

# Herramienta de simulación interactiva y de bajo coste para el desarrollo de laboratorios virtuales de comunicaciones ópticas

Francisco Ramos Pascual  
Departamento de Comunicaciones. ETSI Telecomunicación.  
Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera, s/n. 46022 Valencia (Spain)  
Tel.: +34 963877740 – Fax: +34 963877309 – E-mail: framos@upvnet.upv.es

## **Abstract**

*En el ámbito académico, los laboratorios virtuales constituyen una solución pedagógica muy adecuada para aquellos casos donde resulta difícil poder disponer de recursos de laboratorio costosos. En este artículo se exponen resultados preliminares de la implementación de una plataforma de simulación interactiva para la enseñanza de materias relacionadas con las comunicaciones ópticas. Tras el primer año de aplicación de esta nueva metodología docente, los resultados obtenidos han sido muy positivos, y ahora mismo se trabaja de forma continua en la mejora y actualización de los contenidos.*

## **Introducción**

Actualmente los estudiantes de ingeniería necesitan una importante formación práctica que demanda el mercado empresarial. Para hacer frente a ello, la estructura de los planes de estudio incluye un buen número de créditos de laboratorio. Sin embargo, en el caso de determinadas disciplinas como puede ser la fotónica, la preparación de prácticas de laboratorio requiere de dispositivos e instrumentación que suponen un importante desembolso económico, por lo que los laboratorios docentes suelen disponer de un equipamiento bastante limitado. La mayoría de grupos de investigación punteros a nivel internacional disponen de excelentes laboratorios científicos, pero éstos suelen estar enfocados a la investigación y monopolizados por el desarrollo de proyectos de I+D, resultando difícil su cesión a actividades docentes. En estos casos, todavía resulta viable planificar puntualmente visitas guiadas de los alumnos, si bien éstos actúan como meros sujetos pasivos y no suponen propiamente una actividad de aprendizaje.

El problema de acceso a recursos de laboratorio costosos no afecta tan sólo al ámbito docente, sino que también se ve reflejado en el campo de la investigación. Es por ello que la Comisión Europea ha lanzado diversas convocatorias para la creación de las llamadas Redes de Excelencia (*Networks of Excellence*), las cuales aglutinan a importantes centros de investigación expertos en algún campo del conocimiento y que se unen científicamente para compartir recursos humanos y de laboratorio [1]. En el campo de las comunicaciones ópticas podemos enumerar, entre otras, las redes de

excelencia en las que participa la Universidad Politécnica de Valencia y que se indican en la Fig. 1: e-Photon/One, ISIS, ePIXnet, BONE y EURO-FOS. En estas redes resulta habitual la existencia de plataformas de laboratorio e infraestructuras científicas puestas al servicio de los integrantes de la red de excelencia, así como los llamados “*virtual laboratories*” para el acceso remoto a recursos compartidos.



**Figura 1: Redes de excelencia en fotónica donde participa la Universidad Politécnica de Valencia (VI y VII Programas Marco de la Comisión Europea).**

Desde el punto de vista académico también han surgido iniciativas similares, como por ejemplo los laboratorios remotos [2]. Se trata de sistemas basados en instrumentación real de laboratorio que permiten al alumno el acceso y control remoto de los instrumentos por medio de estaciones de trabajo de una red local (Intranet) o bien a través de Internet. Los laboratorios remotos representan una gran ventaja en lo que respecta a la compartición de recursos costosos entre centros docentes de diferentes campus, si bien todavía subyace el principal problema que supone la limitación del acceso simultáneo en el tiempo [3].

