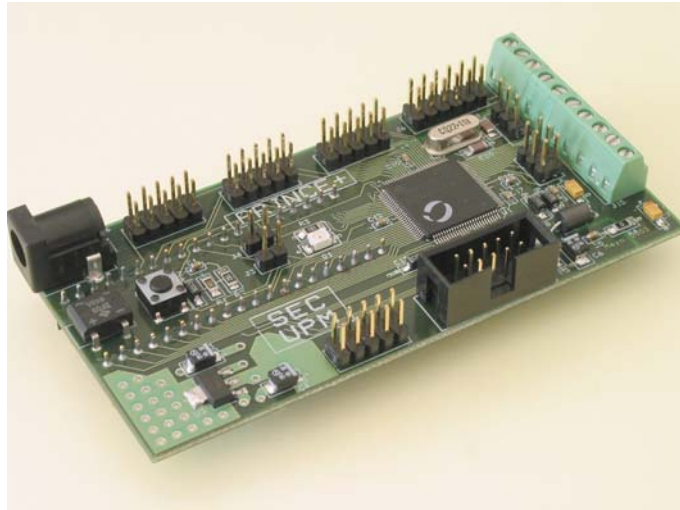


Figura 2. Tarjeta para la emulación del C8051F032

La tarjeta PRINCE+ puede funcionar de forma independiente, como una tarjeta de desarrollo básica basada en este microcontrolador; o bien, conectarse *piggy-back* sobre el zócalo del AT89C51 que posee la tarjeta PRINCE. De este modo, desde el microcontrolador, se tiene acceso a todos los recursos de la tarjeta PRINCE. La depuración del programa que ejecuta el microcontrolador se realiza con el emulador JTAG, el cual se haya integrado y puede manejarse desde las herramientas de desarrollo de Keil, permitiendo la ejecución paso a paso, la inserción de puntos de ruptura, la visualización de las variables, etc.

3. EXPERIENCIA DE USO DE LA TARJETA PRINCE

Como ya se comentó anteriormente esta tarjeta es el elemento alrededor del cual están organizadas la mayor parte de las enseñanzas relacionadas con la Electrónica Digital que se cursan a lo largo de la titulación de Ingeniero Técnico de Telecomunicación especialidad en Sistemas Electrónicos en la UPM. Las asignaturas implicadas son: Sistemas Lógicos, Electrónica Digital, Sistemas Digitales I y II, Diseño Digital e Ingeniería de Sistemas Electrónicos. A continuación se detallan las particularidades de estas asignaturas y el modo en que se emplea la tarjeta en cada una de ellas.

3.1. Sistemas Lógicos

Se trata de una asignatura de primer cuatrimestre para estudiantes recién llegados y en ella se enseñan los conceptos básicos de circuitos digitales cableados. Esta asignatura no posee laboratorio incluido en la carga docente por lo que los estudiantes no manipulan directamente la tarjeta. Sin embargo, sí se les imparte algún *tutorial* básico sobre las herramientas de diseño y simulación y se les efectúa alguna demostración sobre la tarjeta con el fin de que conozcan las actuales técnicas de diseño. Para los estudiantes de algunas titulaciones de Ingeniería Técnica de Telecomunicación puede ser la única asignatura de esta temática que les imparte el departamento.

3.2. Electrónica Digital

Es una asignatura ubicada en el tercer cuatrimestre que está orientada al diseño de circuitos digitales con un claro enfoque práctico puesto que su carga lectiva es de 1'5 créditos de teoría (1 hora/semana) y 6 de laboratorio (4 horas/semana). El objetivo fundamental es que los estudiantes aprendan en profundidad el manejo de un entorno de CAD para diseño con Dispositivos Lógicos Programables como es el MAX+plus II y todo el ciclo de diseño con estos dispositivos que va desde la interpretación de la especificación a las pruebas finales del sistema.

En las clases de teoría se imparten temas relacionados con las tecnologías disponibles (familias lógicas –TTL y CMOS– y Dispositivos Lógicos Programables) y con la metodología de diseño digital síncrono. En el laboratorio los estudiantes realizan prácticas con dos enfoques diferentes, las primeras tienen un carácter más guiado y les permiten manejar con soltura el entorno de CAD y entrenar el ciclo de diseño con pequeños ejercicios, y las segundas en las que los estudiantes deben realizar un diseño más o menos individualizado (un diseño por pareja) de mediana complejidad. El hecho de que los diseños propuestos sean distintos para cada pareja es posible debido a que el número de estudiantes que se matriculan en esta asignatura se sitúa en el entorno de los 70.

