

¿Diseño de circuitos impresos en la Universidad?

Gerardo Aranguren, Josu Etxaniz, Luis A. López-Nozal
Dpto. Tecnología Electrónica, Universidad del País Vasco
UPV/EHU
Bilbao, Spain
gerardo.aranguren@ehu.es

Abstract—Esta comunicación se centra en analizar la importancia de introducir y enseñar diseño de circuitos impresos en la universidad. Habitualmente este tema no se enseña, aunque tiene gran importancia de cara a un producto electrónico finalizado. En la comunicación se presentan algunas experiencias previas y la metodología y planificación para una nueva asignatura.

PCB Design, PCB Layout, EDA tools, teaching methods.

I. INTRODUCCIÓN

Los profesores de electrónica nos hemos preguntado en muchas ocasiones si es necesario enseñar el diseño de los circuitos impresos, PCB (Printed Circuit Board), en el ámbito de un título de ingeniería que abarque la electrónica.

Mayoritariamente se suele rechazar la enseñanza de esta parte de la electrónica sin mayores consideraciones.

Pero debemos tener en cuenta que el circuito impreso es el único elemento físico del que somos diseñadores en un producto electrónico. El diseño interno de un dispositivo lógico programable, el firmware o software de un procesador no son partes físicas. Además, en el circuito impreso se reflejan todas las conexiones, cálculos y decisiones sobre nuestro diseño. Nuestro saber y nuestro trabajo se plasman en el PCB.

Y si es tan importante, ¿por qué queda ausente de los planes de estudio? Podemos apuntar algunas posibilidades:

- Se considera que es algo de menor importancia. No es necesario que se dedique un ingeniero superior. Se puede asignar a personas con menor titulación: personas con formación profesional o técnicos de CAD.
- No tiene valor científico, ni formulación matemática, por lo que queda a un nivel ajeno a la investigación. Esto es característico de los profesores que ven la electrónica como una ciencia y no como una tecnología.
- Se prefiere enseñar unos conocimientos más científicos, y supuestamente más significativos y difíciles de adquirir fuera de las aulas y laboratorios. Conocimientos que requieren la guía de un profesor.
- También se puede considerar que no es un elemento importante dentro del producto electrónico, ya que no es un dispositivo semiconductor construido con silicio, ni tan siquiera un dispositivo pasivo. Puede ser enseñado desde otras áreas del conocimiento como expresión gráfica.

- No ayuda nada que su enseñanza no esté formulada en las leyes directrices de los planes de estudio. Quienes hacen los planes de estudio a veces están muy lejos de la realidad de la electrónica y se dejan aconsejar por personas de ciencias con un gran elenco de publicaciones en revistas especializadas y con desconocimiento de las necesidades de una empresa.
- Tampoco hay muchos créditos dentro del plan de estudios para repartir entre tantos conocimientos. Siempre resulta escaso el tiempo dedicado a la electrónica y en la selección de materias queda fuera el tema de diseño del circuito impreso.
- Se pueden aducir otros problemas de falta de medios como la carencia de las herramientas de diseño, falta de preparación del profesorado en aspectos de producción e insuficiente experiencia respecto de los procesos de diseño para el mercado.

En resumen, a la pregunta formulada en el título de esta comunicación, ¿diseño de circuitos impresos en la Universidad?, la respuesta más habitual es: NO, lo sentimos.

Atravesamos una crisis económica mundial de la que no es ajena la Universidad y la preparación que damos a nuestros estudiantes. El proceso Bolonia y la implantación de las metodologías activas nos han venido a recordar que la enseñanza no es una mera transmisión de conocimientos científicos. La enseñanza debe ser más práctica, recuperar los métodos de las escuelas clásicas donde el maestro formaba a los aprendices haciéndoles participar de su trabajo (aprender haciendo) y el estudiante debe buscar su preparación (aprender a aprender).

¿Estará el diseño de los circuitos impresos dentro de las materias y competencias a recuperar del olvido?