Una solución a todos estos problemas la encontramos en los laboratorios virtuales. El laboratorio virtual acerca y facilita la realización de experiencias prácticas a un mayor número de alumnos, permitiendo un trabajo autónomo, independiente de la existencia o disponibilidad de recursos, y que a su vez posibilita el contacto con dispositivos y técnicas con las que no se está familiarizado [3]. Ahora bien, para que la experiencia sea enriquecedora desde el punto de vista del aprendizaje, el laboratorio virtual debe permitir un alto grado de interactividad, enfrentando al alumno a problemas reales que requieran una resolución. Precisamente en este contexto es donde tienen cabida los simuladores como herramientas virtuales e interactivas para el aprendizaje del alumno. En el mercado existen disponibles multitud de herramientas para el diseño y simulación de sistemas de comunicaciones ópticas. El coste de una licencia individual de estas aplicaciones es muy inferior al desembolso económico que supondría dotar a un laboratorio de todo el instrumental necesario, si bien este coste todavía resulta importante cuando deben adquirirse un elevado número de licencias de simulación (normalmente una por alumno). Afortunadamente existen soluciones a este problema y que se basan en el empleo de visores que pueden descargarse gratuitamente.

En este artículo se describe en detalle la solución propuesta para el desarrollo de un conjunto de actividades prácticas de diseño y simulación de sistemas de comunicaciones ópticas. La plataforma hace uso de una aplicación comercial que permite el desarrollo de objetos de aprendizaje interactivos, los cuales pueden ejecutarse por parte del alumno tantas veces como se quiera y de forma totalmente gratuita. Ello posibilita que los estudiantes tengan acceso a una formación práctica que, de otro modo, estaría restringida por cuestiones económicas.

### **Equipamiento de un laboratorio de comunicaciones ópticas**

Como se ha comentado anteriormente, el mantenimiento de un laboratorio de comunicaciones ópticas representa un importante desembolso económico. Los principales instrumentos y dispositivos con los que debe contar este laboratorio son: láseres y fuentes ópticas, moduladores electro-ópticos, fibras ópticas, amplificadores ópticos, fotodetectores, acopladores, aisladores, switches, controladores de polarización, drivers y amplificadores electrónicos, analizadores de señal, analizadores de espectro, generadores de PRBS y medidores de error, mesas ópticas, etc. A modo de ejemplo, en la Fig. 2 se pueden ver unas fotografías del Laboratorio de Redes Ópticas del Centro de Tecnología Nanofotónica de la Universidad Politécnica de Valencia. Entre su equipamiento podemos listar los componentes mostrados en la Tabla I.