La gran ventaja que aporta la materialización del laboratorio sobre la tarjeta PRINCE y el entorno MAX+plus II es que el estudiante puede iterar el ciclo de diseño completo (dibujo del esquema, simulación lógica y volcado a la tarjeta) en muy poco tiempo, de modo que el mayor porcentaje de tiempo de trabajo en el laboratorio se centra en el diseño y la simulación y no en la resolución de problemas de montaje o cableado como ocurría en la metodología tradicional.

Uno de los aspectos novedosos de esta asignatura es que la mayor parte de la nota final (un 80% aproximadamente) se obtiene como resultado de las diversas evaluaciones que se realizan en el laboratorio. Por tanto el estudio por parte de los estudiantes de la asignatura debe realizarse en el propio laboratorio lo que hace necesario la posibilidad de libre acceso al mismo.

Un último aspecto interesante es que en algunas ocasiones es complicado realizar varios diseños de complejidad parecida para proponérselos a los estudiantes y que además les resulten atractivos puesto que las especificaciones deben ser “muy controladas”. Para solventar este problema se ha recurrido a entregar a los estudiantes algunas partes de sus diseños en formato EDIF² (*Electronic Design Interchange Format*). Se trata de un formato no editable pero si simulable y sintetizable que les permite incluirlo en su diseño para que de este modo puedan centrarse en el diseño de alguno de los módulos del sistema pudiendo simular y/o probar en todo momento el sistema completo.

La filosofía de esta asignatura ya se ha experimentado durante dos años consecutivos obteniendo unos resultados que se podrían resumir del siguiente modo:

- Aproximadamente el 80% de los estudiantes que llegan a finalizar el diseño aprueban la asignatura sin demasiadas complicaciones.

² Formato textual bien conocido que sirve habitualmente como formato de intercambio entre herramientas CAD.

- Aproximadamente un 20% de los estudiantes abandona el laboratorio a lo largo del cuatrimestre. Este porcentaje es muy superior a la media de abandonos de los laboratorios de otras asignaturas debido a las numerosas evaluaciones que sufren a lo largo del cuatrimestre.
- En las encuestas que se han realizado, los estudiantes muestran una actitud favorable a este procedimiento de aprendizaje.

3.2. Sistemas Digitales I

Esta asignatura se ubica en el tercer cuatrimestre (se desarrolla en paralelo con Electrónica Digital) y tiene como objeto que los estudiantes conozcan la arquitectura interna de un microprocesador y sean capaces de construir un sistema a su alrededor conectándole memorias y periféricos sencillos. Esta asignatura sólo dispone de una hora semanal de laboratorio en la que los estudiantes emplean un microprocesador sencillo de 8 bits (MicroSEC) que ha sido desarrollado expresamente para este laboratorio en VHDL³.

Con este modelo de microprocesador se proponen varias prácticas en las que se abordan los siguientes temas:

- Simulación de los ciclos máquina de ejecución de un programa identificando los ciclos de búsqueda de código de operación, decodificación y ejecución.
- Realización de programas en el lenguaje de ensamblaje que se ha creado para este microprocesador y ejecución de los mismos sobre la tarjeta PRINCE.
- Inclusión, en los programas, de la gestión de interrupciones.
- Diseño y conexión de periféricos sencillos para este microprocesaor.
- Diseño de una aplicación sencilla que incluya un interfaz de E/S basada en alguno de los periféricos que incorpora la tarjeta PRINCE.

Es interesante hacer notar que los estudiantes abordan prácticas de cierta complejidad en tan solo una hora semanal gracias a que ya conocen previamente la tarjeta y las herramientas de desarrollo.

Los estudiantes realizan este laboratorio por parejas y todas las prácticas son iguales para todos ellos. Al igual que en la mayor parte de los laboratorios, el acceso de los estudiantes al mismo es libre. El peso del laboratorio sobre el total de la asignatura se refleja en un 30% de la nota final.

3.3. Sistemas Digitales II

Esta asignatura se imparte en el cuarto cuatrimestre y retoma los conocimientos de arquitectura de ordenadores adquiridos por los estudiantes en Sistemas Digitales I pero particularizándolos sobre un microcontrolador. Para ello la asignatura dispone de 4'5 créditos de teoría (3 horas/semana) y 3 créditos de laboratorio (2 horas/semana). El microcontrolador empleado es de la familia 8051⁴.

³ Actualmente se está desarrollando un nuevo microprocesador didáctico (mPd) para uso en esta asignatura con una serie de herramientas de soporte adicionales (emulador, analizador lógico, etc.)

