

# Análisis del Empleo de Recursos de Simulación en la Consecución de Objetivos Docentes de Electromagnetismo en Enseñanzas de Ingeniería

Miguel Beruete, Txema Lopetegui, Ivan Arregui, Ainzane Lujambio, y Francisco Falcone  
Dpto. Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
Universidad Pública de Navarra  
Pamplona, España  
miguel.beruete@unavarra.es

**Abstract**— En este trabajo, se analiza el empleo de recursos de simulación en el desarrollo docente de materias ligadas con la enseñanza de electromagnetismo. Se presentarán los recursos diseñados de manera específica para la asignatura de Propagación y Transmisión de Ondas, ubicada en el segundo curso de Grado de Ingeniero de Telecomunicación de la Universidad Pública de Navarra (UPNA), así como su impacto en el proceso de aprendizaje y evaluación en dicha asignatura.

**Keywords**— *Telecommunication Engineering Degree, Electromagnetism, Full Wave Simulation Tools*

## I. INTRODUCCIÓN

Uno de los elementos básicos en el currículo de Ingeniería de Telecomunicación es el electromagnetismo, tanto la electrostática/magnetostática como la electrodinámica. El correcto asentamiento de dichos conceptos electromagnéticos tienen influencia directa en el proceso de aprendizaje de materias relativas a sistemas y medios de transmisión, dispositivos de alta frecuencia, antenas, radiofrecuencia y sistemas de comunicaciones móviles, inalámbricos y satelitales. Dentro de la adaptación de estudios de Grado de Ingeniero de Telecomunicación en la UPNA, dicha docencia se enmarca en una asignatura de 6 créditos ECTS denominada Propagación y Transmisión de Ondas, ubicada en el segundo curso [1]-[4].

Tradicionalmente, la enseñanza de conceptos de electromagnetismo en niveles iniciales de Ingeniería de Telecomunicación se considera compleja por parte de los alumnos, por la complejidad de los conceptos y la necesidad de abstracción, como por parte de los docentes, que requieren asentar los conceptos empleando las herramientas matemáticas mínimas para lograr dicho fin [5]-[7]. En este sentido, el método clásico está basado en la clase magistral, apoyado por sesiones de problemas en pizarra, tareas fuera del horario de clase y realización de un conjunto de prácticas, orientadas a la observación de fenómenos fundamentales de líneas de transmisión y de manejo básico de instrumentación de RF.

Con el fin de poder superar las dificultades propias de la abstracción necesaria para observar los fenómenos propios de electrodinámica, tanto en línea de transmisión como de

propagación de ondas en espacio libre y en guías de onda, se ha introducido el empleo de herramientas de simulación electromagnética de onda completa, como complemento en el desarrollo de las clases magistrales.

En este trabajo, revisamos el progreso obtenido con el uso de recursos de simulación, basada en resolución numérica de las ecuaciones de Maxwell con el método de la integración finita en el dominio del tiempo, para facilitar la comprensión en la enseñanza de propagación de ondas electromagnéticas dentro del grado de telecomunicación. Se presentan varios casos prácticos que ponen de manifiesto la propagación ondulatoria dentro de líneas de transmisión clásicas y se revisan tecnologías prácticas para transmisión de ondas, tales como líneas bifilares, cables coaxiales y guías de onda.

## I. PROPAGACIÓN DE ONDAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

### A. Ondas electromagnéticas dentro de una línea bifilar

El temario de la asignatura Propagación y Transmisión de Ondas de la UPNA comienza con las nociones básicas de líneas de transmisión. En primer lugar se demuestra que a lo largo de una línea de transmisión se propagan ondas electromagnéticas, usando directamente de las ecuaciones de Maxwell, convenientemente simplificadas para potenciar el conocimiento intuitivo por parte del alumno. La comprensión de este concepto es clave para el desarrollo de la asignatura y resulta difícil de comprender para un alumno de segundo curso que en su formación previa ha utilizado únicamente las ecuaciones de Kirchoff (tensión y corriente) para resolver circuitos electrónicos. Para facilitar y reforzar la comprensión intuitiva, se muestra el campo eléctrico y magnético en una línea bifilar, calculados con un simulador electromagnético comercial, ver Fig. 1. En este ejemplo se usa una línea bifilar sin pérdidas de longitud  $L = 50\text{mm}$  acabada en una carga adaptada, y se evalúa el comportamiento a dos frecuencias diferentes:  $f_1 = 30\text{kHz}$  ( $\lambda_1 = 10\text{km}$ ) y  $f_2 = 30\text{GHz}$  ( $\lambda_1 = 10\text{mm}$ ). Se eligen estas frecuencias para mostrar que, en esencia, la física subyacente en el problema es la misma y que la única diferencia es que en el primer caso la longitud de onda es mucho mayor que el tamaño del circuito ( $\lambda_1 \gg L$ ) mientras que en el segundo es comparable ( $\lambda_1 \sim L$ ), que es la condición

