

VISITA VIRTUAL A UN LABORATORIO DE MICROONDAS

YEBRAS RIVERA, José Manuel ⁽¹⁾; **ANTORANZ CANALES, Pedro** ⁽²⁾; **SEBASTIÁN FRANCO, José Luis** ⁽³⁾; **SANCHO RUIZ, Miguel** ⁽⁴⁾; **MARTÍNEZ LÓPEZ, Genoveva** ⁽⁵⁾; **JIMÉNEZ RODRÍGUEZ, José Juan** ⁽⁶⁾; **MIRANDA PANTOJA, José Miguel** ⁽⁷⁾; **MUÑOZ SAN MARTÍN, Sagrario** ⁽⁸⁾

Departamento de Física Aplicada III (Electricidad y Electrónica), Facultad de Ciencias Físicas,
Universidad Complutense de Madrid
Madrid, España

⁽¹⁾ jmyebras@ucm.es

⁽²⁾ antoranz@ucm.es

⁽³⁾ jlsf@fis.ucm.es

⁽⁴⁾ sancho@ucm.es

⁽⁵⁾ genoveva@ucm.es

⁽⁶⁾ josejrr@ucm.es

⁽⁷⁾ miranda@ucm.es

⁽⁸⁾ smsm@ucm.es

Resumen

Los objetivos fundamentales de este trabajo son poner a disposición de los docentes una herramienta multimedia que complemente las explicaciones teóricas del aula y proporcionar a los estudiantes un primer acercamiento al trabajo de laboratorio relacionado con los campos electromagnéticos. Se han realizado cinco videos en los que se describe el manejo de la instrumentación, se presentan los esquemas experimentales típicos y se hacen demostraciones en tiempo real de medidas y análisis de resultados. Los videos se complementan con presentaciones que inciden en la relación entre los aspectos teóricos y las experiencias narradas en los videos. Con este material se introduce al alumno en el uso de instrumentos tales como analizadores de redes y de espectros, osciloscopios de alta frecuencia, generadores de funciones, medidores de campos electromagnéticos, etc. Los contenidos abarcan: caracterización de señales en los dominios del tiempo y de la frecuencia; caracterización de distintos tipos de antenas y estudio de discontinuidades en guías de onda; medición de campos EM en entornos reales y su interpretación; revisión de los conceptos básicos de fotodetectores de ultra-alta sensibilidad y de la información que proporcionan y cómo explotarla. Estos materiales son totalmente públicos y de acceso abierto, estando disponibles en una página web dedicada, así como en Complumedia, y se están empleando como parte del adiestramiento de los estudiantes que realizan sus trabajos de fin de estudios en el ámbito de nuestro grupo.

Palabras clave: Instrumentación, campos electromagnéticos, analizadores de redes y de espectros, fotodetectores de ultra-alta sensibilidad.

Abstract

Virtual tour of Microwave laboratory

The main objectives in this work are to make available to teachers a multimedia tool to refine the theoretical explanations and to provide to students a first view of the laboratory work related with electromagnetic fields. Five videos are provided where the management of the instrumentation and the typical setups are described and real-time demonstrations on measurements and results analysis are done. Videos are complemented with slides that highlight the relation between theoretical aspects and experiences shown in the videos. This material introduces to student in the management of instruments such as networks and spectra analyzers, high frequency oscilloscopes, functions generators, electromagnetic fields meters, etc. Contents encompass: signals characterization in both

the time and the frequency domains; characterization of different types of antennas and the study of discontinuities inside waveguides; measurement of EM fields at real locations and its interpretation; revision of basic concepts related with ultra-high sensitivity photodetectors and data that they provide and how to use them. These materials are totally public and open access, are available in a dedicated web page, as well as in Complumedia, and are being used as a fundamental part of the training of new students that decide to do their final degree works in the scope of our group.

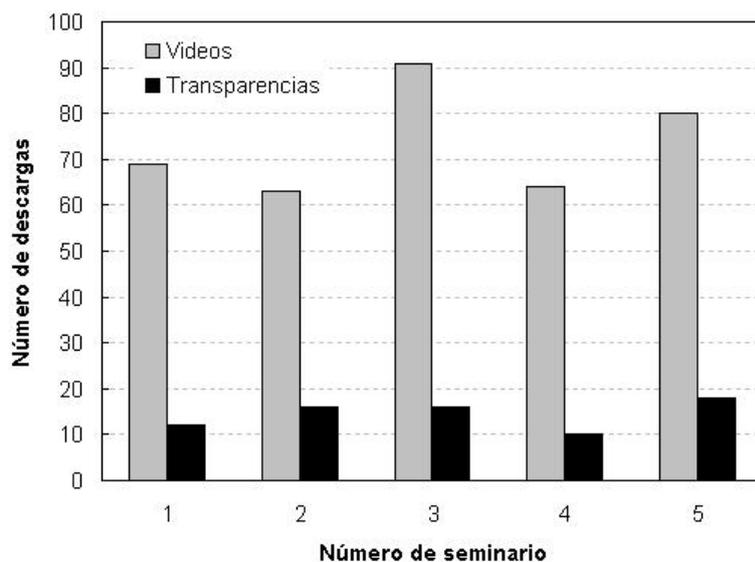
Keywords: Instrumentation, electromagnetic fields, networks and spectra analyzers, ultra-high sensitivity photodetectors.