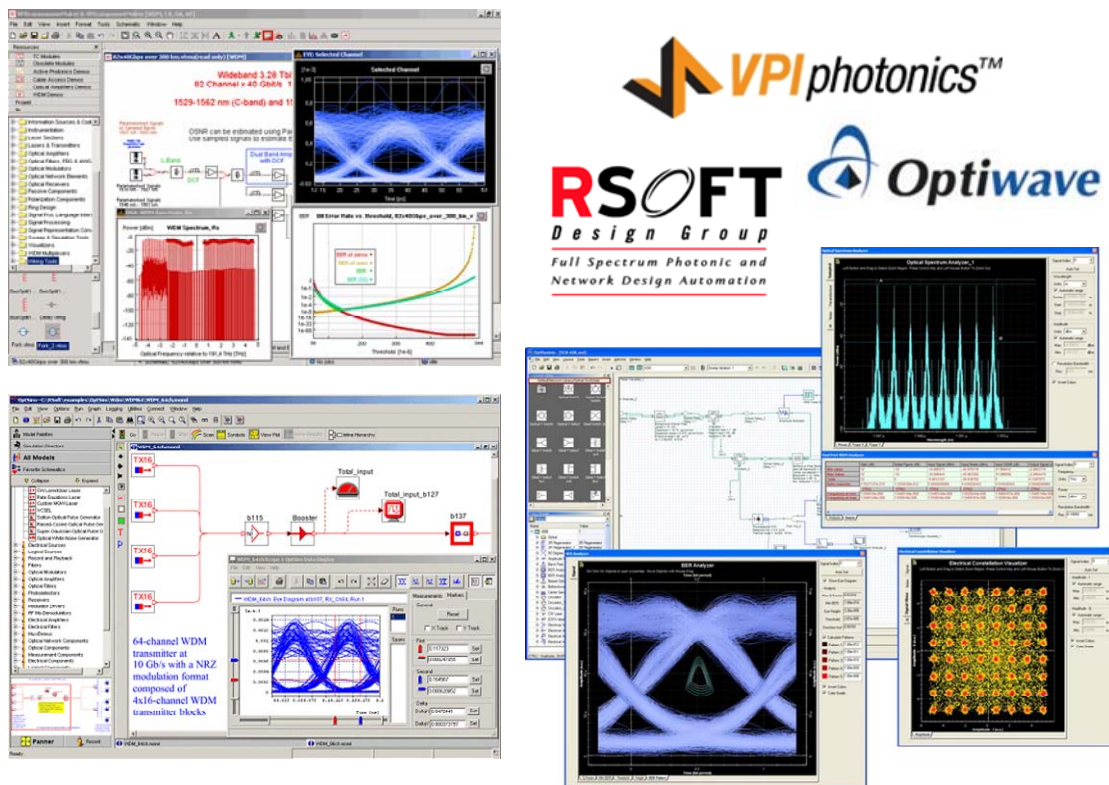


**Figura 2: Laboratorio de Redes Ópticas del Centro de Tecnología Nanofotónica de la Universidad Politécnica de Valencia.**

El coste del equipamiento mostrado en la Tabla I ronda el medio millón de euros. Resulta evidente, pues, que esta cifra supera con creces el presupuesto del que suelen disponer los laboratorios docentes. Luego son necesarias otras vías para la formación práctica de los estudiantes y que pasa por la implementación de laboratorios virtuales y la utilización de simuladores de comunicaciones ópticas.

**Tabla I: Instrumental del Laboratorio de Redes Ópticas.**

Test & Measurement	Optical Devices
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 65-GHz-bandwidth optical sampling oscilloscope</li> <li>▪ 44 Gb/s NRZ bit pattern generator</li> <li>▪ 44 Gb/s error analyzer (BER)</li> <li>▪ 3x optical spectrum analyzers</li> <li>▪ Optical network analyzer</li> <li>▪ Optical pulse correlator</li> <li>▪ 50-GHz-bandwidth signal generator</li> <li>▪ Electrical spectrum analyzer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 4x DFB lasers, 3x ECL lasers</li> <li>▪ 10 Gb/s pulsed optical source</li> <li>▪ 40 Gb/s electro-optic modulators</li> <li>▪ 10 to 160 Gb/s OMUX</li> <li>▪ 4x EDFAs</li> <li>▪ Standard 1.5-mm SOA</li> <li>▪ 2x 40 Gb/s photodetectors</li> <li>▪ 40 Gb/s photoreceiver</li> <li>▪ 40 Gb/s driver amplifier</li> <li>▪ 8x SOA-MZI gates</li> <li>▪ 4x MEMS switches</li> <li>▪ 5x tunable bandpass filters</li> <li>▪ Optical delay lines, fibers, couplers, isolators, optical attenuators, polarization controllers, etc.</li> </ul>



