

# Actividades prácticas en el ámbito de la compatibilidad electromagnética.

A.M. Pernía, A. Suárez, Juan A. Martín-Ramos, Pedro J. Villegas, J. Díaz  
Universidad de Oviedo-Área de Tecnología Electrónica  
Gijón, Spain. Email: [amartinp@uniovi.es](mailto:amartinp@uniovi.es)

**Resumen**—Uno de los aspectos frecuentemente olvidados en los programas de Máster relacionados con el mundo de la electrónica y automática es todo aquello que tiene que ver con la compatibilidad electromagnética. El conocimiento básico de los problemas derivados de las interferencias electromagnéticas (EMI) y las normas asociadas, complementa el perfil de nuestros titulados para enfrentarse al correcto diseño de los equipos electrónicos.

Con esta finalidad se presenta una selección de ensayos experimentales que pretenden mostrar al alumno las distintas técnicas de acoplamiento y sus efectos en los circuitos próximos.

El conocimiento de estos fenómenos nos permitirá aplicar las técnicas de prevención adecuadas ofreciendo al alumno los conocimientos básicos para un diseño electrónico correcto y una integración adecuada al entorno laboral, donde las normativas de compatibilidad electromagnética (EMC) son de obligado cumplimiento.

**Palabras Clave**—Compatibilidad electromagnética (EMC), interferencia electromagnética (EMI), emisión, inmunidad.

## I. INTRODUCCION

EL problema de la compatibilidad electromagnética ha ido adquiriendo mayor importancia a medida que las aplicaciones electrónicas se han difundido en todos los aspectos de la vida cotidiana. En la actualidad estamos rodeados de sistemas electrónicos tanto en el hogar como en el entorno profesional sin prestar atención a las emisiones electromagnéticas que provocan [1-5].

Sin entrar en los aspectos relativos a la seguridad de las personas, no cabe duda que diversidad de equipos y su gran abanico de aplicaciones ocasiona una emisión electromagnética en un amplio margen de frecuencias. Así nos podemos encontrar desde sistemas eléctricos alimentados a frecuencia de red, hasta dispositivos en el ámbito de las telecomunicaciones donde las señales alcanzan valores de frecuencia en el entorno del GHz, pasando por sistemas digitales trabajando a cientos de MHz.

Este abanico de señales y frecuencias emitidas contaminan nuestro entorno pudiendo provocar disfunciones en la operatividad de otros dispositivos.

No debemos olvidar que los profesionales que se forman hoy en día en aspectos relativos al diseño de equipos electrónicos y que en el futuro serán los encargados de realizar los diseños de los productos generados en nuestro entorno industrial, tendrán

forzosamente que enfrentarse al problema de la compatibilidad electromagnética.

La penetración en los mercados internacionales de nuestros diseños está condicionada por el cumplimiento de las normativas en EMC, en caso contrario dichos diseños no alcanzarán el objetivo deseado.

Por todo lo mencionado sería conveniente que los alumnos de Máster en los que con mayor probabilidad recaerán las tareas de diseño electrónico estén formados en conceptos básicos de EMC y en este aspecto la visualización práctica de los problemas derivados de las interferencias electromagnéticas juega un papel fundamental.

Con esta finalidad se plantean en este artículo una serie de actividades prácticas dentro del marco de una asignatura con un contenido de 6 créditos, que permita transmitir los conceptos teóricos básicos relativos a EMC [6].

## II. OBJETIVOS DIDÁCTICOS

El planteamiento que se propone a nivel didáctico para introducir al alumno en los aspectos fundamentales de la compatibilidad electromagnética [7-16] se centrará en los siguientes conceptos:

- Técnicas de acoplamiento (magnético, eléctrico impedancia común)
- Filtrado
- Diseño de PCB's (fuente-víctima)