En el apartado II de esta comunicación se analiza la importancia del circuito impreso dentro de la electrónica y en el aprendizaje para los futuros ingenieros dedicados a la electrónica. Esta enseñanza tiene unas particularidades reflejadas en el apartado III. En el apartado IV se comentan algunas experiencias de cursos impartidos alrededor de esta materia. En el apartado V se presenta brevemente el software de diseño necesario. Al final en el apartado VI, se presenta el diseño de una asignatura sobre diseño de circuitos impresos.

II. IMPORTANCIA DEL CIRCUITO IMPRESO

Los circuitos electrónicos siempre se construyen sobre un circuito impreso. Todos los productos electrónicos tienen un

circuito impreso de diseño propio, en cambio los componentes o dispositivos pueden variar entre multitud de opciones y no podemos decir que un determinado componente esté presente en todos los circuitos electrónicos.

Desde una concepción simple, podemos considerar que el circuito impreso es un elemento carente de complejidad técnica, que no influye en el funcionamiento de un circuito electrónico. Esto es cierto para circuitos muy sencillos donde lo único que aporta el circuito impreso es un procedimiento para realizar las conexiones. Pero si consideramos circuitos de mayor complejidad o para funcionamiento a altas frecuencias aparecen fenómenos de radiación, problemas de distribución de potencia, limitaciones en las velocidades de conexión y otra larga serie de problemas.

Actualmente muchos estudios científicos se centran en la tecnología de diseño y desarrollo del PCB porque cada vez es más importante esta parte del circuito. Algunos tópicos de interés son la capacidad de disipación térmica, las características de los PAD [1], las emisiones electrostáticas, el diseño de PCB en 3D [2], relación con nuevos empaquetados [3], la realización de antenas en el propio circuito impreso, los circuitos para alta velocidad [4], el control de calidad y otros muchos.

En resumen, el circuito impreso es imprescindible para que exista un producto electrónico y la complejidad de la electrónica actual hacen que el circuito impreso tenga una importancia vital.

Por tanto, consideramos necesario recuperar la importancia del diseño de los circuitos impresos en la Universidad y su lugar en los planes de estudio con una correcta formulación y metodología.

Su enseñanza será un medio para conseguir completar el ciclo de diseño de un producto electrónico. Si hay, posteriormente, una correcta producción de los equipos electrónicos contribuiremos a crear riqueza en nuestra región o país.

III. PECULIARIDADES EN LA ENSEÑANZA DEL DISEÑO DE CIRCUITOS IMPRESOS

El diseño de los circuitos impresos tiene una serie de características que lo hace distinto de otro tipo de conocimiento que se pueda impartir.

- Su explicación teórica es evidente que no tiene mucho sentido, pero sin duda se deben explicar los fundamentos del diseño y los conceptos principales asociados a un circuito impreso.
- La impartición en un laboratorio tampoco se puede realizar en la manera tradicional: formular una práctica y dedicar una sesión a su montaje y prueba. Resulta insuficiente el tiempo que se puede dedicar.
- Para el diseño de un circuito impreso se debe dedicar bastante tiempo de trabajo personal, por lo que gran parte del aprendizaje lo deben efectuar los estudiantes fuera de las horas lectivas.

- El diseño de un circuito impreso se debe basar en el esquemático de un circuito previo. El esquemático se puede proporcionar directamente a los estudiantes, se puede basar en el esquemático desarrollado en otra asignatura anterior o desarrollada simultáneamente, o bien se puede diseñar al comienzo del curso.
- Las explicaciones deben asociarse a la utilización de un determinado programa de diseño electrónico, EDA (Electronic Design Automation). Aunque los conceptos básicos son iguales a todos los programas, la forma de utilización es distinta en cada programa. Los estudiantes deben disponer de los programas fuera de los laboratorios para realizar el aprendizaje de manera adecuada.

En conclusión, se debe considerar una metodología de enseñanza adecuada a las características peculiares señaladas para la enseñanza del diseño de circuitos impresos.

IV. EXPERIENCIAS PREVIAS

En la Escuela de Ingeniería de Bilbao, se han ensayado durante los últimos cursos distintas metodologías para la impartición de estos conocimientos.