típica para diferenciar entre problemas de teoría clásica de circuitos (descrita por medio de las leyes de Kirchoff) o teoría de líneas de transmisión (descrita por las leyes de Maxwell). A la vista de los resultados, se observa claramente que existe un campo eléctrico que va de un conductor a otro, independientemente de la frecuencia de operación, y que además su distribución de campo es como la del campo electrostático, como se muestra en los paneles (a), (b) y especialmente en (c). Cuando la frecuencia de operación es 30kHz, todos los puntos del circuito se encuentran prácticamente en fase, mientras que al aumentar la frecuencia a 30GHz el campo eléctrico presenta una clara dependencia espacial a lo largo de la dirección de propagación (eje  $z$ ). Se muestra también un corte transversal que muestra que el campo magnético obedece a las leyes de la magnetostática, es decir, se deriva directamente de la ley de Ampère y, por tanto, se relaciona directa y únicamente con la corriente de conducción, ver Fig. 1(d).

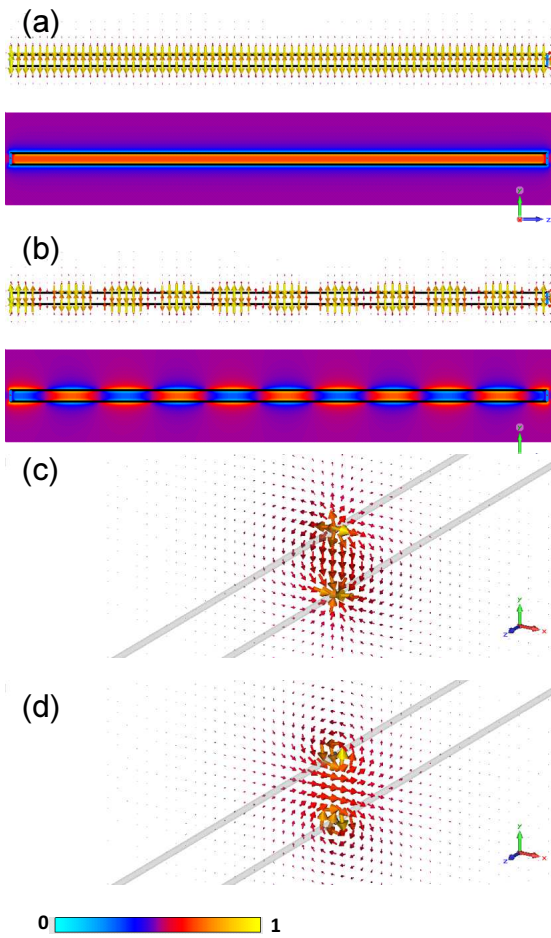


Fig. 1. Resultados de simulación de una línea bifilar de 50mm de longitud. Campo eléctrico instantáneo en el plano transversal  $y$ - $z$ , a una frecuencia de operación de 30kHz (a) y 30 GHz (b). En ambos casos, el panel superior muestra el vector campo eléctrico total y el panel inferior la componente vertical  $E_y$  del mismo. Campo eléctrico (c) y campo magnético (d) en el plano transversal  $x$ - $y$ . La distribución de campo en este plano es muy similar independientemente de la frecuencia de operación.

### B. Transitorio tras el cierre de un interruptor en continua.

Para enfatizar que en cualquier circuito eléctrico siempre existen ondas electromagnéticas que se propagan, se propone a continuación el estudio de un circuito muy simple que consiste en una línea de transmisión conectada a una resistencia de carga y a un generador de tensión continua con resistencia interna a través de un interruptor que se cierra en  $t = 0s$ . Con la teoría de circuitos clásica los conductores que forman la línea de transmisión se consideran cortocircuitos perfectos (equipotenciales), por lo que la tensión en ambas resistencias aumenta instantáneamente al valor estacionario. Sin embargo, aplicando la teoría completa de líneas de transmisión, se demuestra que en realidad se produce un ir y venir de ondas progresivas y regresivas que, al cabo de un tiempo suficiente, alcanzan el estado estacionario y los valores de tensión son idénticos a los calculados con la teoría de circuitos clásica. Este problema se les deja previamente resuelto a los alumnos de analíticamente de forma que los resultados de simulación sirvan de complemento visual a los cálculos analíticos. Este es un problema de alto interés didáctico que demuestra que en un caso muy simple donde la tensión y la corriente estacionarias son continuas, existe un transitorio debido al cierre de un interruptor y que la tensión y la corriente van alcanzando gradualmente sus valores estacionarios según se propagan ondas electromagnéticas progresivas y regresivas a lo largo del circuito.