⁴ Actualmente, por motivos coyunturales, se emplea una tarjeta distinta de la PRINCE+ pero las herramientas de desarrollo son las mismas. Está previsto migrar la docencia de esta asignatura al microprocesador de la tarjeta PRINCE+ para aprovechar las ventajas de su conexión a la tarjeta PRINCE.

Sobre este microcontrolador los estudiantes realizan dos tipos de prácticas, inicialmente un conjunto de ellas orientadas a que aprendan a manejar el entorno de desarrollo μ Vision de Keil; a continuación, se realiza un diseño de cierta complejidad que implique varios de los periféricos internos disponibles en el microcontrolador y otros externos como pueden ser el teclado o el LCD.

Al igual que ocurre en otros laboratorios, sería posible abordar diseños más complejos de los que se pueden abarcar en una asignatura de estas características si alguno de los módulos (por ejemplo el controlador de algún periférico externo o algún periférico específico) se proporciona en formato EDIF para ser transferidos directamente al FPGA y controlados por parte del microcontrolador.

Los estudiantes realizan estas prácticas de forma individual siendo el acceso libre al laboratorio fuera del horario estipulado para cada grupo.

3.4. Diseño Digital

Esta es una asignatura optativa de 5 cuatrimestre. Su objetivo es que los estudiantes aprendan y manejen los lenguajes de descripción hardware –en concreto VHDL– y empleen herramientas de simulación VHDL y síntesis lógica. En concreto se emplean las herramientas ModelSim, para simulación, y LeonardoSpectrum, para la síntesis lógica⁵. El diseño físico (emplazamiento y conexionado) se realiza con MAX+plus II dado que la tecnología de referencia es los FPGA de la familia 10K y la plataforma hardware la tarjeta PRINCE.

Aun cuando esta asignatura requiere del aprendizaje de nuevas herramientas –debido a las carencias del entorno MAX+plus II para los propósitos de la asignatura–, el hecho de manejar una plataforma de laboratorio y una herramienta de diseño físico ya conocida, permite ahorrar tiempo en el aprendizaje de herramientas que se dedica a trabajar aspectos de diseño.

El laboratorio de la asignatura se estructura en un conjunto de prácticas guiadas iniciales para el aprendizaje de las nuevas herramientas y de su integración con la ya conocida MAX+plus II y se completa con el diseño de un IP (*Intellectual Property*) en VHDL y su banco de test. Los estudiantes realizan estas prácticas en parejas y el acceso al laboratorio es libre en los horarios disponibles.

3.5. Ingeniería de Sistemas Electrónicos

Esta asignatura es troncal para los estudiantes de Ingeniería Técnica de Telecomunicación especialidad en Sistemas Electrónicos y se ubica en el quinto cuatrimestre. Su carga lectiva, de 4 horas semanales, es exclusivamente de laboratorio. El objetivo es que los estudiantes integren todos los conocimientos adquiridos previamente de diseño digital, programación de microcontroladores y acondicionamiento de señales analógicas (sensores y actuadores).

⁵ Ambas herramientas son del fabricante Mentor Graphics (www.mentor.com)

Además se incorpora un nuevo concepto que es el de los sistemas operativos en tiempo real (RTOS) de modo que sobre el microcontrolador de la tarjeta PRINCE+ se dispone de uno de estos sistemas, concretamente el RT Tiny [4]. Es un RTOS sencillo que permite definir tareas e incorpora mecanismos de sincronización (señales) y de temporización.

Con estos recursos los estudiantes se enfrentan a un diseño completo en el que tienen que tratar señales analógicas, y elegir la parte del diseño que se realizará en el FPGA y la que se materializará en el microcontrolador. Además se diseñan los PCBs complementarios que sean necesarios para acondicionar las señales de entrada y procesar las salidas.

Finalmente indicar que este laboratorio es de libre acceso y que en este primer año de impartición se han matriculado 31 estudiantes lo que facilita el desarrollo del laboratorio.

4. CONCLUSIONES

Tras emplear esta tarjeta en la mayor parte de nuestros laboratorios las expectativas que inicialmente se tenían se han visto claramente mejoradas puesto que se dispone de una plataforma de bajo coste y que da una gran versatilidad en los laboratorios de Electrónica Digital puesto que puede usarse para aprender desde los fundamentos (p.e.: funcionamiento de puertas lógicas) hasta las técnicas de codiseño hardware-software.