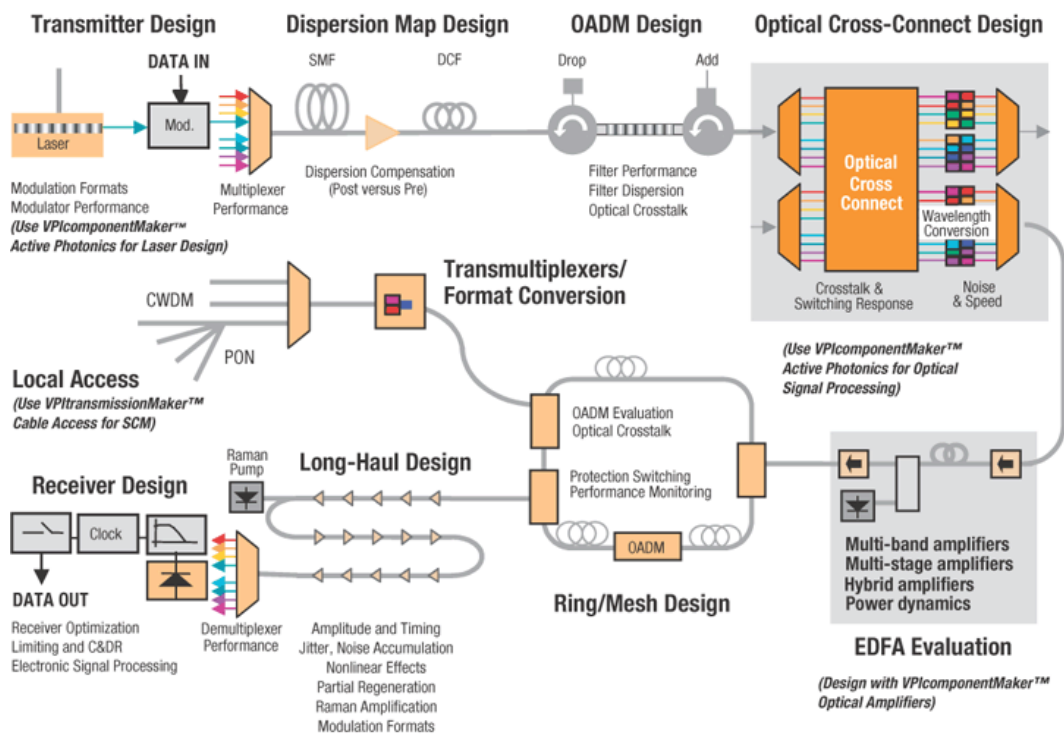
**Figura 3: Simuladores comerciales: VPItransmission Maker (VPIsystems Inc.), Opti System (Optiwave Systems Inc.) y OptSim (RSOFT Design Group).**

### Simuladores de sistemas de comunicaciones ópticas

Afortunadamente, la oferta comercial de simuladores de sistemas de comunicaciones ópticas es amplia. En la Fig. 3 se muestran algunos de los más destacados. Los fabricantes de estos simuladores suelen implantar Programas Académicos de

colaboración con universidades y centros de investigación, los cuales permiten la adquisición de licencias a un coste por debajo del mercado. La única limitación es que los simuladores se destinan al ámbito académico y en ningún caso para obtener un beneficio comercial.

En nuestro caso, hemos optado por escoger VPItransmissionMaker de la empresa VPIsystems, el cual permite simular un gran número de dispositivos y subsistemas, así como instrumentos de laboratorio para medida y caracterización. En la Fig. 4 se muestran ejemplos de los subsistemas que se pueden modelar con dicho simulador.



**Figura 4: Ejemplos de subsistemas que pueden simularse.**

## Objetivos del trabajo

El principal objetivo que motivó este trabajo fue el de la adaptación a las directrices del Espacio Europeo de Educación Superior (EEES) [4] de la asignatura “Sistemas de Comunicaciones Ópticas” que se imparte en 8º cuatrimestre de la titulación de Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Valencia. Como es sabido, el EEES plantea la necesidad de implantar un nuevo sistema educativo, con un mayor contenido de trabajo autónomo del alumno que deberá ser eminentemente práctico. Para ello surge la necesidad de adaptar las metodologías docentes, así como los programas de las asignaturas, al futuro marco educativo, y en este sentido son innumerables las experiencias que en la actualidad se están llevando a cabo en todas las universidades [5, 6].