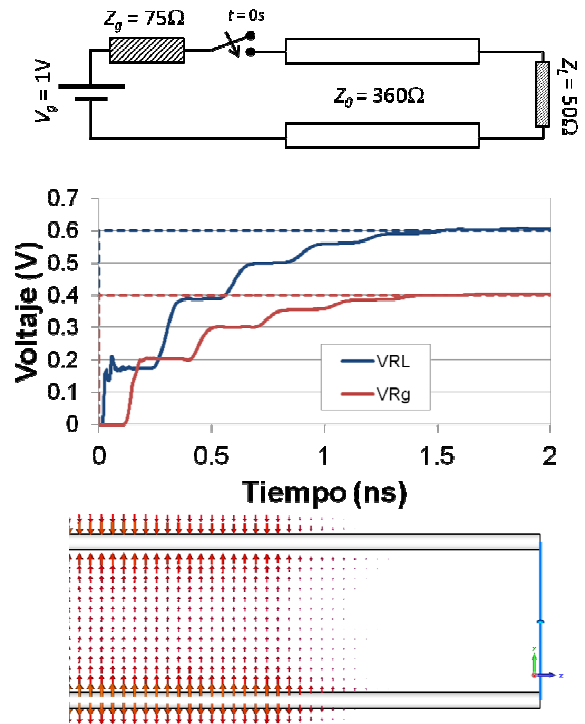


Fig. 2. Línea de transmisión que conecta a una resistencia de carga con un generador de tensión a través de un interruptor que se cierra en  $t = 0s$ . El esquemático junto con los valores usados se muestra en la parte superior. En el panel central se muestra la evolución temporal de la tensión en la resistencia de carga (azul) del generador (roja) junto con los valores teóricos calculados aplicando la teoría de circuitos clásica (curvas discontinuas) que asume que la tensión aumenta instantáneamente. El panel inferior muestra el campo eléctrico instantáneo en  $t = 0.075ns$ , cuando todavía la primera onda progresiva no ha alcanzado la resistencia de carga.

### C. Ondas reflejadas en una interfaz.

Una cuestión fundamental que surge en el estudio de líneas de transmisión es la posibilidad de excitar ondas reflejadas en una discontinuidad. En particular, por el mero hecho de conectar dos líneas de transmisión con diferente impedancia característica se produce una onda reflejada y otra onda transmitida en la interfaz. Para ayudar al alumno a visualizar el fenómeno dinámicamente, se realiza una simulación que muestra dos cables coaxiales de dimensiones idénticas, relleno uno de ellos con aire cuya permitividad relativa es  $\epsilon_1 = 1$  y otro con un material dieléctrico de permitividad relativa  $\epsilon_2 = 3$ .

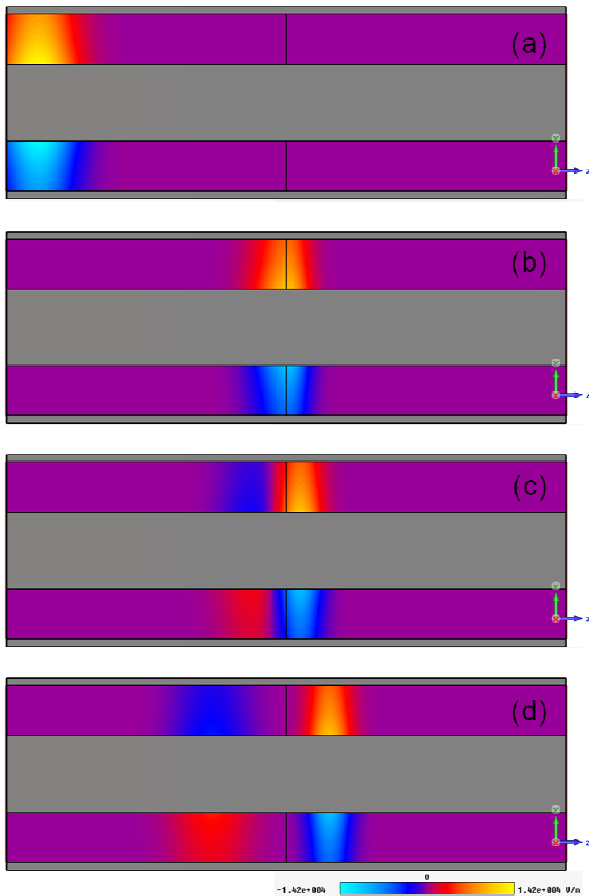


Fig. 3. Componente vertical del campo eléctrico ( $E_y$ ) en el plano transversal  $y$ - $z$  en cuatro instantes de tiempo diferentes: saliendo del puerto de entrada (a), llegando a la interfaz (b), justo después reflejarse en la interfaz y transmitirse parte hacia el segundo cable (c) una vez que se ha reflejado y transmitido totalmente (d).

