

MCSI: APLICACIONES INTERACTIVAS PARA VISUALIZAR LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN CIRCUITOS DE MICROONDAS

GOMEZ TORNERO, José Luis; CAÑETE REBENAQUE, David; FERRER GARCIA, María Isabel; Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (DTIC)

RESUMEN

En esta comunicación se mostrarán un conjunto de aplicaciones interactivas concebidas para facilitar el proceso de aprendizaje y enseñanza de *asignaturas de grado y postgrado* en el ámbito de la *Ingeniería de Circuitos de Microondas y Alta Frecuencia*. Estas asignaturas comparten el inconveniente de tratar con magnitudes (campos electromagnéticos y corrientes de alta frecuencia), que no pueden ser visualizadas por los alumnos de manera directa (ya que las ondas electromagnéticas y sus efectos no son perceptibles por los órganos sensoriales humanos como los ojos), ni tampoco medidas de forma experimental si no se hace uso de instrumentación muy costosa (un analizador de redes de alta frecuencia supera con creces los 20000 euros).

Por estos motivos, varios profesores que imparten este tipo de asignaturas han comenzado a desarrollar, en colaboración con los mismos alumnos [1], un conjunto de *aplicaciones informáticas interactivas*, en las que se pueden visualizar los campos y corrientes electromagnéticas asociadas a los circuitos de microondas estudiadas en dichas asignaturas. De esta manera, el alumno puede entender de forma *visual e interactiva* el funcionamiento de estos circuitos, que de otra forma resultan muy abstractos. Así mismo, el alumno puede interactuar con los diferentes circuitos, de forma que constate el efecto que tiene la modificación de sus componentes electrónicos y líneas de transmisión en el flujo de dichos campos electromagnéticos, y por tanto en el funcionamiento final de los circuitos.

Estas aplicaciones son accesibles desde Internet [2] y se han desarrollado usando el entorno de programación Flash [3]. Las figuras 1 y 2 muestran volcados de pantalla de dicha página web, que se ha denominada MCSI ("*MiCrowave Scene Investigation*"). Por otro lado, los diseños de los circuitos de microondas se realizaron con el CAD *Microwave Office* (MWO) de *Advanced Wave Research* (AWR) [4], y las animaciones de los campos electromagnéticos resultantes en dichos circuitos se obtuvieron con el programa de análisis electromagnético comercial *High Frequency Structure Simulator* (HFSS) de la compañía *Ansoft* [5], y se exportaron para su posterior inserción en las aplicaciones interactivas. De esta forma, se evita que el alumno deba instalar los programas comerciales de análisis y diseño electromagnético, reduciendo enormemente el coste económico y temporal de los alumnos.

En la ponencia se mostrará el funcionamiento de esta aplicación on-line interactiva, destacando los efectos positivos de la metodología usada para mejorar el proceso de enseñanza y aprendizaje en este tipo de asignaturas, así como la respuesta observada en los alumnos universitarios de últimos cursos de Ingeniería Superior de Telecomunicación.



Figura 1: Página web MCSI.

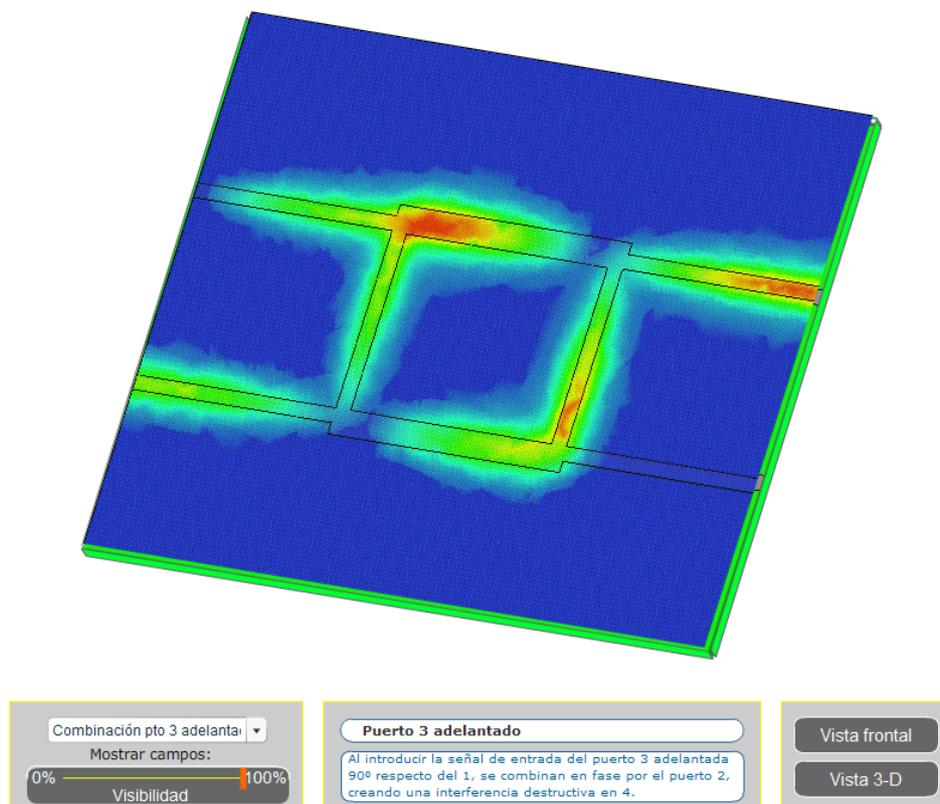


Figura 2: Ejemplo de una de las aplicaciones interactivas mostrando las corrientes de alta frecuencia en un circuito híbrido de microondas.

1. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

El sistema educativo universitario europeo está viviendo el denominado “proceso de Bolonia” [6] por el cual se pretende realizar los cambios necesarios para configurar el nuevo Espacio Europeo de Educación Superior (EEES) en cada uno de los 45 países anexados a la declaración de Bergen [6]. Por la parte que toca al sistema universitario español [7], el curso 2010-2011 es el primer curso en el que los nuevos grados adaptados al modelo de EEES deben comenzar a impartirse de manera obligatoria. Uno de los puntos claves de este proceso consiste en un cambio del sistema de aprendizaje/enseñanza, de forma que se le da más peso a un aprendizaje constructivo, basado en el trabajo del alumno, y en el desarrollo de competencias aplicadas que formen a los futuros profesionales [6,7]. Se pretende así acortar el gran trecho existente entre el mundo académico y el mundo profesional, así como hacer de la enseñanza universitaria una enseñanza más aplicada, sin menoscabo de los contenidos teóricos necesarios. Estos objetivos no parecen sencillos, tal y como se expresa en varios foros como la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT) [8], que manifiestan preocupación ante la falta de inquietudes, ilusión y formación de un alto porcentaje de alumnos de Educación Secundaria Obligatoria (ESO) ante el panorama de los objetivos de Bolonia [9].

En este contexto, varios profesores de la Escuela Superior de Ingeniería de Telecomunicación (ETSIT) de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) [10], llevan más de 8 años involucrados en diferentes actividades de innovación docente con el fin último de aumentar el interés y la confianza de los alumnos sobre su formación en materia de Ingeniería de Circuitos de Microondas y Alta Frecuencia (alguna de las publicaciones derivadas de este trabajo se pueden consultar en las referencias [11],[12],[13] y [14]).

En concreto, los profesores de las asignaturas afines a esta área de conocimiento (tales como Campos Electromagnéticos, Ingeniería de Circuitos de Microondas, Ingeniería de Antenas, Comunicaciones Inalámbricas, o Comunicaciones Satélite), somos conscientes de la dificultad inherente al tratar estas materias con magnitudes de carácter abstracto, difícilmente observables y entendibles, como lo son los campos electromagnéticos y las corrientes inducidas de alta frecuencia. La figura 3 muestra un esquema que ilustra un set-up experimental de circuitos de microondas desarrollados por alumnos de la ETSIT de la UPCT en el contexto del proyecto aplicado [11]. En aquel proyecto, se involucró a los alumnos en el diseño, fabricación y testeo de los diferentes subsistemas de microondas necesarios para el desarrollo de un pequeño Radiotelescopio. El objetivo final buscado era de nuevo incentivar el interés por estas materias, esta vez estimulando la motivación ante el desarrollo de un proyecto aplicado, ambicioso, y de gran envergadura, en el que era necesario trabajar en equipo y desarrollar habilidades experimentales. Si bien los alumnos muestran una excelente respuesta ante este tipo de proyectos, y con creces se ve aumentado el interés y la confianza ante la formación recibida, el punto más negativo de este tipo de proyectos es el elevado coste de tiempo y recursos necesarios para su desarrollo. Como se puede apreciar en la figura 3, el proceso de trabajo experimental necesita de los siguientes pasos: 1-estudio teórico del circuito de alta frecuencia que se pretende diseñar [16,17,19], 2-simulación usando herramientas de diseño asistido por ordenador (CAD), 3-fabricación del prototipo usando máquinas de fresado de alta precisión, 4-medida experimental de los parámetros eléctricos del circuito fabricado usando instrumentación de alta frecuencia, 5-reajuste y posible rediseño del circuito diseñado a la vista de los resultados experimentales. Este proceso está detallado en cada uno de los informes técnicos descargables en [11], y en particular el desarrollo de uno de estos subsistemas está descrito cuidadosamente en la publicación [12].