1. Introducción

Este proyecto surge con dos objetivos prioritarios. Por un lado está la idea de desarrollar un material multimedia que ofrezca demostraciones experimentales y que sirva a los docentes como complemento a las explicaciones teóricas del aula. Por otra parte, dicho material se configura como la herramienta que los estudiantes pueden utilizar como guía básica de referencia del trabajo que les espera en el laboratorio. El ámbito de conocimiento del proyecto está relacionado con el electromagnetismo y con la detección ultra-sensible de luz pulsada. Se pretende que los alumnos comprendan conceptos importantes mediante su observación práctica, que conozcan la instrumentación que suele utilizarse en el laboratorio y cómo usarla y que tomen conciencia de las aplicaciones prácticas reales que van más allá de lo que se explica en clase. Así, por ejemplo, se intenta que los alumnos establezcan con claridad la relación existente entre los dominios del tiempo y de la frecuencia para el tratamiento y análisis de señales eléctricas, que aprendan a obtener los parámetros de dispersión de una red de microondas, que sepan caracterizar dispositivos tales como antenas y elementos reactivos en guías de ondas, que conozcan los sensores empleados para la medida práctica de campos eléctricos y magnéticos, que aprendan a montar un esquema de fotodetección ultrasensible y sepan cómo sacar partido a la información que proporcionan los fotodetectores, etc. Conceptos habituales en el aula tales como formas de onda, transformada de Fourier, espectros, parámetros de dispersión, intensidad de campo, diagrama de radiación, impedancias, susceptancias, histogramas, etc., se manejan con soltura en los seminarios revelando su inexorable conexión con los contenidos estudiados por el alumno anteriormente desde un punto de vista eminentemente teórico. El perfil de alumno que puede beneficiarse de estos seminarios es el estudiante de grado o máster en física, ingeniería electrónica o similares. En nuestra facultad se está recomendando su uso a los estudiantes de los grados en física y en ingeniería de electrónica de comunicaciones, así como a los que cursan los distintos másteres de física aplicada y física biomédica. También se está empleando como parte del adiestramiento básico de los alumnos que se incorporan a nuestro grupo a realizar su trabajo de fin de estudios.

Este trabajo está englobado en los proyectos de innovación docente de la Universidad Complutense de Madrid (en su convocatoria de 2013) y está formado por cinco seminarios. Todos los seminarios tienen una estructura básica común. En una primera parte se introduce el tema sobre el que versa el seminario y se discuten algunos aspectos teóricos. En la segunda parte se presentan los instrumentos y esquemas experimentales habituales y se realizan demostraciones orientadas a verificar la teoría o a realizar medidas típicas de caracterización. En una primera fase del proyecto se ha decidido incluir seminarios no demasiado largos (todos ellos duran menos de 45 minutos), no demasiado especializados y autoexplicativos. Tanto los videos como las transparencias empleadas para la ilustración de conceptos teóricos son accesibles de forma pública a través de una página web dedicada [1] y desde la plataforma institucional Complumedia [2]. El título de cada seminario describe con bastante claridad la temática que será tratada: (1) Caracterización de señales en el dominio de la frecuencia [3]-[6], (2) Caracterización de antenas [7]-[10], (3) Caracterización de componentes reactivos en guías de onda [11]-[13], (4) Medidas de campos electromagnéticos: medidas de campo [14]-[17] y (5) Experiencias de laboratorio con fotodetectores de alta sensibilidad [18]-[21]. 0 muestra el número de descargas de los materiales multimedia del proyecto incluidos en Complumedia desde la fecha en que fueron puestos a disposición del público.

El presente proyecto acumula las lecciones aprendidas por parte de nuestro grupo a través de un buen número de actividades docentes innovadoras previas. Entre las actividades que avalan el interés y utilidad de la Visita Virtual al Laboratorio de Microondas cabe destacar las siguientes: (1) Desarrollo de webminars para asignaturas del área de electromagnetismo (curso 2011-2012), (2) Adaptación del Laboratorio de Electrodinámica al EEES (curso 2009-2010), (3) Laboratorio Virtual para las asignaturas de Ingeniería Electrónica (curso 2005-2006) y (4) Laboratorio de simulación para asignaturas de electromagnetismo (curso 2000-2001).



1. Señales en el dominio de la frecuencia
2. Caracterización de antenas
3. Caracterización componentes en guías de onda
4. Medidas de campos electromagnéticos
5. Fotodetectores de alta sensibilidad

0 Número de descargas del material multimedia disponible en Complumedia desde el 26 de noviembre de 2013 hasta el 4 de diciembre de 2014

2. Descripción del proyecto

En este epígrafe se describen los seminarios que conforman el proyecto en la actualidad, presentando sus objetivos y los contenidos que se abordan en cada una de sus partes. Además, en ocasiones, se llama la atención sobre aspectos formativos relevantes que el seminario consigue aportar al estudiante y que podrían pasar inadvertidos. 0 ofrece una muestra de fotogramas de los seminarios.

2.1. Caracterización de señales en el dominio de la frecuencia

Este seminario trata de mostrar al alumno la potencia que ofrece el dominio de la frecuencia para el análisis de señales eléctricas. Para ello, comenzamos con un recordatorio de la definición y algunas de las propiedades fundamentales de la transformada de Fourier, la herramienta matemática que facilita la conversión de señales del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia [22]. Se ofrecen algunos ejemplos interesantes de transformadas de funciones típicas, como las de un pulso rectangular, una señal sinusoidal o un tren de deltas de Dirac. Estos ejemplos ayudan a comprender con claridad los resultados que se obtienen en las demostraciones de la segunda parte del seminario. Además, se incide en una de las capacidades más interesantes que ofrece esta herramienta, que es la de poder extraer información de señales muy débiles y/o contaminadas por ruido. La parte descriptiva finaliza repasando las modulaciones analógicas más comunes y mostrando el espectro típico que encontramos ante una modulación de amplitud [23].