Asumiendo que la incidencia se hace por el lado del cable relleno de aire, se tiene un coeficiente de reflexión  $\rho = -0,27$  y un coeficiente de transmisión  $\tau = 0,73$ . En la simulación se excita el cable coaxial con un pulso gaussiano y por medio de un monitor de campo eléctrico en el dominio temporal se observa su evolución según se propaga por la línea. En la Fig. 3 se muestra la componente vertical del campo eléctrico ( $E_y$ ) en el plano transversal  $y$ - $z$  en cuatro instantes de tiempo

### D. Adaptación de impedancias.

Una vez que se ha presentado rigurosamente el análisis en régimen sinusoidal permanente, junto con la derivación de las ecuaciones fasoriales, se aborda la cuestión clave de la transformación de impedancias a lo largo de una línea de transmisión y como corolario fundamental, las técnicas de adaptación de impedancias.

Como ejemplo más sencillo para introducir dichas técnicas, se analiza en detalle el transformador  $\lambda/4$  y se obtienen las ecuaciones de diseño. Para facilitar la comprensión y visualización de dicha técnica de adaptación de impedancias, se muestran los resultados de dos simulaciones diferentes una desadaptada y otra adaptada.

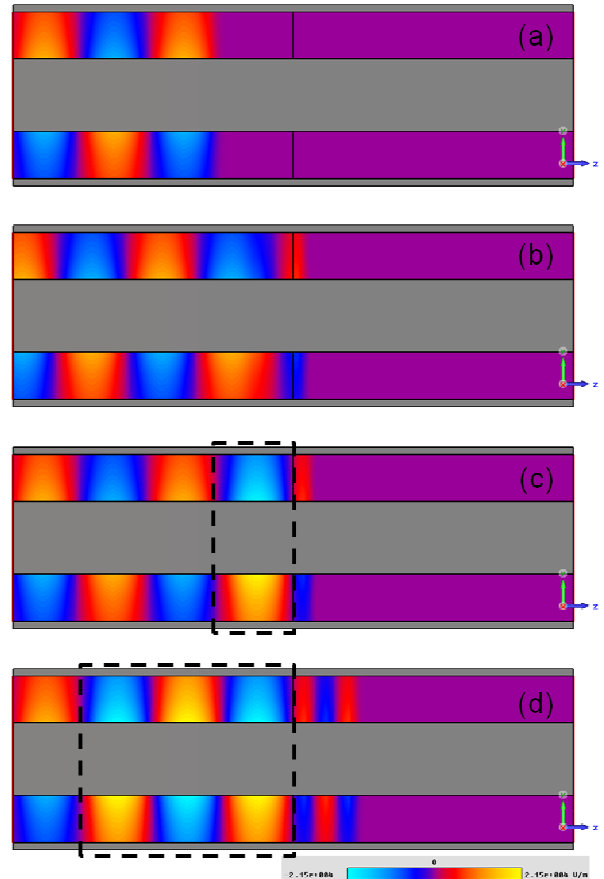


Fig. 4. Componente vertical del campo eléctrico ( $E_y$ ) en el plano transversal  $y$ - $z$  en cuatro instantes de tiempo diferentes para dos coaxiales de diferente impedancia característica conectados entre sí sin red de adaptación: saliendo del puerto de entrada (a), llegando a la interfaz (b), justo después reflejarse en la interfaz y transmitirse parte hacia el segundo cable (c) una vez que se ha reflejado y transmitido totalmente (d). Se observa en los casos (c) y (d) la presencia de una onda estacionaria en el medio de entrada.

En ambos casos se usa una configuración similar a la del apartado anterior, con dos cables coaxiales de dimensiones idénticas rellenos con dieléctricos de diferente permitividad, de manera que su impedancia es diferente. Para el caso adaptado, se introduce entre ambos coaxiales un medio dieléctrico de la impedancia y dimensiones adecuadas, que asegura adaptación a la frecuencia de diseño. La línea de

transmisión se excita con un escalón sinusoidal (es decir, una señal sinusoidal de frecuencia fija que se lanza en  $t = 0s$ ). De esta manera se puede observar claramente la evolución del frente de ondas y cómo progresivamente se alcanza el estado estacionario. Los resultados se muestran en las Figs. 4 y 5.