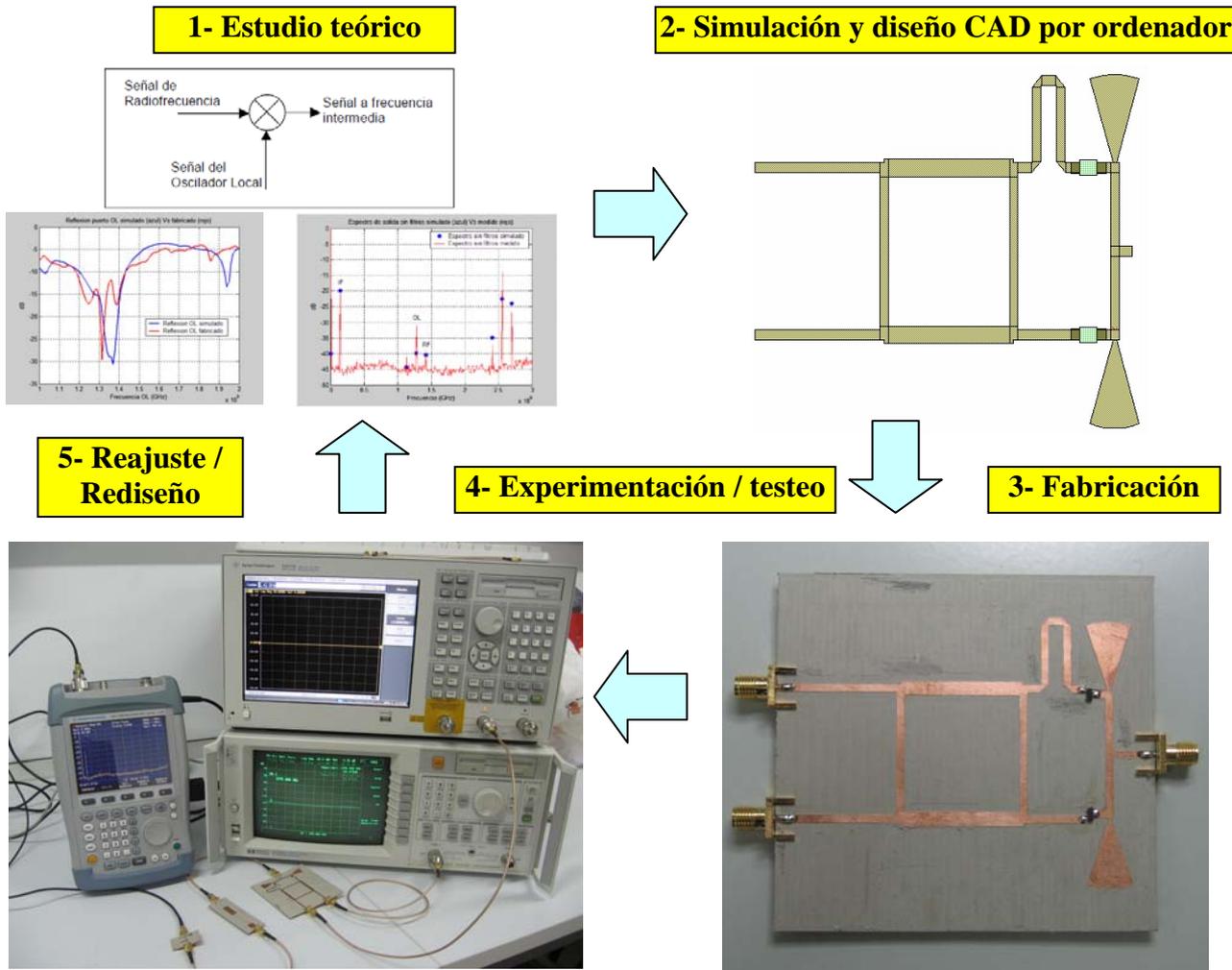


Figura 3: Proceso de desarrollo de un circuito de microondas “real” (mezclador de microondas).

Como se ha comentado en las líneas anteriores, este tipo de proyectos que manejan circuitos físicos, tienen la gran ventaja de situar al alumno ante una actividad experimental, real, tangible, y en la que el aprendizaje constructivo es inherente al mismo proceso de fabricación y medidas experimentales. Sin embargo, su gran inconveniente es el elevado coste, tanto económico (debido a la instrumentación necesaria para la fabricación y medida de circuitos de alta frecuencia) como temporal (se requieren de muchas sesiones tuteladas por expertos para lograr manejar tanto el software de simulación electromagnética/circuitual de alta frecuencia [12] como para manipular los instrumentos de fabricación y medida). Por ejemplo, el circuito mezclador mostrado en la figura 3 necesitó de dos meses para su diseño asistido por ordenador, durando cada simulación electromagnética en torno a 15 minutos. Teniendo en cuenta que el diseño consiste en sucesivas simulaciones hasta que se consiguen las especificaciones requeridas, se puede entender el elevado tiempo de cálculo numérico involucrado en el diseño CAD. Por otro lado, la fabricación del circuito (prototipado de las pistas de alta frecuencia y soldado de componentes y conectores) suele requerir una semana. Por último, la fase experimental necesita de un par de semanas, más las necesarias en el ajuste, rediseño y testeo si los resultados experimentales no son satisfactorios. El coste de un programa comercial de CAD de microondas ronda los 20000 euros, y la instrumentación de fabricación y medida mostrada en la figura 3 ronda los 40000 euros [12].

Ante esta situación, se tomó la decisión de realizar un proyecto de innovación educativa, en el que de nuevo colaboraron varios alumnos de últimos cursos mediante la realización de sus respectivos Proyectos Fin de Carrera [1],[15]. Estos nuevos proyectos consistían en el desarrollo de aplicaciones interactivas que pudieran ser ejecutadas en una plataforma web, y en las que los alumnos pudieran observar animaciones de los campos y las corrientes electromagnéticas que fluyen por los circuitos de microondas estudiados en la bibliografía de las asignaturas anteriormente mencionadas ([16],[17],[18],[19] y [20]). Esta vez los circuitos no son reales, sino *virtuales*, evitando los inconvenientes anteriormente mencionados. Además, los alumnos no necesitan usar costosos software de simulación electromagnética a la hora de analizar los campos electromagnéticos en estos circuitos, ya que ese trabajo se ha realizado previamente y los resultados (en forma de animaciones de fotogramas) se han insertado en la aplicación interactiva. De esta manera el tiempo necesario para obtener los resultados que se desean mostrar, y para analizarlos y aprender de ellos, se reduce drásticamente. El alumno es guiado a los resultados que debe razonar a través de las aplicaciones interactivas que se describen en este artículo. Por ejemplo, el mismo circuito híbrido (con forma de cuadrado) que se observa en la fotografía del prototipo fabricado en la figura 3, se puede observar modelado “virtualmente” en la figura 2, junto con la visualización de las corrientes de alta frecuencia (1.42GHz) que fluyen por sus líneas de transmisión impresas.