En el caso de nuestra asignatura, se buscaba el desarrollo de una serie de ejercicios que permitieran al alumno poner en práctica los conocimientos adquiridos en las clases teóricas y que, al mismo tiempo, fomentaran la adopción y consolidación de una serie de habilidades. Dado que la asignatura está enfocada al diseño de sistemas de comunicaciones ópticas, el alumno debe ser capaz de dominar los siguientes aspectos [7]:

- Procedimientos de medida de la calidad de las señales ópticas recibidas en sistemas ETDM, SCM y WDM: diagrama de ojos, relación de extinción, tasa de error (BER), relación portadora a ruido (CNR), distorsión no lineal (CSO y CTB), margen dinámico, etc.
- Identificación de las principales fuentes de degradación de la calidad en un enlace de comunicaciones ópticas, analizando su influencia y arbitrando mecanismos y soluciones para reducir sus efectos. Entre ellas podemos enunciar: ruido, clipping, chirp, dispersión cromática, PMD, efectos no lineales, diafonía, etc.
- Cálculo del punto de trabajo óptimo de transmisores ópticos de sistemas analógicos y digitales, dimensionando el número de canales a transmitir, su situación en el espectro, el índice de modulación, la potencia óptica, etc. A su vez, se estudian técnicas de linealización del dispositivo.
- Cálculo de la longitud óptima de las secciones repetidoras de fibra a partir del número de amplificadores ópticos empleados, su ganancia y su figura de ruido. Esto a su vez enlaza con las técnicas de gestión de la dispersión cromática y el cálculo de las longitudes óptimas de fibra compensadora o de dispersión desplazada.

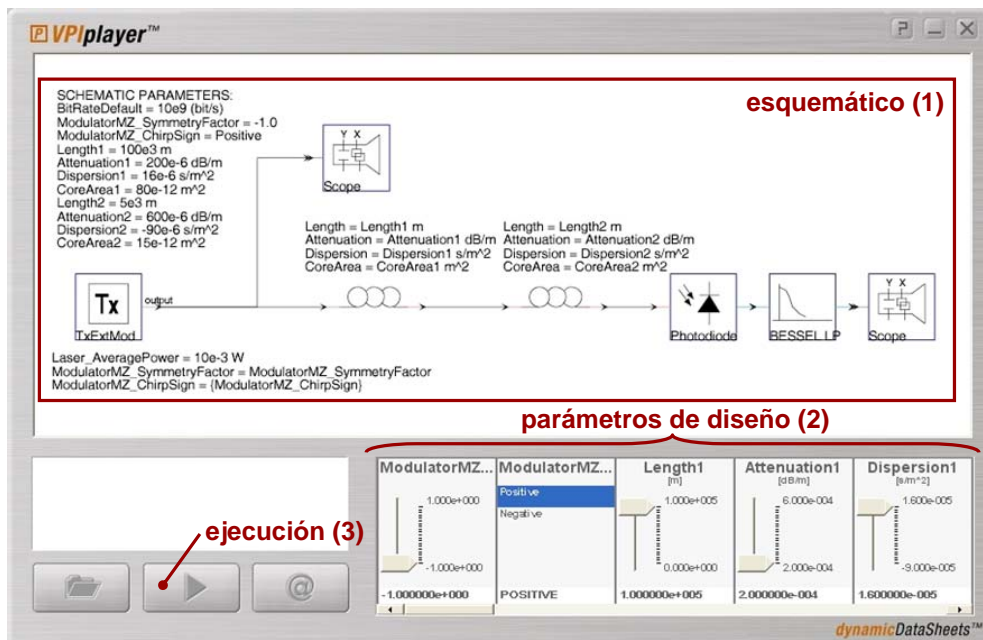
Para adquirir todas estas habilidades o competencias se ha propuesto el uso de una herramienta de simulación interactiva que se describe en la siguiente sección.