Primeramente, en la asignatura Diseño de Sistemas Digitales Avanzados (optativa de 2º ciclo de Ingeniería de Telecomunicaciones) se les propuso a los estudiantes que realizaran un pequeño diseño por su cuenta. El objetivo era doble:

- Medir el nivel de conocimientos sobre diseño de esquemáticos y diseño de PCB adquirido en asignaturas anteriores.
- Evaluar la capacidad de los estudiantes para aprender por su cuenta el uso de un programa para diseño de PCB.

Al mes de comenzar la experiencia, los estudiantes manifestaron muchas dudas y dificultades respecto del uso de las herramientas EDA y la posibilidad de diseñar un PCB, por lo que se optó por impartir algunas clases de demostración. Esas clases se fueron intercalando a lo largo del cuatrimestre para dar tiempo a que los estudiantes realizaran las prácticas fuera del aula. Al final se consiguió un diseño medianamente aceptable. La conclusión de esta experiencia fue la necesidad de una mayor dedicación en clase para guiar a los estudiantes en el uso de las herramientas de diseño y en los conceptos fundamentales del diseño de un PCB. También se midió el tiempo dedicado por parte de los estudiantes para hacer su primer diseño básico de un PCB.

Posteriormente se ha realizado otra experiencia, dentro de una asignatura del Máster en Sistemas Electrónicos, guiando más a los estudiantes en su aprendizaje. En esta ocasión se ha tratado de evidenciar todos los pasos del trabajo de un ingeniero dedicado a la electrónica. Siguiendo la descripción de Crawley y al. [11] se ha realizado la Concepción del proyecto, el Diseño, la Implementación y la Operación.

Concepción. El proyecto propuesto en esta ocasión ha sido real. En el grupo de investigación de los autores se precisaba construir una herramienta para evaluar un transductor de

sensores de ultrasonidos. En clase el profesor ha propuesto la necesidad, los estudiantes han analizado el problema, para terminar formulado y discutido sus propuestas en clase. Los resultados de la concepción son la arquitectura del circuito y la selección de los principales componentes que permiten la realización del circuito.

Diseño. El diseño se ha realizado en grupos de dos estudiantes. En primer lugar han diseñado el esquemático en base a los componentes que han ido seleccionando. A continuación han diseñado el circuito impreso. Estas tareas se han ido alternando entre demostraciones en clase, trabajo en aula con ordenador y trabajo personal fuera del horario reglado.

Implementación. Como la práctica se basaba en un circuito real, se han enviado los ficheros para la fabricación del PCB. Evidentemente sólo se ha fabricado el diseño que hemos considerado que estaba mejor acabado. Se ha realizado el seguimiento de la fabricación analizando los problemas detectados por el fabricante. Posteriormente se ha enviado toda la documentación para el ensamblado a una empresa especializada, ya que la mayor parte de componentes eran SMD. Dentro del curso, los estudiantes han visitado la empresa para conocer de cerca las técnicas de montaje electrónico.

Operación. Simultáneamente se han realizado los programas para el microcontrolador y el ordenador de control del sistema. Cuando se ha recibido el equipo montado se han realizado las pruebas previas a la puesta en alimentación. Posteriormente se ha alimentado el circuito y se ha grabado el programa del microcontrolador. A continuación se ha proseguido con la depuración y pruebas hasta el completo funcionamiento del circuito electrónico.

Obviamente las circunstancias particulares para el desarrollo de este proyecto no se pueden dar todos los años, ni en todas las circunstancias, pero nos ha servido para analizar y medir el alcance de una experiencia de este estilo.

V. HERRAMIENTAS DE DISEÑO

Una de las peculiaridades de la enseñanza del diseño de circuitos impresos, como se ha señalado en el apartado III, es la necesidad de disponer de una herramienta de diseño electrónico. En ocasiones la dificultad para disponer de esta herramienta de diseño puede determinar la exclusión de esta enseñanza. El software de diseño debe poder utilizarse en las clases teóricas de demostración, en las aulas con ordenador y en los ordenadores de los estudiantes (ordenadores propios o aulas con ordenadores puestas a libre disposición de los estudiantes). Lo que implica el empleo de un software sin costo.