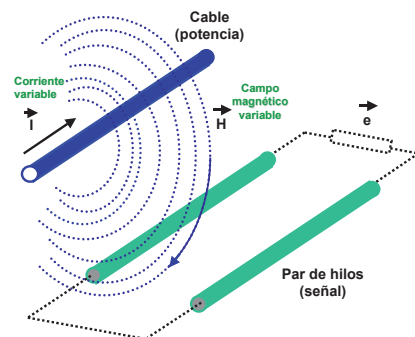


Fig.1 Acoplamiento magnético

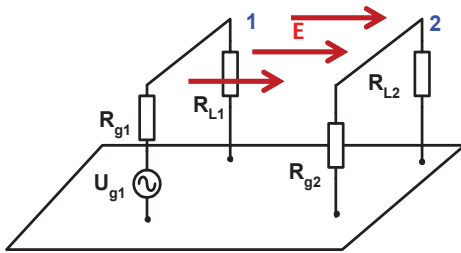


Fig.2 Acoplamiento eléctrico



Fig.3 Perla de ferrita TDK

Se persigue clarificar como la presencia de campos electromagnéticos (fig.1) tiene especial relevancia en el funcionamiento de los circuitos próximos (Emisión electromagnética). En este sentido identificar las técnicas de acoplamiento entre circuitos nos permitirá prevenir sus efectos, mediante la aplicación de reglas tan básicas como la minimización de bucles.

Los fenómenos capacitivos (fig. 2) son especialmente difíciles de identificar por los alumnos, es por ello que se plantean también durante la realización de las sesiones prácticas actividades de caracterización de las capacidades parásitas entre pistas y la determinación de la impedancia del camino formado a través de las mismas, para distintas frecuencias.

Una vez identificados los procesos de acoplamiento es conveniente introducir las técnicas de filtrado, para lo cual se distinguen entre las corrientes de modo común y modo diferencial. Habitualmente dicho filtrado recae en la presencia de bobinas que incrementan la impedancia del camino recorrido por las corrientes. Para facilitar la colocación de estas bobinas de filtro se recurre a la utilización de “perlas” de ferrita (fig.3) y su correcto emplazamiento redundará en la atenuación de las señales ruidosas.

La identificación de la problemática derivada de la presencia de corrientes en modo común y diferencial permitirá al alumno razonar sobre la adecuada colocación de las ferritas en función de las señales que se desean atenuar.

Finalmente el acoplamiento por la presencias de impedancias comunes a varios circuitos, es una causa muy común de problemas en el diseño de circuitos impresos (PCB).

Por lo tanto la visualización práctica de cómo afecta la presencia de una impedancia compartida por dos circuitos con distinta funcionalidad permite afianzar los conocimientos al diseño práctico de PCB's y la necesidad de un correcto uso de los planos de masa, o del ruteado de las pistas.

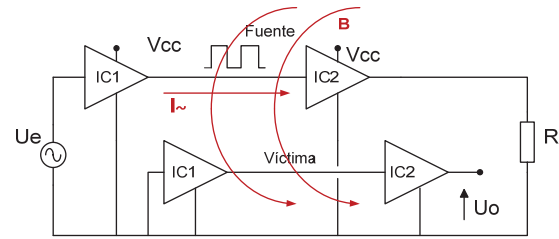


Fig.4 Efecto fuente-víctima

Como compendio de lo ya comentado se considera interesante la caracterización práctica de las señales de ruido obtenidas como consecuencia de una interconexión incorrecta de dos amplificadores por la presencia de bucles en el trazado de las conexiones de masa. Esta interconexión incorrecta contribuye de igual forma a identificar fenómenos no solo de emisión sino también de inmunidad, observándose como circuitos próximos pueden ser susceptibles al entorno existente, y por lo tanto actuando como víctima de la fuente de ruido (fig. 4).

### III. METODOLOGÍA

Siguiendo los tres puntos básicos se plantean a continuación una serie de actividades prácticas que pueden desarrollarse tanto en asignaturas específicas de EMC como aquellas asignaturas relacionadas con el diseño electrónico en las que los aspectos de EMC son transversales a los conocimientos específicos.

#### A. Acoplamiento magnético

Con el objetivo de observar como dos circuitos pueden verse acoplados mediante el campo magnético creado por uno de ellos, nos basta con un simple ensayo en el que se alimenta una carga desde un generador y se mide en un bucle próximo ( $A_e$ ) la tensión inducida (fig.5). Conociendo con precisión las dimensiones del interconexionado es posible estimar la tensión inducida en el circuito víctima sin más que aplicar la ley de Faraday

$$u = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = A_e \cdot \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