### **Desarrollo de la plataforma de simulación interactiva**

El trabajo consistió en el desarrollo de una serie de ejercicios interactivos de simulación empleando aplicaciones software de la empresa VPI Photonics. La ventaja de estas aplicaciones es que permiten la ejecución de esquemáticos sin necesidad de adquirir ninguna licencia de uso por parte del alumno, es decir, de forma gratuita. Esta herramienta se basa en el diseño previo, por parte del profesor, de unos esquemáticos de simulación que modelan distintos componentes o subsistemas de un determinado sistema de comunicaciones ópticas. Para el diseño de estos esquemáticos se emplea la aplicación VPItransmissionMaker™ de la misma empresa, la cual sí que requiere licencia de uso. Posteriormente, estos esquemáticos se compilan y se generan unos archivos con extensión .dds que pueden ser ejecutados desde cualquier ordenador que tenga instalado el visor VPIplayer™, el cual puede ser descargado gratuitamente desde la página web de la empresa [8]. Esto permite que el alumno pueda trabajar de forma autónoma como complemento a las sesiones prácticas que se realizan en el Aula Informática de la Escuela. Pero la gran utilidad de esta herramienta es que no se

limita a un simple visor, donde el alumno ejecuta una y otra vez las simulaciones de forma pasiva y sin ningún control sobre las mismas. En cambio, el alumno tiene la posibilidad de cambiar y configurar toda una serie de parámetros de los dispositivos y variables del sistema que han sido previamente seleccionados por el profesor. Es decir, es tarea del profesor identificar previamente los parámetros clave entre todos los posibles (más de un millar), y que luego el alumno deberá estudiar con el fin de diseñar adecuadamente el sistema y comprobar que funciona correctamente. Precisamente aquí es donde se le proporciona un valor adicional al trabajo del alumno, el cual debe analizar los resultados obtenidos y proponer soluciones.

En la Fig. 5 se muestra el aspecto que presenta la herramienta de simulación, donde se puede observar una pantalla principal que representa el esquemático (1), unos controles que permiten la variación de algunos parámetros de diseño (2), y unos botones para la carga y ejecución de las simulaciones (3).



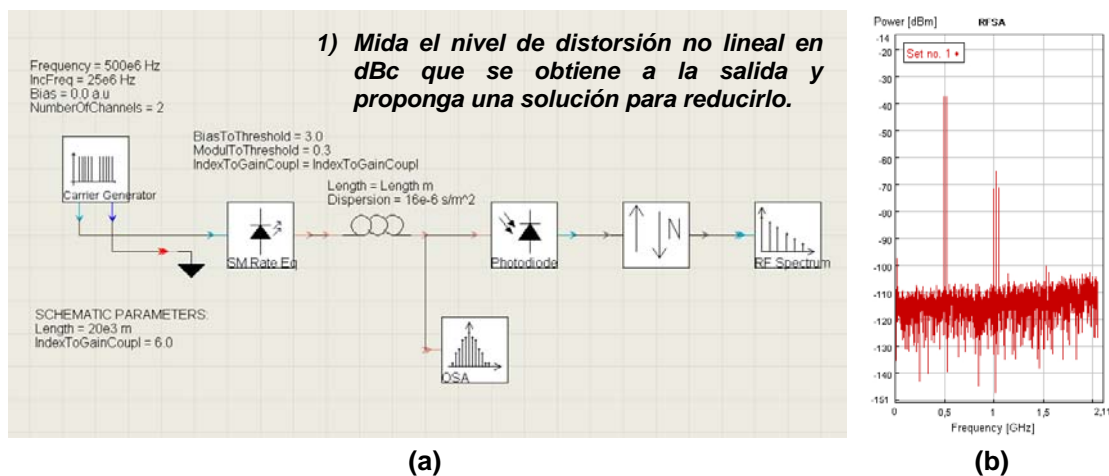
**Figura 5: Herramienta VPIplayer™.**

Hasta el momento se han desarrollado 17 ejercicios prácticos que abordan los conceptos más importantes que debe asimilar el alumno (competencias). Éstos se describen brevemente a continuación:

- 1) Transmisión de señales ETDM empleando modulación directa: influencia de las oscilaciones de relajación del láser, chirp y dispersión cromática.
- 2) Uso de pre-amplificadores ópticos en sistemas limitados por ruido térmico.
- 3) Diseño de secciones repetidoras en enlaces ETDM de larga distancia.
- 4) Transmisión de señales ETDM empleando modulación externa: ajuste del chirp de un modulador externo Mach-Zehnder.
- 5) Compensación de dispersión cromática mediante fibras compensadoras.
- 6) Estudio de la influencia de la PMD en enlaces de larga distancia.
- 7) Distorsión no lineal en sistemas SCM con modulación directa.