Los requisitos y objetivos que se marcaron a la hora de concebir estas aplicaciones de innovación educativa fueron los siguientes:

1. Las aplicaciones deben ser *interactivas*, de forma que el alumno deba actuar con ellas para llegar al resultado que se pretende mostrar. Involucrando al alumno en la obtención de los resultados se aumenta el grado de *aprendizaje constructivo*.
2. Por otro lado, el nivel de *guiado* de las aplicaciones hacia los resultados necesarios, debe ser suficiente para reducir el tiempo de análisis de los circuitos (como suele pasar cuando los estudiantes se enfrentan a un diseño mediante CAD).
3. Las aplicaciones deben ser *accesibles desde internet*, sin que necesiten de ningún software de simulación electromagnético comercial, lo cual aumentaría el *coste económico* y la complejidad de obtención de los resultados.
4. Es deseable que los resultados que muestran los campos electromagnéticos puedan ser obtenidos en *tiempo real*, de nuevo buscando reducir el tiempo de espera y así dotar de una mayor continuidad al proceso de aprendizaje basado en observación de las animaciones de los campos electromagnéticos.
5. En la medida de lo posible, también es deseable que el *nivel de interactividad* de las aplicaciones permita que el estudiante pueda *elegir entre diferentes situaciones* que muestren los *circuitos de microondas funcionando incorrectamente y correctamente*. Esta metodología de comparación de estos dos tipos de escenarios o contraposición dota al proceso de aprendizaje constructivo de una mayor profundidad.

A la vista de las anteriores premisas se optó por usar el entorno de programación basado en la plataforma Adobe Flash [3], ya que permite el desarrollo de aplicaciones interactivas que se ejecutan en un entorno Web, y a las que se puede incorporar un elevado grado de interactividad en un entorno gráfico “*user friendly*” (usando controles gráficos como botones, barras desplazadoras, ventanas emergentes...), así como la inserción de fotogramas animados. Estos fotogramas animados, por su parte, tienen la misión de representar los campos electromagnéticos y las corrientes de alta frecuencia que fluyen por los circuitos de microondas representados en las diferentes aplicaciones.

En las siguientes secciones se resume el trabajo realizado hasta la fecha, los resultados obtenidos, y las conclusiones derivadas y las líneas futuras abiertas ante la iniciativa desarrollada.

2. APLICACIONES EN MCSI

2.1. Ventana Principal



Figura 4: Ventana de introducción de MCSI y ventana sobre la tecnología microstrip.

A la ventana principal de las aplicaciones se accede a través de una dirección de internet abierta [2], tal y como se muestra en la figura 4. El entorno web se ha denominado MCSI (“*MiCrowave Scene Investigation*”), relacionando en tono humorístico dicho nombre con la conocida serie de televisión CSI (“*Crime Scene Investigation*”), en referencia al hecho de que el alumno debe investigar cual detective sobre las diferentes escenas que representan distintos circuitos de microondas. El estudiante debe extraer la información oculta a la vista de los campos electromagnéticos, sobre los motivos por los que los circuitos funcionan correctamente o por el contrario no presentan un funcionamiento adecuado.