Hay varios programas de diseño electrónico de uso libre que se pueden utilizar para la impartición de esta materia. Microsoft Windows tiene el programa FreePCB [6] simple, pero con capacidades suficientes para diseñar un circuito impreso sencillo plenamente profesional en un entorno universitario. Otro programa gratuito y más profesional es DesignSpark [7]. Fritzing [8] es un programa más vinculado a las prácticas tradicionales de la electrónica a través de protoboard, pero que también permite llegar al diseño de un PCB industrial.

Esta enumeración quedaría corta si no se nombra a OrCAD de Cadence [9], ya que se utiliza de manera muy extendida en el entorno universitario. OrCAD tiene una versión de evaluación gratuita que limita el número de componentes que se pueden disponer en el PCB, lo que no permite hacer productos comerciales, pero si sencillos circuitos de prácticas con acabado industrial. Además OrCAD cuenta con bastante bibliografía entre la que destaca los libros de Bueno y Soto [10] para el diseño con Capture y Mitzner [11] para el diseño con PCB Editor. Capture y PCB Editor son dos variantes de OrCAD para diseño de los PCB. Recientemente Cadence ha dejado de soportar Capture, por lo que es conveniente utilizar PCB Editor en nuevos cursos.

Esta lista podría continuar con otros programas EDA de mayores capacidades y costo. En [12] se puede encontrar una lista más completa y comentada.

Una vez concluido el diseño, como resultado final se producen los ficheros de fabricación (Gerber). También es bueno disponer de algún programa para la visualización de los ficheros Gerber ya que además ayuda mucho a comprender el diseño y a detectar errores. Para la visualización de estos ficheros se recomienda utilizar la versión Shareware de Gerber Magic [13] o la visualización on-line de las que existen varias versiones como Online Gerber Viewer [14].

VI. TECNOLOGÍA DE SISTEMA ELECTRÓNICOS

Con la elaboración de los nuevos planes de Estudio, para la titulación de Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones en la Escuela de Ingeniería de Bilbao, se ha propuesto una asignatura que complete el proceso de elaboración de un producto electrónico.

Esta asignatura está vinculada a otras dos asignaturas impartidas el mismo cuatrimestre (4º curso, primer cuatrimestre) realizando un aprendizaje orientado a proyectos (POL). Sin entrar en los detalles de la configuración conjunta de estas tres asignaturas, en lo que respecta al diseño de los circuitos integrados, esta colaboración entre asignaturas aporta la concepción del proyecto y el diseño del esquemático de un circuito. De esta forma la asignatura Tecnología de Sistemas Electrónicos puede centrarse en el diseño del PCB.

Aunque esta asignatura todavía no se ha impartido y no se posee experiencia sobre su adecuación para la preparación de los estudiantes, se va a exponer el planteamiento inicial realizado.

La asignatura tiene dos facetas: enseñar a diseñar circuitos impresos (Diseño) y enseñar el proceso de fabricación de los productos electrónicos (Implementación) [15]. Estos dos aspectos están necesariamente vinculados y es conveniente que su aprendizaje se produzca en paralelo.

Respecto del diseño de los circuitos impresos se ha previsto desarrollar tres unidades temáticas comprendiendo los siguientes tópicos:

- Unidad temática 1. Preparación de los esquemáticos:
 - Comprobación del esquemático (DRC, Design Rule Check). Se ha observado que los estudiantes generalmente conocen la herramienta de diseño

electrónico de asignaturas anteriores, pero les falta calidad en los esquemáticos para abordar el diseño del PCB.