Cuando no se inserta una red de adaptación (Fig. 4), se aprecia claramente que existe una onda reflejada hacia el puerto de entrada. En el panel (c) se distingue el efecto de la interferencia entre la onda incidente y la onda reflejada en el primer semiperiodo más próximo a la interfaz (recuadrado con línea discontinua). En el panel (d) la interferencia se ha extendido a tres semiperiodos. Una vez ha decaído el transitorio esta interferencia da lugar a una onda estacionaria debido a la desadaptación.

El escenario es muy diferente al introducir la red de adaptación. En este caso se observa claramente que no existe ninguna onda estacionaria hacia el puerto de entrada, dado que la red de adaptación es capaz de forzar que toda la potencia se transmita hacia el medio de salida.

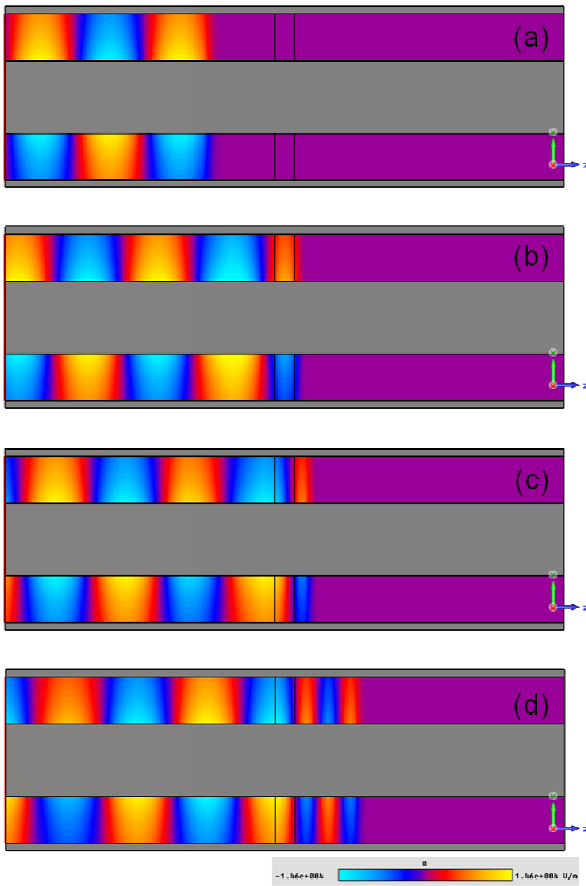


Fig. 5. Componente vertical del campo eléctrico ( $E_y$ ) en el plano transversal  $y$ - $z$  en cuatro instantes de tiempo diferentes para dos coaxiales de diferente impedancia característica conectados entre sí con una red de adaptación  $\lambda/4$ : saliendo del puerto de entrada (a), el frente de ondas en la interfaz entre la red de adaptación y el medio de salida (b), justo cuando el frente de ondas se ha transmitido al medio de salida (c) onda progresando hacia el puerto de salida.

## II. PROPAGACIÓN DE ONDAS EN GUÍAS METÁLICAS

Dentro de las tecnologías utilizadas para el guiado de ondas electromagnéticas, las guías de onda metálicas destacan por sus aplicaciones prácticas y prestaciones. Dado que la asignatura de Propagación y Transmisión de Ondas es el primer punto de contacto de los alumnos con estas técnicas de guiado, se trata de simplificar el análisis, apelando a conceptos sencillos e intuitivos. El estudio se realiza en términos del ángulo de Brillouin, con un tratamiento similar al que se hace en comunicaciones ópticas para explicar la propagación en fibra óptica. Los modos de guía se introducen con esta notación simplificada, que sin embargo permite analizar con un grado aceptable de profundidad conceptos fundamentales como frecuencia de corte, región de corte (atenuación reactiva), región de propagación (guiado de ondas), velocidad de fase, velocidad de grupo, longitud de onda guiada, etc.

Para afianzar dichos conceptos, difíciles de aprehender en una explicación clásica de clase magistral en pizarra, se proponen clases expositivas prácticas donde se muestran resultados de simulación de varios casos de interés.

### A. Región de corte y región de propagación.

Seguramente, el concepto fundamental más importante relacionado con las guías de onda metálicas es el hecho de que, a diferencia de lo que ocurre en líneas de transmisión, existe una frecuencia de corte por debajo de la cual un modo no se propaga, sino que se atenúa reactivamente (atenuación exponencial), mientras que por encima de dicha frecuencia se propaga idealmente sin pérdidas.