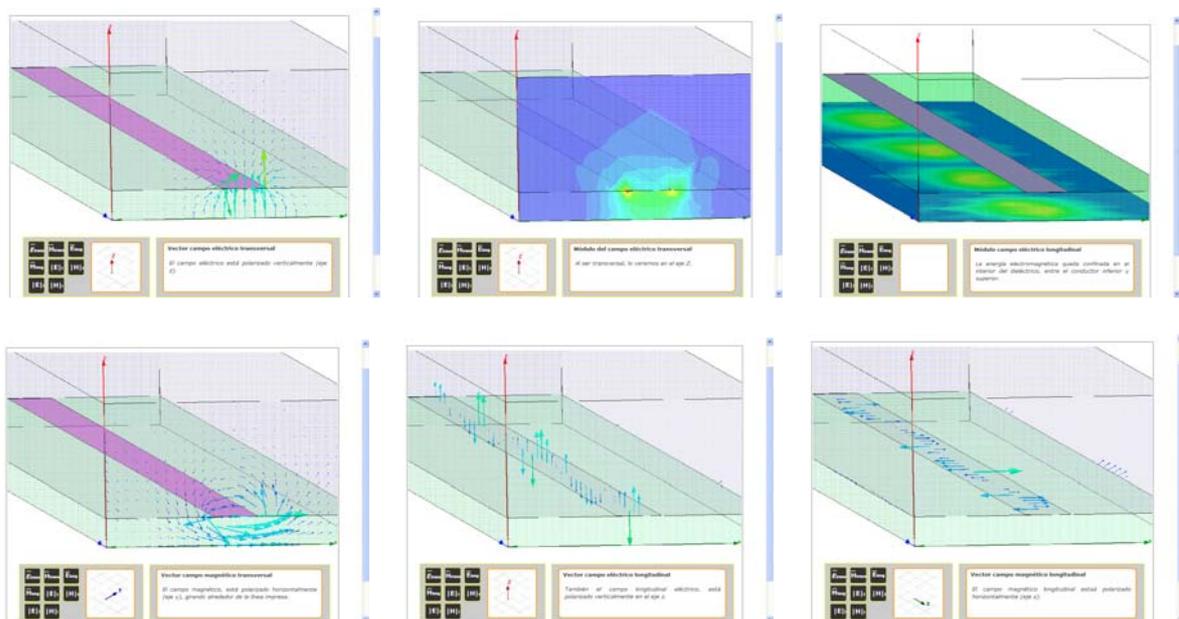


Figura 5: Ventanas mostrando los campos electromagnético en líneas microstrip básicas.

En concreto, se estudia la tecnología de circuitos de microondas denominada “*microstrip*” (microtira o microcinta en español) [16],[17],[18], por tratarse de una tecnología muy extendida entre circuitos de alta frecuencia comerciales y de electrónica de consumo (teléfonos móviles,), debido a su bajo coste, facilidad de fabricación y conexión de componentes. En el futuro, se pretende ampliar el entorno para abarcar otras tecnologías, como la de guía coaxial y guía de onda [17],[19], que aunque son más costosas, presentan mejores prestaciones electromagnéticas, por lo cual estas tecnologías alternativas son muy usadas en aplicaciones de comunicaciones espaciales, RADAR, aplicaciones militares, científicas, y en general cualquier aplicación que requiera de altas potencias de transmisión y/o de elevadas sensibilidades de detección. La figura 5 muestra los campos electromagnéticos en una línea microstrip básica adaptada. El estudiante debe así familiarizarse con la polarización del campo eléctrico y del campo magnético que son transportados por dicho medio de transmisión, tanto en los planos transversos como en los longitudinales. La figura 6, por su parte, muestra la evolución de las ondas electromagnéticas en líneas adaptadas y líneas muy desadaptadas (acabadas en cortocircuito y en circuito abierto), para que el estudiante compare los diferentes casos y entienda el aspecto que tiene una onda estacionaria en contraposición a una onda progresiva. Los animaciones de los campos electromagnéticos fueron obtenidos mediante el software comercial HFSS [5], y fueron exportadas como ficheros en formato gif animado (*animated gif*) para la posterior inserción de los fotogramas en las aplicaciones Flash programadas [1]. Estas aplicaciones introducen al usuario en el manejo de la interfaz gráfica y sus controles, y le ayudan a entender conceptos como el significado de longitud de onda, y el de adaptación/desadaptación entre líneas de transmisión.

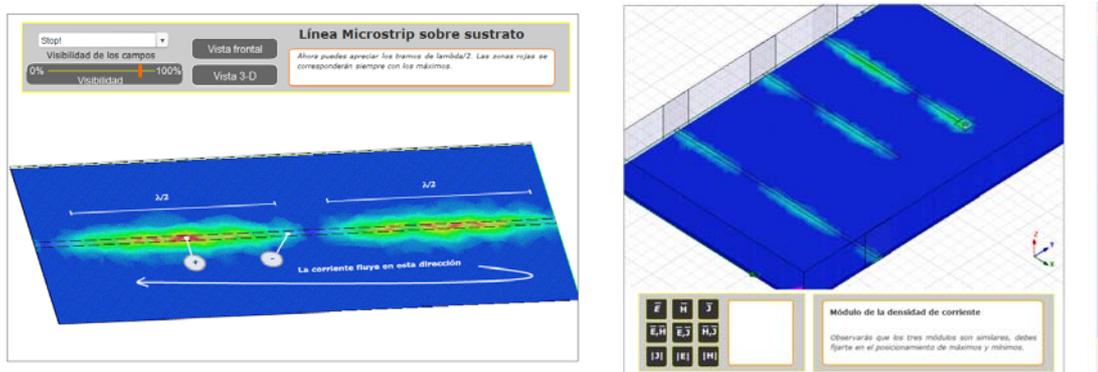


Figura 6: Ventanas mostrando el concepto de onda progresiva y onda estacionaria en líneas adaptadas y desadaptadas (respectivamente).

2.2. Visualización de campos electromagnéticos en circuitos aplicados

Una vez introducido el usuario en los fundamentos básicos sobre visualización de campos electromagnéticos y corrientes en líneas microstrip básicas, el resto de aplicaciones se centran en circuitos impresos más avanzados, que son diseñados usando el CAD *Microwave Office* [4]. Los circuitos están clasificados por el número de conectores (también denominados accesos o puertos), tal y como se hace en la bibliografía clásica sobre circuitos de microondas [17],[18],[19]. Así el estudiante puede seleccionar entre redes pasivas de dos, tres y cuatro puertos. Mención aparte tienen los filtros y los amplificadores de microondas (que son redes de dos accesos, pero se tratan independientemente por su naturaleza selectiva en frecuencia y activa, respectivamente [17]), así como los osciladores de microondas (que son circuitos de un solo puerto activos) y las antenas (también circuitos de microondas de un solo puerto, pero esta vez pasivos y con pérdidas por radiación electromagnética).