La segunda parte del seminario trata de verificar buena parte de la discusión precedente mediante demostraciones en las que se estudian conjuntamente señales en los dominios del tiempo y de la frecuencia. Para ello se utiliza un generador de funciones de última generación con sus dos canales de salida ofreciendo exactamente la misma señal. Uno de ellos se deriva a un osciloscopio, mientras que el otro se lleva a un analizador de espectros. En primer lugar se verifica que el espectro de una señal sinusoidal resulta ser una pseudo-delta centrada en la frecuencia característica del seno. También se muestra cómo utilizar las herramientas del analizador para localizar picos y hacer una lectura de la potencia que porta la señal. Seguidamente se modula una señal en amplitud y se comprueba que la delta correspondiente a la señal portadora queda flanqueada por dos deltas situadas a una distancia de aquélla igual a la frecuencia de la señal moduladora. Se muestra cómo el índice de modulación afecta a las amplitudes de las bandas laterales, mientras que la amplitud de la portadora permanece inalterada. En este punto se comprueba empíricamente cómo una señal

aparentemente no modulada en el dominio del tiempo sí revela la modulación en el dominio de la frecuencia. Este hecho demuestra con claridad la afirmación anterior acerca de la alta sensibilidad que ofrece el dominio espectral para el análisis de señales. Finalmente se estudia el espectro típico que obtenemos ante una señal periódica. El alumno comprueba cómo la envolvente del tren de deltas resultante se ajusta al módulo de la transformada de Fourier de la señal básica repetida, tal y como predice la teoría. Se muestra también cómo la separación de las deltas y la anchura de los lóbulos se corresponden con los inversos de la frecuencia de repetición y la duración del pulso básico respectivamente. Y además se llama la atención del alumno en relación con el aumento de la amplitud del espectro según aumenta la frecuencia de repetición, esto es, según aumenta la potencia de la señal.

2.2. Caracterización de antenas

La primera parte de este seminario consiste en una descripción general de las antenas y de sus parámetros característicos. En primer lugar se ofrece la definición de antena y se muestra la ecuación general del campo eléctrico radiado en función de la corriente que circula por la antena, de los ángulos polar y azimutal y de la distancia considerada. A continuación se explican los parámetros más interesantes a la hora de caracterizar un dispositivo radiante, como son el diagrama de radiación, la directividad, el lóbulo principal, el nivel de los lóbulos secundarios, el ancho de haz a 3 decibelios y el ancho de banda de la estructura [24], [25]. Una vez establecidos los conceptos básicos, la segunda parte del seminario aborda la caracterización experimental de una antena de bocina piramidal y de una antena de parche o microstrip. La confrontación de dos antenas de bocina permite determinar muy fácilmente el diagrama de radiación de la antena que actúa como receptora. Un generador alimenta a la antena transmisora con una frecuencia característica, en este caso de 9 GHz. La antena receptora se ubica en un taburete graduado que permite variar el ángulo relativo entre ambas antenas. Variando el ángulo entre las antenas y midiendo el nivel de señal detectado para cada uno de ellos mediante un analizador de espectros se obtiene el conjunto de datos que permite obtener el diagrama de radiación de la antena (en coordenadas polares o cartesianas). La experiencia se completa con un análisis del diagrama de radiación medido, lo cual permite poner números a los parámetros caracterizadores ya mencionados. Por ejemplo, se obtiene que la anchura del lóbulo principal es de 59° , el ancho de haz a 3 dB es de 26° y que el máximo del lóbulo secundario mayor está 23 dB por debajo del máximo del lóbulo principal. Todo ello confirma que la antena concentra su operación en las inmediaciones del ángulo $\theta = 0^\circ$ y que la pérdida de radiación en forma de lóbulos secundarios queda bastante reducida. Por ello, puede concluirse que el comportamiento de la antena entra perfectamente dentro de lo esperable.

La segunda experiencia consiste en verificar si una antena de parche [24] diseñada para trabajar a una frecuencia de 3 GHz tiene un comportamiento adecuado. Comenzamos con una descripción general de este tipo de antenas y hablando brevemente acerca de sus ventajas y limitaciones. Seguidamente se muestra con detalle cómo obtener el coeficiente de reflexión de la antena mediante un analizador vectorial de redes, detallando también el proceso de preparación del instrumento, el cual incluye su calibración mediante un kit de cargas estándar. En el video se muestra cómo el módulo del coeficiente de reflexión obtenido es esencialmente plano en todas las frecuencias bajo estudio a excepción de 2.91 GHz y sus inmediaciones (ancho de banda de 200 MHz), donde se observa un pico que desciende 12 dB. La magnitud de esta caída permite concluir que la eficiencia de radiación de la antena es buena, teniendo en cuenta las limitaciones que este tipo de tecnología impone en términos de eficiencia. El video también muestra cómo obtener e interpretar el coeficiente de reflexión en términos de fase o mediante el diagrama de Smith.

2.3. Caracterización de componentes reactivos en guías de onda

La primera parte de este seminario se dedica a describir la utilidad de las discontinuidades en guías de onda y sus tipos más habituales [26], [27]. Las discontinuidades se utilizan para forzar desfases en los campos propagados por la guía o para lograr la adaptación de cargas. Las discontinuidades generan acumulaciones locales de campo, eléctrico o magnético, de modo que vienen a comportarse como elementos reactivos, capacidades e inductancias respectivamente. En primer lugar se discute la discontinuidad rectangular (también llamada iris o diafragma) que ofrece un comportamiento capacitivo. Consiste en una delgada lámina conductora colocada perpendicularmente a la dirección de propagación, cubriendo la totalidad del borde largo de la guía y tan solo una parte del borde corto de la misma. Este obstáculo impone unas condiciones de contorno cuyo cumplimiento conduce a una acumulación de líneas de campo eléctrico en el extremo de la lámina, en torno a su centro y por ambas caras.