- Revisión de selección y definición de componentes. Normalmente utilizan componentes genéricos y les falta concretar en componentes del mercado con encapsulados precisos.
- Unidad temática 2. Diseño de circuitos impresos básicos:
 - Diseño de componentes físicos. Diseño completo de los PAD (Padstack).
 - Asociación de componentes del esquemático y dispositivos físicos.
 - Generación del fichero de conexiones del circuito (Netlist).
 - Selección y diseño de las capas del circuito impreso (Stackup).
 - Diseño de bordes de tarjeta y obstáculos.
 - Emplazamiento de componentes.
 - Rutado básico. Características de las pistas y las vías.
 - Rutado de los planos de tierra y tensión.
 - Diseño de vías no metalizadas, capa de serigrafía, puntos fiduciales (fig. 1), panelado (fig. 2) y otros complementos.
 - Generación de ficheros de fabricación del PCB en formatos Gerber y Excellon: capas de cobre, serigrafía, resistente a soldadura y taladros. Ficheros para ensamblado: fichero de pasta de soldadura y ficheros de emplazamiento.
- Unidad temática 3. Diseño del circuito impreso avanzado:
 - Definición de estrategias de rutado y autorutado.
 - Rutado avanzado: líneas diferenciales (fig. 3), microvías, vías ocultas, circuitos flexibles y otros.



Figura 1. Puntos fiduciales para el emplazamiento de un componente BGA.

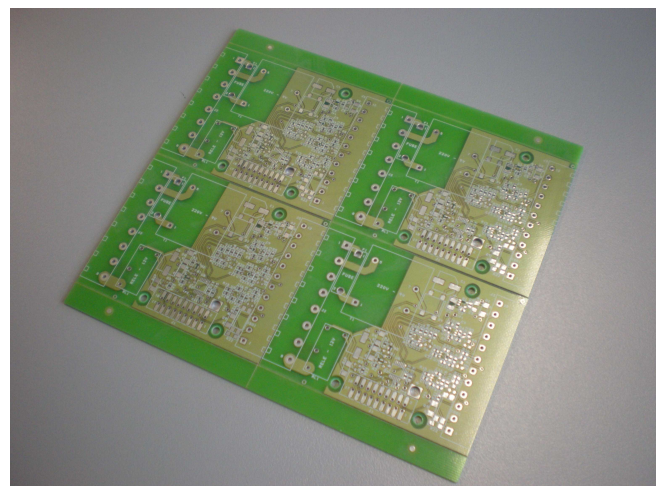


Figura 2. Ejemplo de panelado.

Como se puede ver estos tópicos corresponde al desarrollo progresivo del diseño de un circuito impreso. No es conveniente verterlos todos de manera continua en una explicación teórica. Conviene, más bien, ir entrelazando las explicaciones o demostraciones en clases magistral, con el trabajo de los estudiantes en el laboratorio y con el trabajo personal fuera de las aulas. Las clases en laboratorio sirven exclusivamente para guiar el trabajo y resolver las dudas.

En total se ha previsto dividir la enseñanza en clases de demostración, prácticas en laboratorio y trabajo personal. Las horas de dedicación al aprendizaje del diseño de los PCB para cada unidad temática se indican en la tabla I.

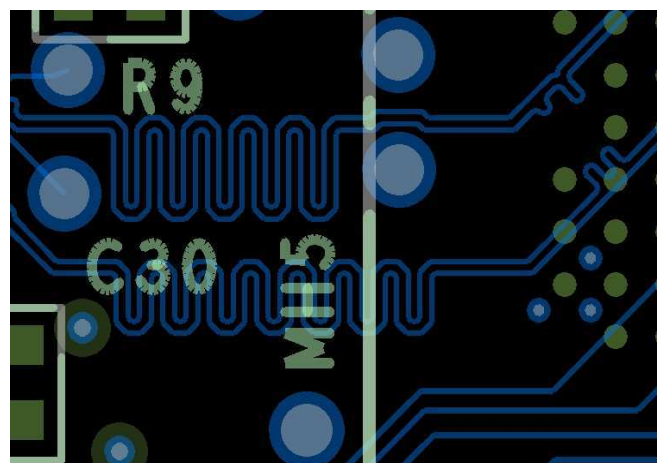


Figura 3. Detalle de líneas diferenciales de alta frecuencia en un PCB.