Figura 7: Ventanas mostrando diferentes circuitos divisores/combinadores de microondas.

Como ejemplo ilustrativo, se muestran en la figura 7 dos circuitos de tres puertos que se usan como divisores/combinadores de señales de microondas. En concreto, la aplicación permite visualizar las corrientes para entender las diferencias de funcionamiento entre estos dos circuitos. En este caso concreto, la principal diferencia consiste en que uno de los circuitos funciona no sólo como divisor de señal (la señal introducida por uno de sus accesos es dividida por los otros dos accesos, a modo de “T” o divisor), sino también como combinador (dos señales independientes son introducidas por dos accesos, y combinadas en un tercer acceso de salida). Esta operación de combinación sólo es posible si los dos accesos de entrada están suficientemente aislados, de forma que las dos señales de entrada no se interfieran en los puertos de acceso, y la interferencia o combinación sólo se produce en el acceso de salida. La figura 8 ilustra esta comparación, mostrando que uno de los circuitos no es capaz de conseguir el aislamiento deseado entre los dos accesos de entrada (no siendo por tanto un circuito apto para realizar tareas de combinación de señal), mientras que el segundo circuito sí que mantiene aislados los dos accesos de entrada. La aplicación incluye explicaciones gráficas de estos fenómenos, de forma que el estudiante va siendo guiado continuamente sobre el fenómeno que se intenta destacar en cada caso para ayudar a la comprensión del mismo.

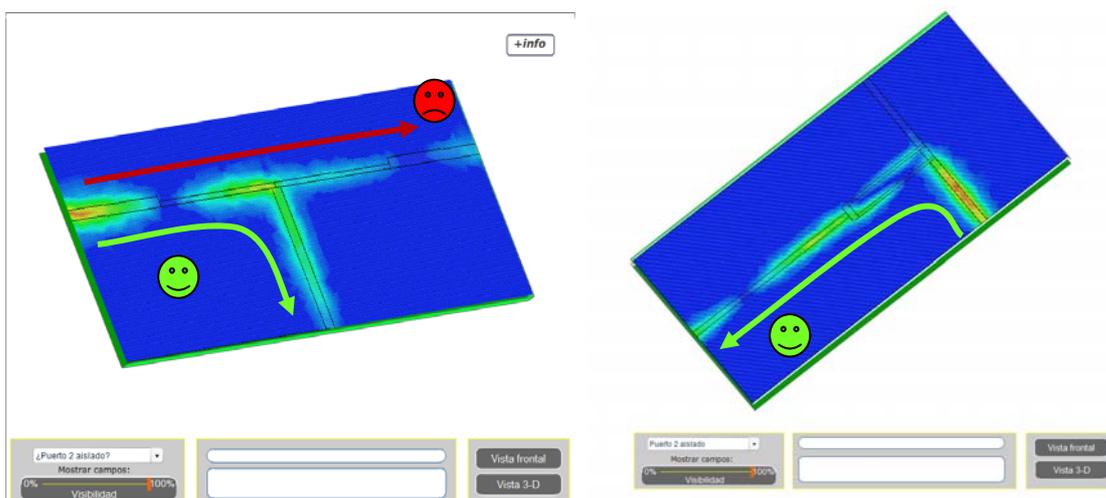


Figura 8: Ventanas mostrando la comparación entre un circuito con accesos no aislados (izquierda) y uno con accesos aislados (derecha).

2.3. Contrastación entre circuitos correctos y erróneos

Otra aplicación interesante para comprender con profundidad cómo funcionan los diferentes circuitos de microondas estudiados, consiste en analizar el circuito cuando está diseñado correctamente (en cuyo caso las corrientes y los campos deben fluir al lugar que les corresponde) y cuando no está diseñado correctamente (en cuyo caso deben aparecer ondas estacionarias indeseadas, o señales acopladas en lugares que no deberían aparecer).