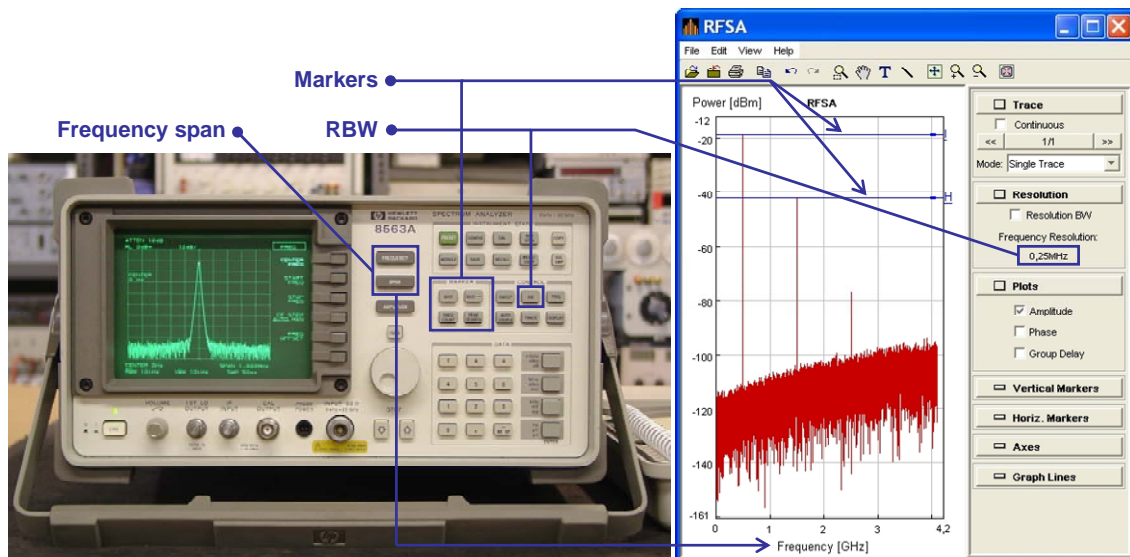
- 8) Distorsión no lineal en sistemas SCM con modulación externa.
- 9) *Clipping* en transmisores SCM con modulación directa: parámetros óptimos de diseño.
- 10) Margen dinámico de modulación de transmisores SCM con modulación externa: parámetros óptimos de diseño.
- 11) Linealización de moduladores electro-ópticos Mach-Zehnder.
- 12) Medida de relación portadora a ruido debida a RIN: diseño de un sistema limitado por RIN.
- 13) Diafonía en sistemas WDM: intercanal e intracanal.
- 14) Influencia de los filtros ópticos en la diafonía intercanal.
- 15) Impacto del proceso no lineal de mezclado de cuatro ondas en sistemas DWDM: influencia de distintos parámetros.
- 16) Acoplamiento no lineal entre pulsos ópticos: automodulación de fase y modulación cruzada de fase.
- 17) Fenómeno no lineal de SRS e influencia en el diseño de un sistema WDM.

Cada uno de estos ejercicios lleva asociado un archivo .dds (esquemático de la simulación) y un guión de trabajo donde se incluyen una serie de preguntas que el alumno debe analizar y contestar en base a los resultados obtenidos y a los parámetros de diseño que debe modificar. En ningún caso se trata de un esquema completamente guiado, sino que se proporciona cierta libertad para la resolución de los problemas. A modo de ejemplo, en la Fig. 6 se muestra un esquemático y alguno de los resultados que pueden obtenerse. En este caso concreto, se trata de un sistema SCM con modulación directa, mientras que el resultado se refiere a la señal capturada en un analizador de espectros situado a la salida del fotorreceptor. El alumno debe medir los niveles de distorsión no lineal en dBc de la misma forma que lo haría con un analizador de espectros de laboratorio. Para confirmar la similitud que tiene el uso de la herramienta de simulación con lo que sería un equipo real de laboratorio, en la Fig. 7 se presentan de forma comparativa los controles del laboratorio virtual y los de un analizador de espectros de RF.