También se discute el iris inductivo, consistente en una lámina conductora muy delgada que se coloca perpendicularmente a la dirección de propagación. El iris inductivo reduce localmente la sección de la guía, disminuyendo la diferencia entre la anchura y la altura de la misma. Debido a la distribución de campos en el modo fundamental, la corriente en las paredes laterales de la guía es perpendicular a la dirección de propagación. De este modo la lámina se comporta como un soporte adicional para las líneas de corriente y favorece la acumulación local de campo magnético. Seguidamente se muestran los modelos circuitales para los iris capacitivos, inductivos y capacitivo-inductivos (o resonantes) para configuraciones simétricas y asimétricas y se presenta la expresión de la susceptancia normalizada que el método variacional ofrece para cada uno de ellos. También se discuten otras geometrías posibles, como la circular o la formada por una lámina vertical en medio de la guía de ondas.

La segunda parte del seminario ofrece una experiencia real de laboratorio en la que se realizan las operaciones que permitirán medir la susceptancia de un iris. Se muestran los distintos elementos del montaje experimental, formado fundamentalmente por un generador, seguido de un aislador, un ondámetro y una guía de ondas ranurada. El extremo de la guía ranurada queda conectado a otro tramo de guía en cuyo interior se ubica el iris a caracterizar y cuyo extremo libre queda conectado a una carga adaptada. La sonda de la guía ranurada se conecta a un medidor de relación de onda estacionaria (ROE). En primer lugar, el video muestra cómo medir, de dos formas distintas, la longitud de onda de la perturbación electromagnética existente en el interior de la guía. El uso del ondámetro ofrece un valor más preciso. Para ello se sitúa la sonda de la guía ranurada en un máximo de la onda estacionaria (lectura de ROE pequeña, próxima a 1) y variamos el tornillo micrométrico del ondámetro hasta que se obtiene una absorción de energía (lectura de ROE mayor). En ese momento la escala roja del micrómetro del ondámetro ofrece directamente la longitud de onda en centímetros. La otra posibilidad de medida consiste en mover la sonda de la guía ranurada entre dos máximos o dos mínimos consecutivos. Localizamos un mínimo de la onda estacionaria (lectura de ROE alta) y anotamos la posición que ocupa la sonda en esos momentos según la dirección de propagación. A continuación movemos la sonda y observamos cómo la ROE se reduce primero y vuelve a aumentar después. La segunda lectura alta marca la posición del mínimo de la onda estacionaria adyacente al localizado anteriormente. Anotamos la posición de este segundo mínimo. La diferencia entre las localizaciones de ambos mínimos ofrece la semilongitud de onda de la perturbación. Siguiendo esta misma dinámica el video explica cómo medir el coeficiente de reflexión correspondiente al iris que se está empleando. Se localiza un máximo de la onda estacionaria y se ajusta la escala del medidor de tal forma que marque una $ROE = 1$. A continuación movemos la sonda hasta un mínimo (siguiendo el procedimiento ya mostrado) y anotamos la lectura que ofrece el medidor. Ese valor es la ROE correspondiente a la perturbación, la cual permite el cálculo inmediato del coeficiente de reflexión. Finalmente, dicho coeficiente y la posición del mínimo permite el cálculo de la impedancia. Esta impedancia es la combinación de la susceptancia del iris y la carga adaptada utilizada, de modo que la obtención de la susceptancia es ya inmediata.

2.4. Medidas de campos electromagnéticos

Este seminario es una parte del taller "Efectos y aplicaciones terapéuticas de los campos electromagnéticos" celebrado en el marco de la Semana de la Ciencia 2013. El objetivo del seminario es presentar las herramientas empleadas habitualmente para la medida de campos electromagnéticos en entornos reales. En primer lugar se describen brevemente los tipos de antenas usados para la medida de campos eléctricos y magnéticos. El campo eléctrico se detecta mediante dipolos, los cuales pueden presentarse en forma de hilos, monopolos con plano de masa, líneas impresas lineales o en forma de margarita (para aumentar el ancho de banda), etc. Se explica cómo el diagrama de radiación del dipolo, con forma toroidal, implica una dependencia de la lectura de campo con la orientación de la antena. Esta dependencia se atenúa en la práctica utilizando sistemas de 3 antenas dipolo en configuración ortogonal. A continuación se muestran las antenas en forma de espira que se emplean para la medida del campo magnético. Por otra parte también se discute cómo puede llegar a conocerse la intensidad de campo que habría en el interior de una persona expuesta a campos electromagnéticos [28]. Se define lo que es un *fantoma*, esto es, un maniquí formado por una adecuada combinación de elementos de distinta permitividad eléctrica que trata de reproducir la distribución de permitividad eléctrica de ciertas partes del cuerpo humano. Irradiando el *fantoma* con campos de distinta intensidad y frecuencia e insertando una sonda en su interior es posible medir la intensidad de campo en cualquiera de sus puntos [29]. La determinación de una cierta cantidad de puntos ofrecería información suficiente como para obtener, empleando métodos numéricos, la distribución de los campos en todo el volumen interior del cuerpo.