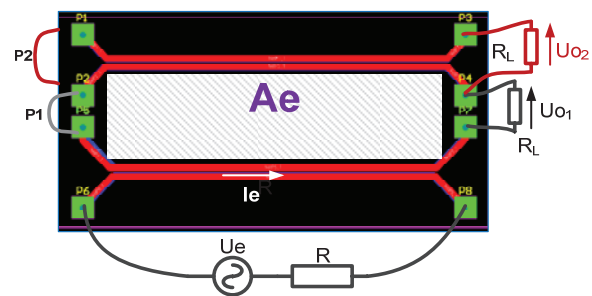


Fig.5 Acoplamiento magnético entre dos circuitos

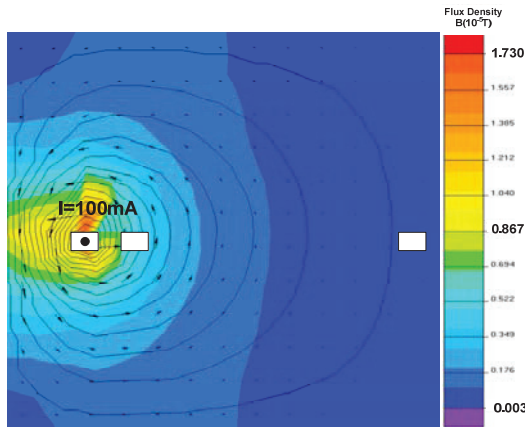


Fig.6 Simulación con elementos finitos del campo creado por un conductor por el que circulan 100mA

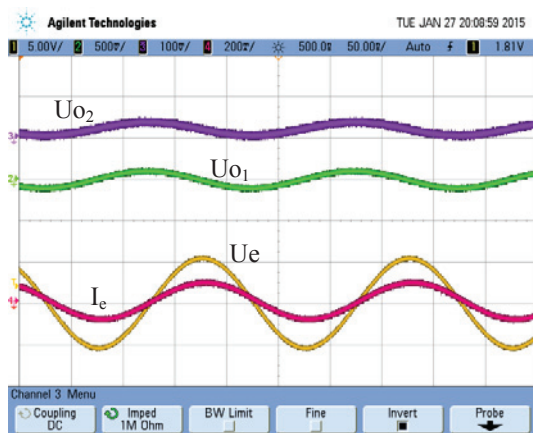


Fig.7 Tensión inducida  $U_{o1}$ ,  $U_{o2}$  debida al acoplamiento magnético según el esquema de la fig.5.

Variando la frecuencia de la fuente  $U_e$  se observa la influencia de la frecuencia en la tensión inducida. Por otra parte mediante un programa de elementos finitos de libre difusión como el Quick Field se puede determinar el campo que alcanza el bucle central y comprobar teóricamente los resultados obtenidos (fig.6).

Reduciendo el área efectiva en el circuito víctima (cerrando el puente P2 y eliminando P1, fig.5) se observa cómo se minimiza el efecto del campo generado sobre el circuito víctima, reduciéndose la tensión de salida  $U_{o2}$ . En la figura 7 se muestran los resultados cuando la frecuencia de entrada es de 5MHz, las resistencia de carga  $R_L=1k\Omega$  y  $R=56\Omega$

### B. Acoplamiento eléctrico

Otro de los procesos de acoplamiento típicos entre circuitos es el que ocasionan los campos eléctricos presentes entre los elementos conductores de la placa. Estos campos eléctricos podemos modelarles como condensadores parásitos y por lo tanto su comportamiento será el de una impedancia de valor  $x_c=1/j\omega C$  dependiente de la frecuencia.

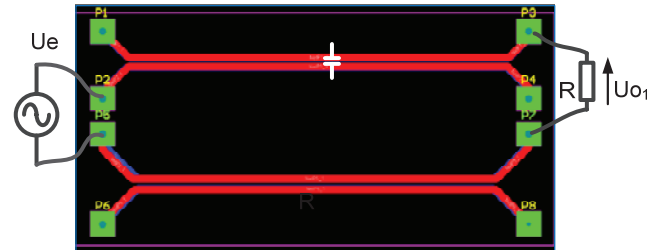


Fig.8 Efecto del acoplamiento eléctrico entre conductores

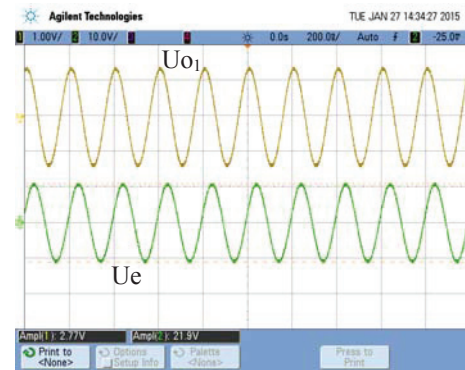


Fig.9 Tensión inducida  $U_{o1}$  debida al acoplamiento eléctrico.  $F=5\text{MHz}$ ,  $R_L=1k\Omega$ .