**Figura 6: (a) Enlace óptico SCM con modulación directa y fibra óptica dispersiva. (b) Espectro de RF capturado a la salida, donde se aprecian los términos de distorsión no lineal.**





**Figura 7: Controles de un analizador de espectros de RF (HP8563A) y algunos de sus equivalentes en el modelo de laboratorio virtual.**

## Conclusiones

Los laboratorios virtuales constituyen una solución pedagógica muy adecuada en aquellos casos donde resulta difícil poder acceder a recursos de laboratorio costosos. No obstante, para que el proceso de aprendizaje sea realmente efectivo resulta imprescindible que los modelos virtuales de los componentes y equipos coincidan fielmente con su equivalente real, así como que la plataforma educativa proporcione un alto grado de interactividad. Concretamente, el laboratorio virtual de sistemas de comunicaciones ópticas que hemos desarrollado cumple con estas dos premisas. Tras el primer año de aplicación de esta nueva metodología docente podemos decir que los resultados obtenidos han sido muy satisfactorios, tanto desde el punto de vista de actitud de los estudiantes frente a las clases, como desde el punto de vista de los resultados de los exámenes. La realimentación recibida ha sido tan sumamente positiva que a día de hoy el 50% de la evaluación se basa en los resultados de dichos ejercicios prácticos. En la actualidad, se ha editado un libro [9] con todos los guiones de los ejercicios y se trabaja de forma continua en la actualización de los mismos con nuevos dispositivos y técnicas de diseño de sistemas de comunicaciones ópticas. Como trabajo futuro, se realizarán encuestas que permitan identificar aquellas cuestiones a mejorar y, sobretodo, realizar una actualización de los contenidos de los ejercicios en función de los requisitos de los estudiantes.

## Bibliografía

- [1] Seventh Framework Program (FP7): [http://cordis.europa.eu/fp7/home\\_en.html](http://cordis.europa.eu/fp7/home_en.html)
- [2] D. Gurkan, A. Mickelson, D. Benhaddou, "Remote laboratories for optical circuits", IEEE Transactions on Education, vol. 51, no. 1, pp. 53-60, Feb. 2008.

- [3] L. Rosado, J. R. Herreros, "Nuevas aportaciones didácticas de los laboratorios virtuales y remotos en la enseñanza de la Física", Recent Research Developments in Learning Technologies, 2005.
- [4] Espacio Europeo de Educación Superior (EEES) – Ministerio de Educación y Ciencia: <http://www.mec.es/universidades/eees/index.html>
- [5] J. Saiz, A. Portero, M. Rullán, J. Aguiló, "Experiencia de innovación docente siguiendo las directrices del Espacio Europeo de Educación Superior en la enseñanza del diseño digital", RELATEC: Revista Latinoamericana de Tecnología Educativa, vol. 5, no. 2, pp. 203-222, 2006.
- [6] A. Cruz, A. Benito, I. Cáceres, E. Alba, "Hacia la convergencia europea: relato de una experiencia de innovación docente en la UEM", Revista Iberoamericana de Educación, no. 42/7, 2007.
- [7] G. P. Agrawal, "Fiber-optic communication systems" (Third Edition), John Wiley & Sons, ISBN 0-471-21571-6, 2002.
- [8] VPIplayer™: <http://www.vpiphotonics.com/VPIplayer.php>
- [9] D. Pastor, F. Ramos, J. Capmany, "Sistemas de comunicaciones ópticas", Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, ISBN 978-84-8363-061-7, 2007.