La segunda parte del seminario consiste en la realización de medidas reales de intensidad de campo para bajas y altas frecuencias. Comenzamos utilizando un sistema de 3 dipolos ortogonales y observando la presencia de tres picos, de aproximadamente la misma amplitud, uno por cada dirección espacial, ubicados en una frecuencia de 50 Hz. Esos picos responden a la contribución de la red de distribución eléctrica y se llega a medir una intensidad de campo de unos 2000 voltios por metro. Seguidamente se encierra la antena en una caja forrada con papel de aluminio y se demuestra con claridad el efecto del apantallamiento; la intensidad de campo eléctrico va cayendo muy notablemente y en varios barridos del instrumento llega a anularse. En relación con esto último se recuerda que el cuerpo humano actúa como un conductor eléctrico debido a su alto contenido en agua. Así, nuestra superficie actúa como una jaula de Faraday para el interior de nuestro cuerpo; las líneas de campo externo mueren en nuestra piel y nuestros órganos internos quedan protegidos de toda la radiación electromagnética circundante. La conexión de una antena en espira a un analizador de espectros permite observar claramente cómo la orientación de la misma afecta en la medida del campo magnético. Después, para tener una idea de qué frecuencias e intensidades de campo forman el ambiente electromagnético al que estamos sometidos constantemente, se conecta una antena logoperiódica en modo de recepción a un analizador de espectros, registrando frecuencias desde 20 MHz hasta 2.5 GHz. Se observan muchas líneas espectrales: las más bajas (88 - 108 MHz) corresponden a emisoras de frecuencia modulada (FM), las siguientes son de televisión y también se ven con claridad las bandas correspondientes a la telefonía móvil (900 MHz y 1.8 GHz). Al realizar una llamada con un teléfono móvil se observa la aparición de líneas adicionales en el espectro. Finalmente se emplean medidores isotrópicos (tanto de campo eléctrico como de campo magnético) muy manejables para su uso en entornos reales, para altas frecuencias (10 MHz - 18 GHz) y que ofrecen medidas numéricas (en V/m y nT). Se comprueba cómo varía la medida al acercarse a cables eléctricos, tubos fluorescentes, cajas de fusibles, etc. También se verifica lo rápido que cae la intensidad de campo al alejarnos tan solo algunos centímetros de la fuente que lo está generando. Es destacable que las intensidades de campo eléctrico que se obtienen a alta frecuencia quedan en el orden del voltio por metro, mientras que las que se obtuvieron para baja frecuencia estaban en el orden del kilovoltio por metro. Al realizar una llamada telefónica se observa cómo la intensidad de campo eléctrico medida sube a unos 2-3 V/m en los primeros momentos, cuando el teléfono está estableciendo la comunicación con la estación base. Por último se determina que la densidad de potencia necesaria para asegurar una buena cobertura telefónica está en el orden del mW/cm². Esto viene a confirmar que no es necesaria una densidad de potencia muy grande para cubrir adecuadamente el territorio. También se desmonta el mito que considera menos perjudicial una única antena emisora a muchas repartidas por el terreno. Una única antena, para ofrecer una buena cobertura de toda la región, exigiría emitir con una potencia mucho mayor.

2.5. Fotodetectores de ultra-alta sensibilidad

Este seminario está dedicado a revisar los conceptos fundamentales de dos tipos de fotodetectores de alta sensibilidad (el tubo fotomultiplicador y el fotomultiplicador de estado sólido) y a mostrar la información que proporcionan y con qué instrumentación somos capaces de obtenerla y procesarla.

En la primera parte del seminario revisamos los principios de funcionamiento de estos detectores, sus características básicas y algunos de los efectos colaterales de interés que podemos encontrarnos al trabajar con ellos. Se explica cómo y por qué un único fotón (o muy pocos) es capaz de generar una intensísima cascada electrónica en un fotomultiplicador (PMT, *photomultiplier*), de tal magnitud que da lugar a una fotocorriente externa medible. También se discuten algunos de los inconvenientes que plantea su uso y que ha motivado la investigación de nuevos dispositivos de estado sólido que emulen su comportamiento y que eludan dichas limitaciones. Una de los dispositivos más prometedores es el fotomultiplicador de estado sólido (SSPM, *Solid State Photomultiplier*), también conocido habitualmente como GAPD (*Geiger-mode Avalanche PhotoDiode*, fotodiodo de avalancha en modo Geiger) o SiPM (*Silicon Photomultiplier*, fotomultiplicador de silicio) que se explica a continuación [30], [31]. Este detector está formado por una matriz de fotodiodos de avalancha conectados en paralelo. Esta configuración permite la formación de un detector relativamente grande (aunque pequeño en comparación con el tubo fotomultiplicador) y permite no solo detectar un único fotón, sino también contar cuántos fotones han sido detectados. Se explica cómo la celda básica es capaz de generar una multiplicación electrónica y cómo la combinación de muchas de estas celdas permite obtener una señal eléctrica proporcional a la intensidad de iluminación dentro de un cierto rango lineal. También se discuten sus ventajas e inconvenientes y se ofrecen valores para algunos de sus parámetros más característicos. Además, se explican dos de los efectos colaterales más importantes en este tipo de dispositivos, el entrecruzamiento óptico (*crosstalk*) y el pospulso (*afterpulsing*). Por otra parte, se muestran las señales de fotodetección típicas, así como el patrón de conteo de fotones que es posible registrar y se explica cómo obtenerlo.