En el circuito de la figura 8 se observa la presencia de la capacidad parásita entre pistas. El alumno puede incrementar la frecuencia de la tensión de entrada  $U_e$  para minimizar el valor de dicha impedancia, haciéndose más patente el acoplamiento eléctrico lo que va a provocar el incremento de la tensión de salida  $U_{o1}$ . La figura 9 muestra la tensión  $U_{o1}$  obtenida a una frecuencia de 5MHz con una carga de  $1k\Omega$ , siendo la tensión de entrada  $U_e=10V_{pp}$ .

La atenuación de este fenómeno como es obvio, pasa por la reducción de las capacidades parásitas o el apantallamiento eléctrico de las zonas sensibles del circuito.

### C. Acoplamiento por impedancia común

El tercer método de acoplamiento entre circuitos que es conveniente identificar se trata del acoplamiento por impedancia común. En este caso la presencia de un elemento común a varios circuitos provoca que las corrientes generadas por cada circuito introduzcan señales de ruido en el resto.

Un ejemplo clarificador lo encontramos en la conexión de varios amplificadores que comparten una masa común con otro circuito de potencia (fig. 10). Las corrientes circulantes por el circuito de potencia provocan un incremento de tensión en la conexión de masa del segundo amplificador, por lo que este amplificará la señal del primer amplificador más la tensión que aparece en la impedancia común del circuito de masa (fig. 11).

Se tiene por lo tanto una distorsión en el proceso de amplificación debido a la mala conexión de masa entre los distintos circuitos.

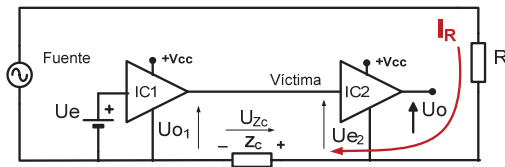


Fig.10 Conexión de dos amplificadores de ganancia  $G=2$  con la presencia de una impedancia común en el circuito de masa

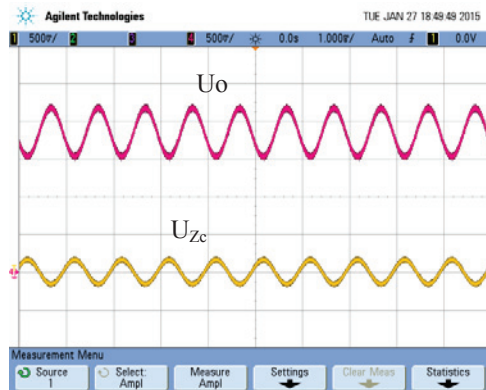


Fig. 11 Tensión de salida  $U_o$  obtenida en el circuito de la fig. 10 cuando hacemos pasar una corriente  $I_R=300mA$

Este fenómeno permite identificar una problemática muy común en el diseño de PCB's con la incorporación de planos de masa que son compartidos por circuitos con distinta funcionalidad o características dando lugar a interferencias entre ellos.

En la figura 10 se muestra un sencillo circuito de amplificación que permite visualizar experimentalmente el efecto de la impedancia común presente en la masa de ambos circuitos.

#### D. Filtrado

Identificados los problemas derivados del acoplamiento entre las distintas partes de un circuito es conveniente mostrar al alumno algunas técnicas de filtrado. Para ello y una vez que se han descrito a nivel teórico la diferencia entre corrientes de modo común y diferencial, se plantea una actividad práctica en la que se observa la atenuación que introduce una ferrita, colocada enlazando dos conductores por lo que pasarán corrientes en modo diferencial (MD) y modo común (MC). Se utiliza para ello la placa de la figura 5 con las conexiones que se indican en la figura 12.

En la figura 13 se observa la atenuación conseguida de las corrientes en modo común, esta atenuación está directamente condicionada por la frecuencia de trabajo ya que la ferrita incrementa el efecto inductivo del camino recorrido por dichas corrientes. El alumno puede variando la frecuencia observar la variación en la atenuación así como la inoperatividad del filtro cuando las corrientes circulantes son en modo diferencial (fig. 13).