TABLA I. DEDICACIÓN A CADA UNIDAD TEMÁTICA

Unidad temática	Horas de clases magistrales	Horas de laboratorio	Horas de trabajo personal	Total horas
1	4	8	20	32
2	2	10	40	52
3	4	4	20	28
Total	10	22	80	112

La unidad temática 1, Preparación de los esquemáticos, sirve para hacer el vínculo con las asignaturas que aportan el esquema del circuito. En ocasiones también puede servir para diseñar un esquemático si un estudiante no participa de las otras asignaturas.

La unidad temática 2, diseño del circuito impreso básico, es la principal. A pesar de su duración no se puede dividir por la unidad de materia que presenta. Su impartición se puede extender durante 4 ó 5 semanas, pero no es conveniente extender mucho más la duración ya que se disgrega el esfuerzo y condiciona el aprendizaje.

Los contenidos de la unidad temática 3, Diseño del circuito impreso avanzado, solo se requieren impartir para el diseño de circuitos impresos de alta densidad o con líneas de alta frecuencia, por tanto se pueden impartir en función de la disponibilidad de medios y de tiempo.

El resto de la asignatura hasta los 6 créditos se completa con el aprendizaje del proceso de fabricación y varios seminarios sobre diseño para protección contra interferencias electromagnéticas, homologación de productos y el mercado de la electrónica.

VII. CONCLUSIONES

El diseño de los circuitos impresos normalmente no se imparte en las titulaciones de ingeniería con competencias en electrónica. No obstante es un elemento fundamental del producto electrónico.

Su enseñanza tiene una serie de particularidades que obligan a plantear la metodología de enseñanza combinando adecuadamente la enseñanza teórica, las prácticas con ordenador y una gran dedicación de horas por parte de los estudiantes.

La enseñanza del diseño de los circuitos impresos puede estar combinada con otras asignaturas que sirvan para proveer del esquemático del circuito a diseñar. También debe combinarse con una enseñanza del proceso de fabricación de los productos electrónicos.

En una época de crisis económica se debe buscar que la preparación de los futuros ingenieros sea práctica. Que aprendan a realizar productos acabados que reviertan en un incremento de la producción de la región y del país y a una mejora de la situación económica.

REFERENCES

- [1] M. Cai, D. J. Xie, Z. Zhang, B. Hu, X. X. Su, Y. Tao, B. Y., "Investigation on PCB pad strength", 11th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging (ICEPT-HDP), Xian 2010.
- [2] E.C.W. de Jong, L.A.Ferreira, P. Bauer, "3D integration with PCB technology", Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '06, Dallas 2006.
- [3] A. Geczy, Z. Illyefalvi-Vitez, "Investigating PCB traces for fine pitch applications", IEEE 16th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), Pitesti 2010.
- [4] J. Song, K. E. Hoover, E. Wheeler, "Effectiveness of PCB Simulation in Teaching High-Speed Digital Design", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC 2007, Hawaii.
- [5] E. F. Crawley, J. Malmqvist, W. A. Lucas, D. R. Brodeur, "The CDIO Syllabus", Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, January 2001, <http://www.cdio.org> (11 January 2012).
- [6] Microsoft Windows, "FreePCB", <http://www.freepcb.com>, (11 enero 2012).
- [7] DesignSpark, <http://www.designspark.com>, (11 enero 2012).
- [8] Fritzing, <http://fritzing.org>, (11 enero 2012).
- [9] Cadence, www.cadence.com (11 enero 2012).
- [10] A. Bueno y A. L. de Soto, "Desarrollo y construcción de prototipos electrónicos", Ed. Marcombo, 2005.
- [11] K. Mitzner, "Complete PCB Design Using OrCAD Capture and PCB Editor", Ed. Elsevier, 2009.
- [12] Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_EDA_software, (11 enero 2012).
- [13] Gerber Magic, <http://rbytes.net/software/gerbmagic-review>, (11 enero 2011).
- [14] Online Gerber Viewer, <http://www.gerber-viewer.com>, (11 enero 2012).
- [15] Gerardo Aranguren, Josu Etxaniz, Pedro M^a Monje, "La producción electrónica: una notable ausencia en la Universidad", TAAE 2012, Vigo, 2012.