La segunda parte del seminario lo componen varias experiencias con ambos tipos de fotodetectores. Para comenzar se describe el esquema experimental y la instrumentación de altas prestaciones a utilizar (osciloscopio de alta frecuencia, generador de funciones, fuentes de alimentación de precisión), así como algunos de los fotodetectores disponibles en el laboratorio. En la primera experiencia se muestra un tubo fotomultiplicador en funcionamiento dentro de la caja de aislamiento lumínico diseñada al efecto. Se verifica que la amplitud del fotopulso, ante iluminación constante, es proporcional a la ganancia intrínseca del fotodetector, la cual se controla mediante un voltaje de control externo comprendido entre 0.5 V y 1.5 V. De igual forma se demuestra la proporcionalidad de la fotoseñal con la iluminación ante ganancia intrínseca constante. Se observa claramente la señal concentrada en el tiempo que ofrece el PMT (ancho de pulso a mitad de altura inferior a 10 ns) y se explica paso a paso cómo medir su anchura mediante las herramientas que ofrece el osciloscopio. Seguidamente mostramos el funcionamiento típico de un fotomultiplicador de silicio, evaluamos su comportamiento básico y levantamos su patrón de conteo de fotones en tiempo real. Igual que con el PMT, se verifica la proporcionalidad de la amplitud de la fotoseñal con la intensidad de iluminación y con la ganancia intrínseca. Ahora, y a diferencia del caso del PMT, la superposición de fotoseñales sucesivas en la pantalla del osciloscopio permite observar con claridad la presencia de distinto número de fotones detectados. También se evidencian los problemas que conllevan una alta ganancia intrínseca: la fotoseñal se vuelve más inestable y queda muy contaminada por disparos espurios. Además, llamamos la atención respecto a que, debido a la propia estructura interna del SiPM, este ofrece un fotopulso considerablemente más largo que el PMT. Seguidamente se describe una solución basada en reflectometría que recorta la duración del fotopulso y que estabiliza notablemente la señal, hecho que favorece la aparición de un patrón de conteo de fotones con picos bien definidos y separables [32], [33]. Esta estrategia demuestra ser especialmente útil en SiPMs con celdas de gran tamaño. Se muestra la superposición de señales acortadas, se describe paso a paso cómo obtener el patrón de cuentas empleando la herramienta de histograma del osciloscopio y se discute la interpretación del mismo en relación con el fotodetector. Además, se ilustra cómo emplear las utilidades del osciloscopio para capturar un gran volumen de fotoseñales. Estas pueden utilizarse como datos de entrada de programas dedicados de procesamiento que permiten obtener una gran cantidad de información de caracterización del fotodetector. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos previamente con los que ofrece un módulo integrado de fotodetección de la casa Hamamatsu. Este módulo incorpora un fotodetector de área activa de 1 mm² y un complejo sistema de control y de estabilización térmica. El control térmico, el menor tamaño de la celda básica y el mejor aislamiento lumínico del fotodetector contribuyen a que haya una menor presencia de disparos falsos y a que la señal obtenida sea más limpia y estable que las obtenidas anteriormente. Esto conduce a un patrón de cuentas excelente donde los picos correspondientes a distintos fotones detectados son claramente separables unos de otros y donde se reduce considerablemente el error de detección.

3. Conclusiones

La utilización por parte de los alumnos del Laboratorio Virtual presentado en este trabajo persigue lograr que las clases prácticas sean realmente prácticas y útiles para el aprendizaje. Si con antelación a su llegada al laboratorio el estudiante tiene un contacto *virtual* con la instrumentación y la metodología de trabajo experimental, es muy probable que su aprovechamiento del mismo se refuerce en gran medida. La adquisición de conocimientos teóricos y el razonamiento informado y crítico son parte esencial de la formación de los estudiantes de ciencias e ingeniería. Ahora bien, hay amplio consenso en la comunidad educativa en que, aunque todos estos aspectos son importantes, no forman por sí solos un cuerpo de conocimiento suficiente. El contacto con el laboratorio, con la experimentación y la manipulación práctica y real de los elementos que conforman la profesión son igualmente esenciales para una formación completa del alumno. Sin embargo, en muchas ocasiones, los estudiantes acuden al laboratorio sin un conocimiento adecuado ni de los instrumentos que tendrán que usar, ni de cómo usarlos, ni del partido que pueden sacar de ellos. Con frecuencia tampoco tienen claro qué deben observar, medir o caracterizar, ni cómo hacerlo. Y además, es habitual también que no sepan cómo detectar errores metodológicos en su trabajo práctico o errores de medida que invalidan los resultados o impiden obtener conclusiones lógicas. Por todo ello, pensamos que una etapa inicial y recomendable en el proceso que los estudiantes deben completar para *aprender a hacer* es la de *ver cómo hacer*. Cuando el alumno observa con atención cómo otra persona con conocimientos asentados monta los experimentos, ejecuta las medidas, interpreta los resultados – e incluso los errores – y los vincula con naturalidad con los aspectos más teóricos discutidos en los libros y en las clases, corrige muchos de los errores prácticos típicos con antelación a cometerlos. De esta forma, el tiempo que pasa en el laboratorio se convierte en un tiempo bien

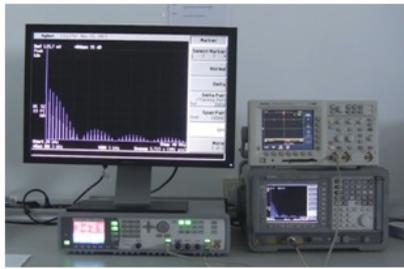
aprovechado y realmente formativo. Además, *viendo cómo hacer* antes de hacer se reduce el riesgo de que los estudiantes cometan errores que pongan en peligro equipos e instrumentos delicados y costosos.