Para ilustrar este comportamiento se muestra en la Fig. 6 el campo eléctrico instantáneo en el interior de una guía de onda rectangular, a una frecuencia de operación tal que el modo fundamental ( $TE_{10}$ ) se encuentra por encima del corte (a) y el modo superior  $TE_{20}$  está al corte (b).

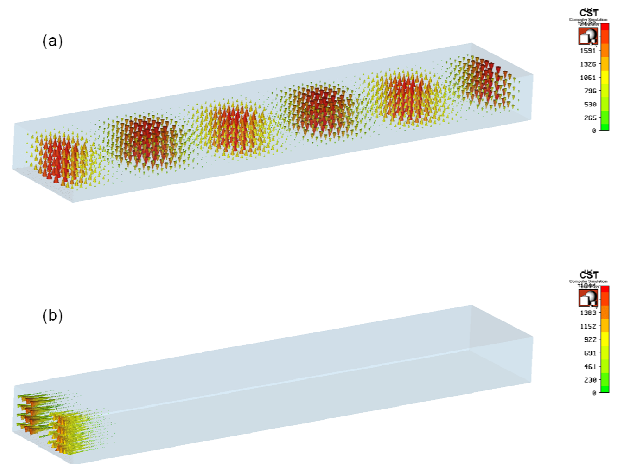


Fig. 6. Vector campo eléctrico instantáneo a una frecuencia en la que el modo fundamental de una guía rectangular ( $TE_{10}$ ) se encuentra por encima del corte (a) y el modo superior  $TE_{20}$  está al corte (b).

### B. Longitud de onda guiada y velocidad de fase.

Para el análisis de la propagación en guías, se distingue entre la dirección transversal a la propagación en la que se produce una onda estacionaria y la dirección de propagación, donde se asume que se propaga una onda efectiva o guiada. De aquí es inmediato deducir que la longitud de onda guiada dentro de la guía es diferente de la longitud de onda de una onda plana en el medio que rellena la guía. En particular, en la clase magistral se demuestra que:

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (1)$$

donde  $\lambda_g$  es la longitud de onda guiada,  $f_c$  es la frecuencia de corte del modo,  $f$  es la frecuencia de operación y  $\lambda$  es la longitud de onda de una onda plana que se propaga por el medio que rellena la guía:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el medio que rellena la guía.

De (1) es obvio que  $\lambda_g > \lambda$  y que, además,  $\lambda_g$  es mayor cuanto más cerca del corte del modo se opere. Estos conceptos, algo abstractos de explicar en una clase magistral, se aclaran al mostrar resultados de simulación. En la Fig. 7 se muestra el vector de campo eléctrico dentro de una guía rectangular a una frecuencia de operación en la que tanto el modo fundamental  $TE_{10}$  como el modo superior  $TE_{20}$  se encuentran en propagación. Se observa claramente que la longitud de onda guiada del modo  $TE_{10}$  es notablemente inferior a la del modo  $TE_{20}$  debido a que éste último se encuentra más próximo al corte (tiene una frecuencia de corte superior).

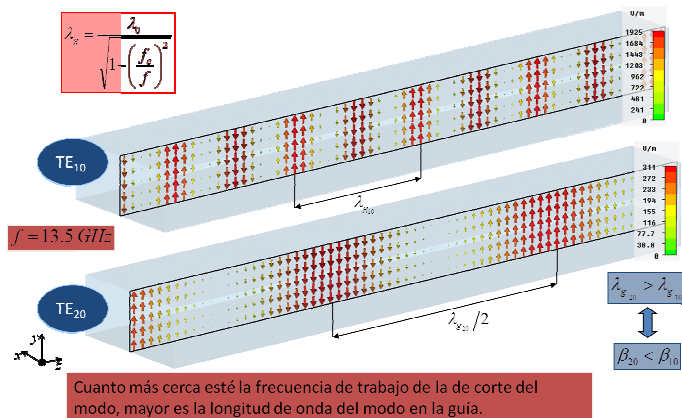


Fig. 7. Vector campo eléctrico instantáneo a una frecuencia en la que el modo  $TE_{10}$  y el modo superior  $TE_{20}$  está en propagación. Se pone de manifiesto que la longitud de onda guiada del modo  $TE_{10}$  es notablemente inferior a la del modo  $TE_{20}$  debido a que éste último se encuentra más próximo al corte.