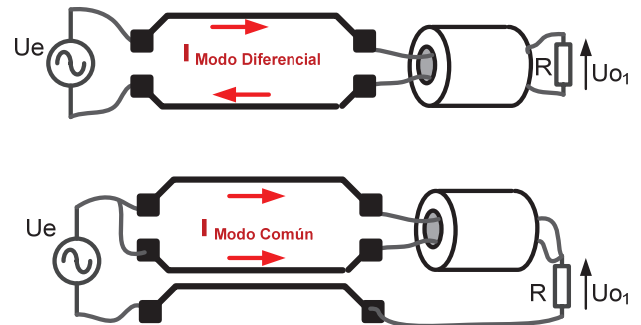


Fig. 12 Atenuación de corrientes en modo común y diferencial

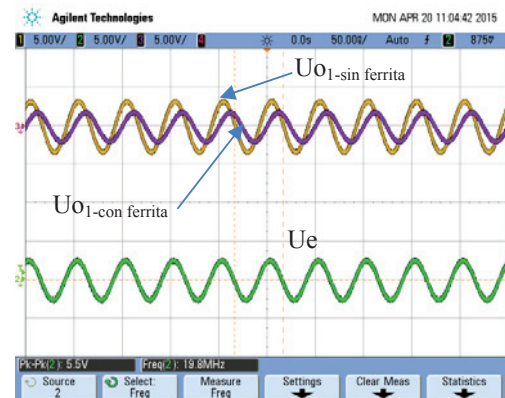


Fig. 13 Atenuación de corrientes en modo común al colocar una ferrita Ref 2643102002 de Fair-Rite.  $R=1k\Omega$ ,  $f=20MHz$ .

También parece oportuna la incorporación de condensadores tanto en MC como MD para generar filtros de segundo orden en los que fácilmente puede comprobarse su atenuación a nivel teórico y experimental.

#### E. Emisión

Una vez identificada la problemática relacionada con los procesos de acoplamiento entre circuitos y con el objetivo de introducir al alumno en las técnicas de ensayo de emisión definidas por la normativa EN 61000-6-3. Se plantea medir en una cámara semianecoica la señal senoidal procedente de un generador de ondas en el que se fija una frecuencia de 5MHz (Fig.14). Esta señal por quedar fuera del ancho de banda característico (30MHz-1GHz) de las emisiones radiadas, no aparece reflejada durante el ensayo de emisión según la norma EN-55022. Tan solo se observan (fig. 15-a) algunos armónicos por encima de los 100MHz debidos a las propias emisiones del generador de ondas.

En cambio cuando la senoide se transforma en una onda cuadrada a la misma frecuencia y ciclo de trabajo  $d=0.5$ , el espectro se inunda de armónicos. Se considera una práctica interesante, haciendo uso de la descomposición en armónicos de Fourier de la onda cuadrada generada, identificar en la figura 15-b el primer armónico de menor frecuencia que aparece en la medida de emisión radiada (ej. 7°).



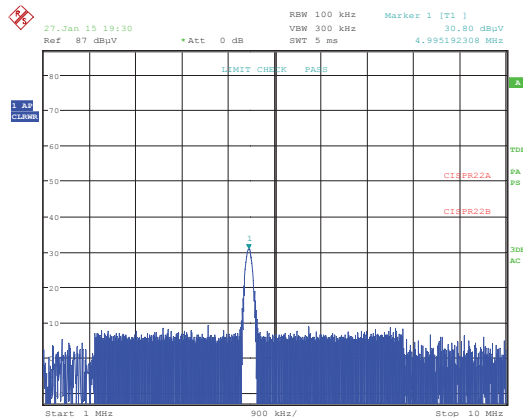
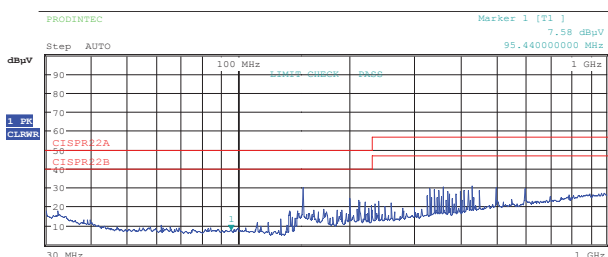
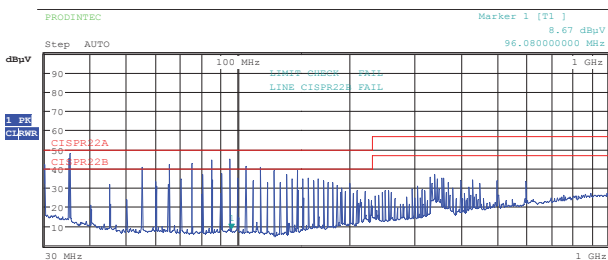