Los seminarios que dan cuerpo a nuestro proyecto vinculan con claridad y naturalidad la teoría con la experimentación e intentan favorecer que el alumno relacione conocimientos y vea el laboratorio como el lugar donde se confirma lo que se ha explicado en el aula. En un ejercicio de equilibrio y responsabilidad empleamos el aparato teórico y formal mínimo necesario para que el estudiante sea capaz de entender los resultados experimentales que se obtienen. Una de nuestras metas con este proyecto es que el alumno vislumbre la necesidad de la teoría que, efectivamente, explica y justifica los hechos observados.

Pensamos también que este proyecto puede configurarse como una forma de aula invertida. Un uso adecuado de estos recursos favorecerá que los alumnos asuman la necesidad de aprender tanto la teoría como los rudimentos prácticos fuera del aula, de modo que acudan al laboratorio a ejercitarse, con verdadera actitud activa, sabiendo lo que tienen que hacer y cómo hacerlo. De esta forma se combatirá una cierta pasividad de los estudiantes y será posible estimular en ellos la creencia de que son los verdaderos responsables de su propio aprendizaje. Es necesario que el alumno adopte desde el principio un rol plenamente activo. El Laboratorio Virtual también aporta ventajas para el profesor. Este no se verá obligado a repetir sucesivamente las mismas cosas a distintos grupos de alumnos, sino que serán ellos mismos los que tendrán que trabajar de forma autónoma con el material proporcionado si detectan dudas o deficiencias de conocimiento. El estudiante aprenderá a planificar su trabajo, a anticipar problemas y a aprovechar el tiempo de prácticas con plena eficiencia. Y una vez realizada la práctica, podrá recurrir de nuevo al laboratorio virtual para repasar el desarrollo de la misma tantas veces como necesite. En consecuencia, el rol que adopta el profesor se acerca más al de *facilitador*, desterrando así el rol tradicional de *vigilante*.

Por otra parte, un manejo crítico de los seminarios estimulará a los estudiantes a llevar a cabo procesos de autoconstrucción y de construcción cooperativa de conocimiento. La puesta en común entre los alumnos de sus distintas planificaciones de trabajo – posiblemente bajo la supervisión del profesor – favorecerá buenas dinámicas de grupo y el desarrollo de un trabajo en equipo eficaz y de calidad. Este aspecto, descuidado tradicionalmente, resulta esencial para que los alumnos vayan transitando a lo largo de su etapa formativa hacia la profesionalidad. El haber aprendido a trabajar en equipo con eficacia es una necesidad que casi todo el mundo echa en falta una vez que se incorpora al mercado laboral. En suma, el uso personal del material multimedia que presentamos aquí, junto con una dinámica guiada de puesta en común y una metodología de planificación del trabajo de laboratorio llevará al éxito, no solo en términos de adquisición de conocimientos, sino también en cuanto a desarrollo de capacidades que el estudiante empleará ya a lo largo de toda su vida profesional.

El uso de estos seminarios con anterioridad a la llegada de los estudiantes al laboratorio acota el problema que suele originar un alumnado heterogéneo, con diferencias a veces notables en cuanto a conocimientos y/o formación práctica. Con herramientas de este tipo, la inmensa mayoría de los alumnos podrá comenzar su trabajo práctico desde el nivel mínimo exigible. No obstante, los profesores deberán estar vigilantes a las necesidades reveladas por los estudiantes u observadas por aquellos a lo largo del curso. Con esto presente, y en la medida de lo posible, se subsanarán las deficiencias detectadas corrigiendo los seminarios, completándolos o agregando nuevos recursos al proyecto. La implantación de un proceso de evaluación del impacto y utilidad del proyecto será de gran interés de cara a mejorarlo en fases sucesivas. No obstante lo anterior, tanto la necesaria autocritica como la experiencia acumulada en los proyectos de innovación en los que hemos participado con anterioridad sugieren ya una serie de mejoras. Entre ellas cabe destacar la ampliación del proyecto con más seminarios (algunos de carácter todavía más básico y otros de naturaleza muy especializada), el desarrollo completo de prácticas y de trabajos concretos de caracterización, así como la explicación detallada del manejo de la instrumentación y de otros dispositivos y sensores. El objetivo final de nuestro proyecto es convertirlo en un completo programa formativo virtual que resulte útil para el adiestramiento experimental inicial y autónomo tanto de los alumnos que cursan asignaturas relacionadas con electromagnetismo como de aquellos que pretenden realizar su trabajo de fin de estudios en nuestro grupo. Una ventaja adicional que aportan estas herramientas es la de brindar la posibilidad a los estudiantes de centros con escasez de recursos de poder familiarizarse con instrumentación moderna y de altas prestaciones y con procedimientos experimentales que, posiblemente, no podrán desarrollar en primera persona.



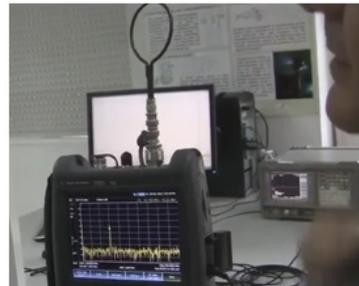
(a)



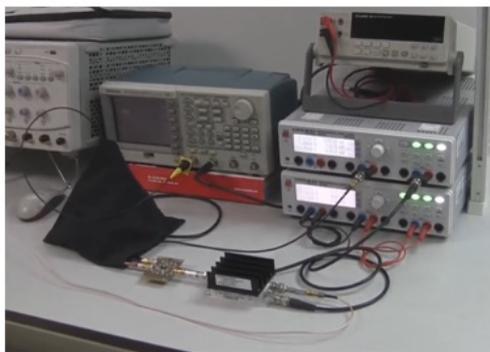
(b)