### C. Propagación multimodal

Una cuestión particularmente importante relacionada con la propagación en guías de onda es la necesidad de asegurar propagación monomodo (con un único modo). En caso contrario (propagación multimodal) se puede producir una degradación de la señal transmitida, que se agrava en presencia de pequeñas imperfecciones como asimetrías en la fabricación de la guía. En un caso extremo puede llegar a ocurrir que prácticamente toda la potencia transmitida por el modo fundamental se transfiera a un modo superior y que esta potencia se disipe debido por ejemplo a que este modo presente mayores pérdidas óhmicas que el modo fundamental, o simplemente que no se acople al receptor optimizado para recibir el modo fundamental.

Los perjuicios de la propagación multimodo son difíciles de asimilar en una clase magistral clásica. En este caso, el simulador es una poderosa herramienta capaz de mostrar gráficamente el resultado de sumar varios modos en propagación dentro de una guía. Se muestra en la Fig. 8 el vector campo eléctrico instantáneo a una frecuencia en la que el modo  $TE_{10}$  y el modo superior  $TE_{20}$  está en propagación, es decir, hay propagación multimodal. Como se observa, la onda que se propaga tiene características de ambos modos y, dependiendo del plano transversal en el que se evalúe, su distribución es diferente, como se muestra en el panel central e inferior.

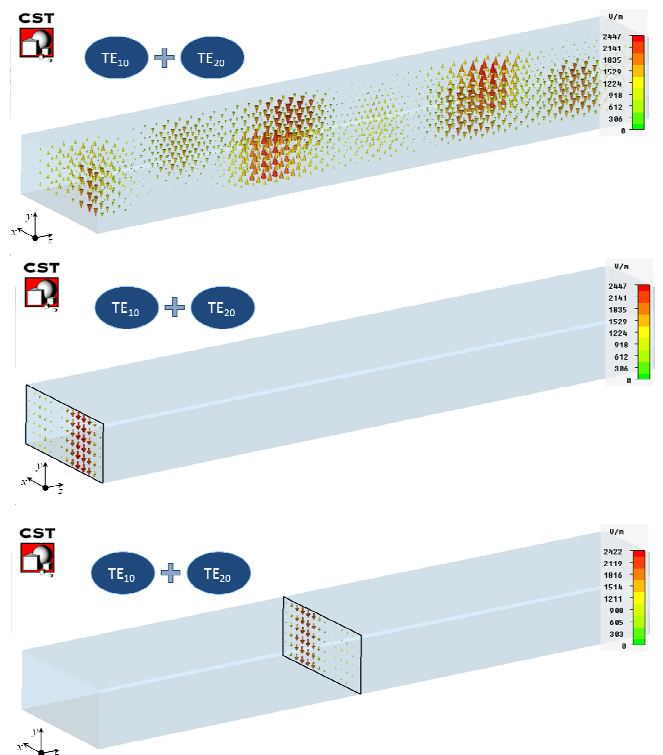


Fig. 8. Vector campo eléctrico instantáneo a una frecuencia en la que el modo  $TE_{10}$  y el modo superior  $TE_{20}$  está en propagación. El campo eléctrico resultante tiene características de ambos modos y, dependiendo del plano transversal en el que se evalúe, su distribución es diferente, como se muestra en el panel central e inferior.

### III. RESULTADOS DE LA EXPERIENCIA

Con el fin de poder valorar el beneficio del empleo de recursos gráficos basados en herramientas de simulación electromagnéticas, se ha empleado una técnica de carácter cuasi-experimental, basada tanto en observación directa del desarrollo docente en clase, como de preguntas directas a los alumnos sobre el uso de dichos recursos. Dicha metodología, de carácter simplificado, viene dado por el número de alumnos promedio en las clases de la asignatura de Propagación y Transmisión de Ondas (en el orden de 30 a 40 alumnos por grupo).

Desde el punto de vista de los docentes, se ha observado que el empleo de los recursos gráficos en la docencia relativa a campos electromagnéticos conlleva los siguientes beneficios:

- Se observa un mayor grado de comprensión de diversos conceptos, tales como la amplitud, la fase y la longitud de onda, de carácter fundamental en la asignatura.
- La interacción de los campos electromagnéticos se puede hacer “visible”, por lo que se puede aprovechar de manera natural dicho recurso con el fin de poder introducir conceptos ligados a sistemas inalámbricos o al diseño de dispositivos propios de sistemas de radiocomunicaciones.
- El empleo de dichos recursos gráficos sirve como pretexto para poder introducir a los alumnos la existencia de herramientas de simulación electromagnética, que son de uso habitual en la profesión de Ingeniero de Telecomunicación.