Fig. 14 Medida de un único tono a 5MHz con el receptor Rohde&Schwarz 20Hz-8GHz .



(a)



(b)

Fig. 15 Medida de una señal (a) senoidal (b) cuadrada d=50% de frecuencia 5MHz en cámara semianecoica (polarización horizontal).



Fig. 16 Cámara semianecoica de pre-certificación

## F. Inmunidad

La interacción entre circuitos es otro aspecto relevante a estudiar. Centrándonos en la inmunidad radiada, con un esquema como el mostrado en la figura 17, se puede medir la interacción entre dos circuitos aislados galvánicamente.

El ruido electromagnético producido por el circuito fuente induce unos transitorios a la salida de una etapa de amplificación (víctima). Este planteamiento permite analizar cómo afecta la distancia y frecuencia de conmutación en el

ensayo (fig.18). A continuación (fig 20) se muestran las PCB's que incorporan por un lado las conexiones entre los dos amplificadores y por otro el transistor IRF540 encargado de inducir el ruido electromagnético durante el proceso de conmutación. Destacar el amplio bucle de masa "A", realizado para maximizar el efecto del acoplamiento electromagnético.

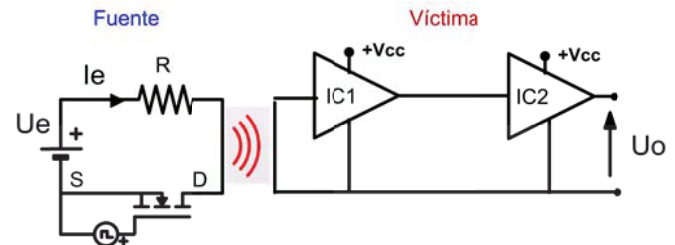


Fig. 17 Efecto de la radiación electromagnética debida a circuitos próximos.  $U_e=7V$ ,  $R=15\Omega$  .

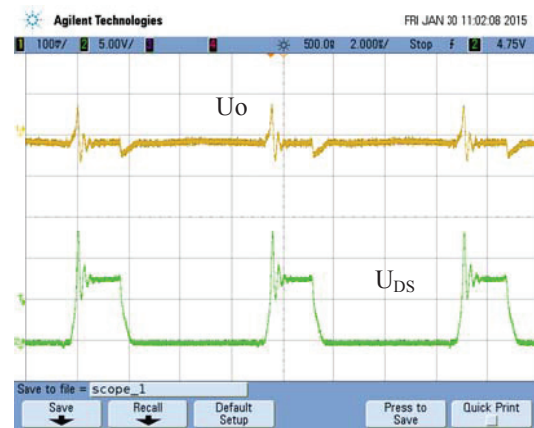


Fig. 19 Tensión inducida a la salida de los amplificadores operacionales cuando existe en las proximidades un interruptor conmutando.

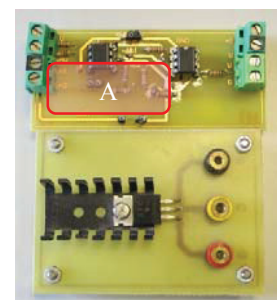


Fig. 20. En la parte superior circuito correspondiente a la interconexión entre los dos amplificadores de la Fig. 17. En la parte inferior se muestra el Mosfet utilizado en el proceso de conmutación

## IV. RESULTADOS OBTENIDOS

En el marco del Máster en Conversión de Energía Eléctrica y Sistemas de Potencia impartido en la Universidad de Oviedo se incluye una asignatura específica de EMC. Las prácticas planteadas en el presente artículo han sido llevadas a cabo en el transcurso de dicha asignatura. Para evaluar la efectividad de estas prácticas en aspectos relativos al diseño de PCB's, se

ha planteado la realización de un trabajo individual en el que cada alumno ha tenido que afrontar el diseño de un convertidor cc/cc electrónico. Independientemente del tipo de convertidor (elevator, puente completo, etc.) estos alumnos afrontan su primer diseño de una etapa de potencia durante su primer curso.