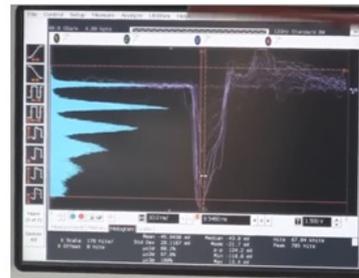
(c)



(d)



(e)



(f)

0 Fotogramas de los distintos seminarios del proyecto. (a) Seminario 1. Espectro de un tren de pulsos rectangulares. (b) Seminario 2. Antena receptora montada en un taburete graduado. (c) Seminario 3. Sistema experimental para la medida de la susceptancia de un iris en una guía de ondas. (d) Seminario 4. Antena para medida de campos magnéticos acoplada a un analizador de espectros. (e) Seminario 5. Sistema experimental utilizado para detección ultra-sensible de luz. (f) Seminario 5. Patrón de conteo de fotones obtenido con un fotomultiplicador de estado sólido

4. Referencias

- [1] <http://147.96.10.44/labmicroondas/inicio.html>
- [2] <http://complumedia.ucm.es>
- [3] <http://complumedia.ucm.es/resultados.php?contenido=jNXIRJHd2Hw4MT8UhvqIGg==>
- [4] <http://147.96.10.44/labmicroondas/media/CaracterizacionSenales.mp4>
- [5] http://complumedia.ucm.es/resultados.php?contenido=fzqGte8nwEOni3I_oZm4og==
- [6] <http://147.96.10.44/labmicroondas/media/CaracterizacionSenales.pdf>
- [7] http://complumedia.ucm.es/resultados.php?contenido=yko_L_ZSLIKG_pUzOIPy_w==
- [8] <http://147.96.10.44/labmicroondas/media/CaracterizacionAntenas.mp4>
- [9] <http://complumedia.ucm.es/resultados.php?contenido=KkchrQY7iXz1h--sYA1KRA==>
- [10] <http://147.96.10.44/labmicroondas/media/CaracterizacionAntenas.pdf>
- [11] http://complumedia.ucm.es/resultados.php?contenido=uTrmYbgllK95FapBps_hlQ==
- [12] <http://complumedia.ucm.es/resultados.php?contenido=hJ8j4PdOufMq0q-E2yONsg==>
- [13] <http://147.96.10.44/labmicroondas/media/ComponentesReactivosguiasonda.pdf>

- [14] http://complumedia.ucm.es/resultados.php?contenido=sMGDUHBalN3icjSH_naGAQ==
- [15] <http://147.96.10.44/labmicroondas/media/MedidasCampo.mp4>
- [16] http://complumedia.ucm.es/resultados.php?contenido=1-pAm5_HGAIR6urQtCcayQ==
- [17] <http://147.96.10.44/labmicroondas/media/MedidaCampos.pdf>
- [18] http://complumedia.ucm.es/resultados.php?contenido=tsBXEFUvOh_AX_mW07_2_g==
- [19] http://147.96.10.44/labmicroondas/media/FotodetectoresAltaSensibilidad_Antoranz_Yebras_x264.mp4
- [20] http://complumedia.ucm.es/resultados.php?contenido=_XexQV6be73GsYkeBhGbyg==
- [21] http://147.96.10.44/labmicroondas/media/FotodetectoresAltaSensibilidad_Antoranz_Yebras.pptx
- [22] PROAKIS, John G. *Digital signal processing*. 4ª ed. New Jersey: Prentice Hall, 2007. 948 p. ISBN 0132287315.
- [23] CARLSON, A. Bruce. *Communication Systems*. 4ª ed. New York: McGraw-Hill, 2002. 850 p. ISBN 0071121757.
- [24] CARDAMA AZNAR, Ángel. *Antenas*. 2ª ed. Barcelona: Ediciones UPC, 2002. 468 p. ISBN 8483016257.
- [25] KRAUS, John D. *Antennas*. 3ª ed. New York: McGraw-Hill, 2002. 938 p. ISBN 0072321032.
- [26] MIRANDA, José Miguel. *Ingeniería de Microondas*. Madrid: Prentice Hall, 2001. 384 p. ISBN 8420530999.
- [27] POZAR, David M. *Microwave engineering*. 4ª ed. New York: John Wiley & Sons, 2012. 732 p. ISBN 9780470631553.
- [28] BARNES, Frank S. *Handbook of biological effects of electromagnetic fields*. 3ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. 439 p. ISBN 9780849395383.
- [29] SEBASTIÁN FRANCO, José Luis. Medición de radiaciones en seres vivos. *Investigación y ciencia*. Febrero de 2006, p. 46-55.
- [30] RENKER, Dieter. Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. Noviembre de 2006, vol. 567, N° 1, p. 48-56. DOI 10.1016/j.nima.2006.05.060.
- [31] BULLER, G.S. Single-photon generation and detection. *Measurement Science and Technology*. Enero de 2010, vol. 21(1), N° 012002, p. 1-28. DOI 10.1088/0957-0233/21/1/012002.
- [32] YEBRAS RIVERA, José Manuel. Single Photon Counting with Silicon Photomultipliers, shortening systems and incoherent illumination. *Journal of the European Optical Society - Rapid Publications*. Mayo de 2012, vol. 7, N° 12014, p. 1-8. DOI 10.2971/jeos.2012.12014.
- [33] YEBRAS RIVERA, José Manuel. Strategies for shortening the output pulse of silicon photomultipliers. *Optical Engineering*. Julio de 2012, vol. 51(7), N° 074004, p. 1-8. DOI 10.1117/1.OE.51.7.074004.