Después de la experiencia de varios años impartiendo asignaturas que emplean un mismo recurso para sus laboratorios se aprecian numerosas ventajas desde el punto de vista del aprendizaje de los estudiantes puesto que no tienen que aprender una plataforma y un entorno de desarrollo para cada laboratorio con el ahorro de tiempo que esto supone⁶. Además no es sólo un problema de ahorro de tiempo sino de coherencia en el aprendizaje puesto que el estudiante va incorporando conocimientos poco a poco hasta llegar a completar todos los elementos que habitualmente aparecen en sistemas digitales complejos: diseño digital, lenguajes de descripción hardware, microcontroladores, RTOS, etc.

La plataforma desarrollada se ha mostrado tremendamente robusta puesto que en los dos años en los que se ha empleado de forma continua en los diversos laboratorios no ha sido necesario reparar ninguna de ellas. Los únicos problemas aparecidos han sido mecánicos (pulsadores o microinterruptores) motivados por el uso intensivo que se ha hecho de ellas.

Esta característica favorece un aspecto que consideramos primordial en este tipo de enseñanzas como es que los laboratorios sean de acceso libre puesto que elimina una de las barreras tradicionales de este tipo de enfoque que es la falta de personal que pueda realizar el mantenimiento continuo que requieren. Además la fiabilidad del material hace que los estudiantes confíen en él evitando de este modo la continua incertidumbre que tienen los estudiantes cuando no obtienen los resultados esperados y que les lleva frecuentemente a achacar dichos fallos a los recursos del laboratorio.

Un aspecto sumamente interesante que permite el hecho de disponer de una plataforma potente como es la tarjeta PRINCE, es poder abordar la realización de diseños complejos. La ventaja de un diseño complejo –bien elegido– es una mayor motivación del estudiante hacia su realización y un mayor aprendizaje de técnicas y métodos. Ahora bien,

⁶ Y ahorro también del *conocimiento basura* que supone tener que aprender entornos de CAD diversos y dispares.

lógicamente, las horas disponibles para la realización del diseño en una asignatura típica, no permiten, en general, abordar diseños demasiado complejos. La solución que hemos adoptado para poder conseguir las ventajas que ofrecen los diseños complejos y evitar los inconvenientes es la siguiente: a los estudiantes se les proporciona el diseño ya realizado pero se les entregan sus bloques constituyentes en formato EDIF. Este formato puede servir como entrada a herramientas de simulación y diseño físico, por lo que los estudiantes pueden, desde el primer momento, analizar –en simulación o volcándolo sobre la tarjeta PRINCE– el funcionamiento del diseño que se les propone. Sin embargo –y afortunadamente–, para un diseño complejo la posibilidad de efectuar ingeniería inversa sobre él para obtener un esquema o código HDL resulta bastante remota. De este modo aunque el diseño global sea complejo, se puede acotar que el estudiante solamente realice uno o varios de los bloques que lo componen, de modo que, una vez diseñado, puede integrarlo en el conjunto sustituyendo el EDIF suministrado por su propio diseño y evaluar el funcionamiento del conjunto. Análogamente, en asignaturas cuyo diseño involucre el manejo del microcontrolador, también se les puede proporcionar el código binario del programa que deban desarrollar.

Algunas ventajas colaterales de este procedimiento son, por ejemplo, que el estudiante puede, de forma empírica, aclarar dudas funcionales acerca de la especificación del diseño que se le propone y entenderla perfectamente. Además, dispone de un diseño de referencia que le permite comprobar, volcándolo sobre la tarjeta PRINCE, el correcto funcionamiento de esta.

Por último, indicar que algunas universidades tanto nacionales como internacionales se han interesado por nuestra experiencia y han adquirido esta plataforma para emplearla tanto en el uso docente para el que fue concebida, como en tareas de investigación y desarrollo como sistema de prototipado de sistemas.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores, quieren agradecer a los compañeros profesores del departamento de Sistemas Electrónicos y de Control sus comentarios, siempre enriquecedores, acerca de sus experiencias con el uso de la tarjeta PRINCE en las diferentes asignaturas que imparten, sus aportaciones y las sugerencias para su mejora.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Sanz, F. Pescador, M. A. Freire, M. Garrido y M. C. Rodríguez. “Recursos para la enseñanza de la Electrónica Digital”. Actas del V Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica. Pp. 137-140. Las Palmas de Gran Canaria. España. Febrero 2002
- [2] C. Sanz, M. A. Freire, F. Pescador, M. Garrido y M. C. Rodríguez, A. Pérez.”Advanced Tools for Digital Electronics Teaching”. 4th European Workshop on Microelectronics Education. Pp. 189-192. ISBN 84-267-1325-4. Ed. Marcombo. Vigo, España. Mayo 2002.
- [3] http://www.altera.com/products/software/free/fre-baseline_get.html
- [4] <http://www.keil.com>