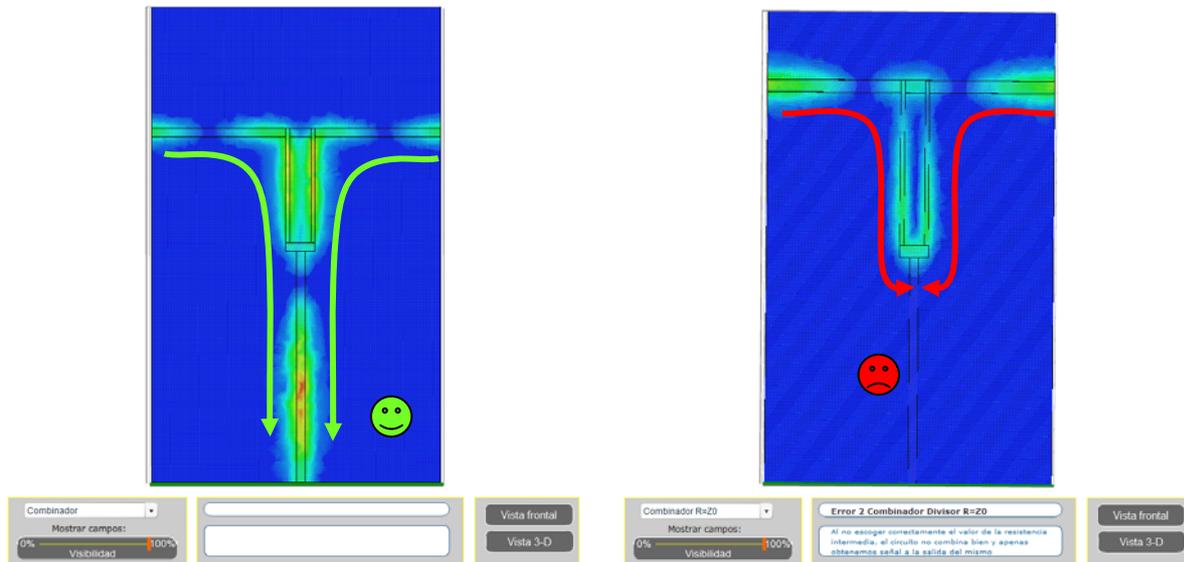


Figura 9: Ventanas mostrando la comparación de las corrientes en un circuito divisor diseñado correctamente (izquierda) y uno erróneo (derecha).

La figura 9 muestra un ejemplo, de nuevo para el caso del circuito combinador mostrado en las figuras 7 y 8. En la izquierda se muestran las corrientes que fluyen cuando el circuito está correctamente diseñado, observando cómo dichas señales de alta frecuencia se combinan correctamente a la salida. Sin embargo, si uno de los componentes de este circuito (en este caso una resistencia) se diseña con un valor no adecuado, se obtiene el resultado mostrado en la parte derecha. Las señales no se combinan correctamente, y no se obtiene ninguna señal en el puerto de salida. Mediante este análisis de contrastes, el alumno puede asimilar con mayor profundidad la necesidad de un diseño correcto, y las repercusiones de un diseño erróneo.

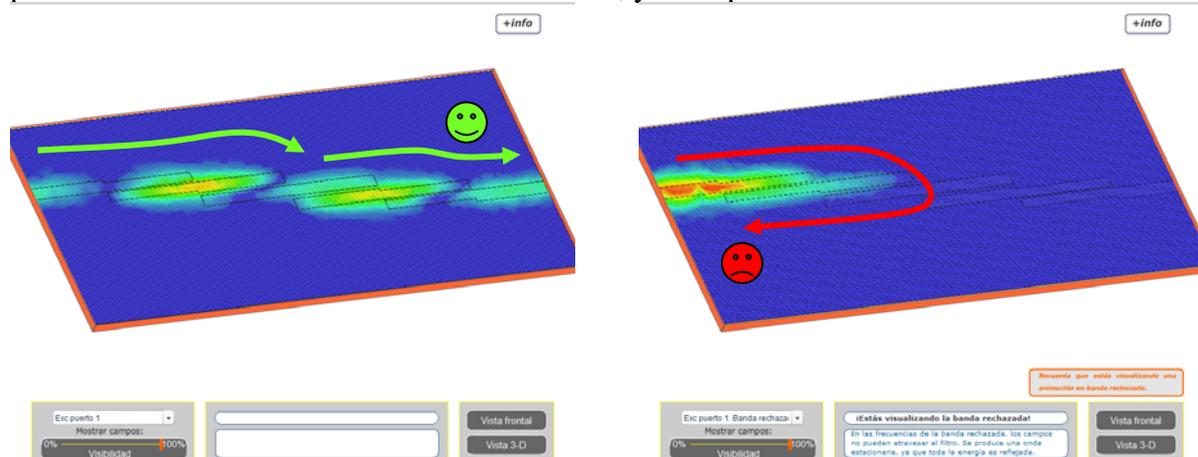


Figura 10: Funcionamiento de un filtro paso banda de microondas.

Usando esta metodología, el estudiante puede ahondar de una forma constructiva e interactiva sobre el funcionamiento de estos circuitos, que de otra forma resultarían más complicados de comprender debido al nivel de abstracción necesario. Otro ejemplo aclaratorio se representa en la figura 10, que muestra el análisis comparativo de las corrientes de microondas en un filtro paso banda, tanto en la banda de paso (izquierda) como en la banda rechazada (derecha). En la figura se ilustra cómo sólo las señales con frecuencias en la banda de paso pueden pasar a través del filtro (izquierda), que a su vez rechaza las señales de otras frecuencias (derecha).

2.4. Otras aplicaciones interactivas asociadas

Por último se muestra un ejemplo de otro tipo de aplicaciones interactivas. La figura 11 ilustra una de estas aplicaciones, consistente en rellenar la matriz de parámetros S de un circuito divisor/combinador. La matriz de parámetros S describe el funcionamiento de los circuitos de microondas [16],[17], y es una herramienta que deben dominar los estudiantes de Ingeniería de Radiofrecuencia. Esta aplicación les permite jugar de forma interactiva con esta matriz. El estudiante debe colocar los valores adecuados en las diferentes casillas o posiciones de la matriz, y el programa les dice si cada movimiento ha sido correcto, y en caso contrario, les guía sobre el significado de cada parámetro.