La evaluación se centra en los siguientes aspectos:

- Correcta incorporación de planos de masa
- Segregación de circuitos según su funcionalidad
- Correcta interconexión de señales ruidosas (Ej. Driver)
- Minimización de bucles y correcto cableado
- Incorporación de filtros y protección contra sobretensiones.

De todos los alumnos evaluados en estos aspectos (24 alumnos) prácticamente la totalidad fue capaz de segregar los circuitos según su funcionalidad y crear distintos planos de masa para cada uno de ellos.

El 87% de ellos trató en sus diseños de minimizar la realización de bucles, con un correcto trazado de las pistas en la PCB, dadas las limitaciones geométricas existentes.

En el 95% de los casos el cableado fue correcto, teniéndose especial cuidado en la interconexión del driver con el Mosfet de potencia.

Los puntos más débiles del diseño recayeron en la incorporación de los filtros adecuados y de los supresores de transitorios. Un 63% incorporó condensadores de desacople y choques.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado a través del Plan de Ciencia Tecnología e Innovación del Principado de Asturias, (Ref: FC-15-GRUPIN14-122)

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] Henry Ott, "Electromagnetic Compatibility Engineering," Ed. Willey, 2009.
- [2] Normas EN 61000-x-x
- [3] Josep Balcells, Francesc Daura, Rafael Esperanza y Ramón Pallás. "Interferencias Electromagnéticas en Sistemas Electrónicos". Ed.: Marcombo, 1992.
- [4] C. R. Paul (2006), Introduction to Electromagnetic Compatibility, John Wiley & Sons, Second Edition, 2006
- [5] J.L. Sebastián, "Fundamentos de Compatibilidad Electromagnética", Addison-Wesley, 2006
- [6] Asignatura EMC, Máster en Conversión de Energía Eléctrica y Sistemas de Potencia, <http://mastereecps.uniovi.es/>.
- [7] Cavka, D. ; Rachidi, F. ; Poljak, D. "On the Concept of Grounding Impedance of Multipoint Grounding Systems". IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Volume: 56 , Issue: 6. 2014 , Page(s): 1540 – 1544
- [8] Chada, A.R. ; Jun Fan ; Drewniak, J.L. ; Mutnury, B. "Estimation of mode conversion and crosstalk impact from a single-ended aggressor to a differential victim using statistical BER analysis". Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2014 IEEE 64th 2014 , Page(s): 2081 – 2087

- [9] Wainwright, N. "Understanding the importance of administrative compliance". International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe), 2014 . Page(s): 35 – 39
- [10] Armstrong, K. "Cost-effective Risk Management of EMC without special EMC design expertise or testing". IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 2013. Page(s): 386 - 391
- [11] Y. Zhao y K. Y. See, "A practical approach to EMC education at the undergraduate level", IEEE Transactions on Education, vol. 47, n° 4, pp. 425-429, nov. 2004.
- [12] X. Tong, D. W. P. Thomas, A. Nothofer, P. Sewell, y C. Christopoulos, «Modeling Electromagnetic Emissions From Printed Circuit Boards in Closed Environments Using Equivalent Dipoles», IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 52, n° 2, pp. 462-470, may 2010.
- [13] K. Yazbek y O. Harfoush, "Practical EMC considerations in designing PCB for RF and microwave communications systems", en RF and Microwave Conference, 2008. RFM 2008. IEEE International, 2008, pp. 148-152.
- [14] E. Sicard y A. Boyer, "Enhancing engineers skills in EMC of integrated circuits: A practical experience using IC-EMC", en 2011 8th Workshop on Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo), 2011, pp. 115-118.
- [15] T.-L. Wu, F. Buesink, y F. Canavero, "Overview of Signal Integrity and EMC Design Technologies on PCB: Fundamentals and Latest Progress", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 55, n. 4, pp. 624-638, ago. 2013.
- [16] V. Kus y P. Drabek, "The education of EMC -the strategy and teaching overview at the UWB", en 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 2011, pp. 976-981.