Desde la perspectiva de los alumnos, las observaciones, de manera sintética, que se han obtenido son las siguientes:

- El hecho de emplear recursos gráficos permite un mayor grado de comprensión de cuestiones fundamentales en la asignatura, sobre todo aquellas relativas a la caracterización de campos electromagnéticos. Si bien es cierto que existen limitaciones en relación con el manejo de herramientas de cálculo vectorial, el hecho de poder observar el módulo y la fase de una onda electromagnética en diferentes contextos ayuda a afianzar dichos conceptos.
- Los alumnos valoran poder conocer una herramienta de uso profesional, con la cual no sólo pueden comprender el comportamiento de los campos electromagnéticos, sino que además permite el diseño de dispositivos empleados comúnmente en sistemas inalámbricos, tales como filtros, acopladores o antenas y que posteriormente irán viendo con mayor detalle en otras asignaturas de la carrera.

En la Fig. 9 se muestra de manera esquemática los resultados preliminares obtenidos en relación con el empleo de dichos recursos gráficos en la asignatura de Propagación y Transmisión de Ondas.

## EMPLEO DE RECURSOS GRÁFICOS

### DESDE LA PERSPECTIVA DEL PROFESOR

- MAYOR GRADO DE COMPRENSIÓN DE CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE CAMPOS EM
- INTRODUCCIÓN DE CONCEPTOS COLATERALES (DISPOSITIVOS/SISTEMAS INALÁMBRICOS)
- INTRODUCCIÓN A HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN EMPLEADAS DE MANERA PROFESIONAL

### DESDE LA PERSPECTIVA DEL ESTUDIANTE

- COMPRENSIÓN DE CONCEPTOS FUNDAMENTALES, APOYO AL DESARROLLO DE CLASE MAGISTRAL
- EXPOSICIÓN A HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN COMERCIALES, DE AMPLIA ACEPTACIÓN PROFESIONAL Y CON VALOR CURRICULAR

Fig. 9 Descripción esquemática de la percepción, tanto de los docentes como de los estudiantes del empleo de recursos gráficos de representación de campos electromagnéticos.

### IV. CONCLUSIONES

El análisis cualitativo de los resultados muestra que los alumnos observan de manera más intuitiva los fenómenos descritos en clase, lo que mejora el proceso docente. Mediante una aproximación inicial simplificada de observación en el aula y de pregunta directa a los alumnos, se observa beneficio en el empleo de dichos recursos gráficos tanto por parte de los estudiantes como de los docentes. Desde el punto de vista de los docentes, dichos recursos facilitan la comprensión de conceptos fundamentales de campos electromagnéticos, vinculados fuertemente tanto a su carácter vectorial como ondulatorio (variación temporal y espacial). Por su parte, los alumnos reconocen la ayuda en la comprensión de dichos parámetros fundamentales, así como la introducción a herramientas de carácter profesional para la caracterización del comportamiento de campos electromagnéticos, que posteriormente sirven para el diseño de múltiples dispositivos y componentes de sistemas inalámbricos.

Cabe esperar que dichos beneficios se observen posteriormente en el desarrollo del resto de materias afines en cursos superiores, conforme dichos alumnos cursen dichas asignaturas en los dos próximos cursos académicos.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se dedica a la memoria del Prof. Mario Sorolla Ayza, nuestro mentor y amigo (10 de octubre de 1958–1 de noviembre de 2012).

M. B. agradece la financiación del MINECO a través del contrato RYC-2011-08221.

### REFERENCIAS

- [1] Programa de Estudios de Grado de Ingeniero en Tecnologías de Telecomunicación, <http://www.unavarra.es/ets-industrialesytelecos/estudios/grado/grado-en-ingenieria-en-tecnologias-de-telecomunicacion/lista-asignaturas?submenu=yes>

- [2] Real Decreto RD 1393/2007
- [3] Orden Ministerial CIN /352/2009
- [4] Orden Ministerial CIN /355/2009
- [5] H. Roussel, M. H'elier, "Difficulties in teaching electromagnetism: an eight year experience at Pierre and Marie Curie University," Adv. Electromag., vol.1, no.1, pp. 65-69, May 2012
- [6] N. Anderson, M. Mina, "A New Approach in Teaching Electromagnetism: How to Teach EM to All Levels from Freshman to Graduate and Advanced-Level Students", Proc. of the 2003 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition
- [7] M. Sorolla, M. Beruete, F. Falcone, V. Torres, M. Navarro-Cía, "Should classical electrodynamics be leaved?," Proc. of the Advanced Electromagnetics Symposium, AES 2012, Paris, France, (2012)