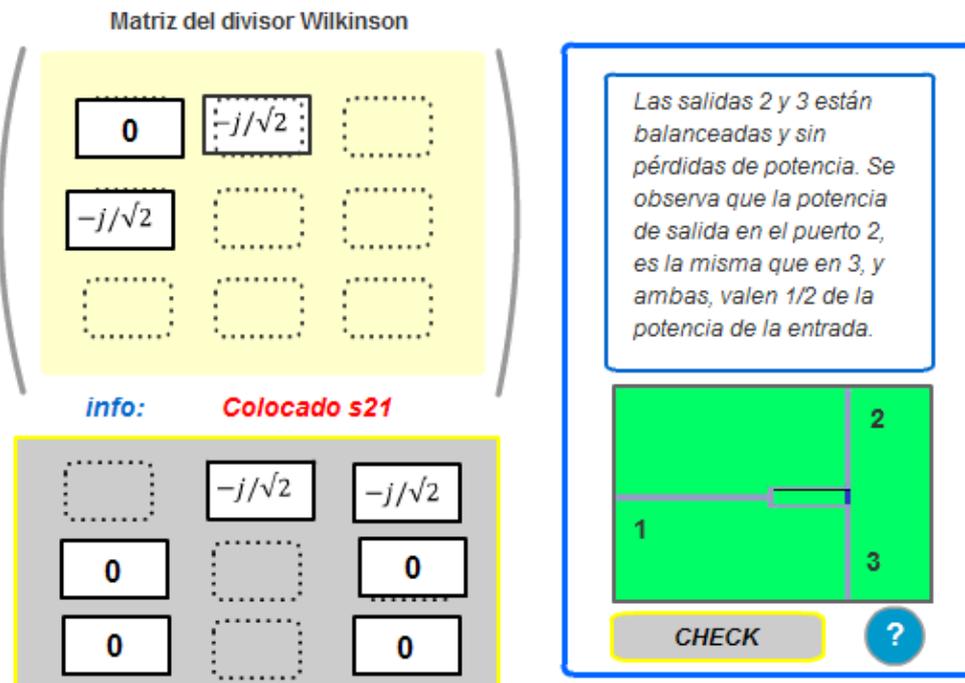


Figura 11: Aplicación para experimentar con los parámetros S de los circuitos de microondas.

3. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Se ha presentado un conjunto de aplicaciones interactivas programadas en el entorno Adobe Flash y accesibles desde un navegador de Internet, y que contienen simulaciones animadas de los campos electromagnéticos y las corrientes que fluyen a través de circuitos de microondas prácticos, que encuentran su aplicación en multitud de sistemas de telecomunicación inalámbrica [20]. Estas aplicaciones han sido usadas como material de apoyo en la docencia de asignaturas como Ingeniería de Microondas, Ingeniería de Antenas, Aplicaciones de las

Microondas, y Subsistemas de Microondas. La respuesta de los alumnos ha sido muy positiva, manifestando en la mayoría de los casos que estas aplicaciones y la metodología de contrastación de casos usada, ha sido de gran ayuda para comprender muchos de los conceptos y circuitos estudiados en las asignaturas de grado mencionadas.

Por otro lado, quedan varios casos de circuitos de microondas básicos (amplificadores, osciladores, redes de adaptación) por añadir a la página web, junto con sus respectivas aplicaciones interactivas. También, se están desarrollando otro tipo de aplicaciones, cuyo aspecto se asemeja más al de un juego de ordenador tipo aventura gráfica, en las que el alumno maneja un personaje que se mueve en un entorno virtual y debe interactuar con diferentes circuitos de microondas, resolviendo distintas pruebas relacionadas con los mismos, para poder avanzar a lo largo del juego [15].

4. REFERENCIAS

- [1] FERRER GARCIA, M.I. *Desarrollo de una página web con aplicaciones flash para asistir en el proceso de aprendizaje y enseñanza de circuitos de microondas en tecnología microstrip*. Proyecto Fin de Carrera, ETSIT UPCT, Cartagena, Septiembre 2008, Director: José Luis Gómez Tornero. Disponible en el Repositorio Digital de la Biblioteca de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT): <http://repositorio.bib.upct.es/dspace/handle/10317/736> [Consulta: 15 octubre 2010]
- [2] *Web de las Aplicaciones Interactivas MCSI*. Disponible en: <http://www.upct.es/geat/>→Radiotelescopio→Aplicaciones [Consulta: 15 octubre 2010]
- [3] *Web de la Plataforma Adobe Flash*. Disponible en: <http://www.adobe.com/es/flashplatform/> [Consulta: 15 octubre 2010]
- [4] *Microwave Office (MWO) de Advanced Wave Research (AWR)*. Disponible en: <http://web.awrcorp.com/Usa/Products/Microwave-Office/> [Consulta: 15 octubre 2010]
- [5] *High Frequency Structure Simulator (HFSS) de Ansoft*. Disponible en: <http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/> [Consulta: 15 octubre 2010]
- [6] Web europea del proceso de Bolonia. Disponible en: <http://www.ond.vlaanderen.be/hogeronderwijs/bologna/aboutthiswebsite/> y en <http://www.bologna-bergen2005.no/> [Consulta: 15 octubre 2010]
- [7] Web española del proceso de Bolonia. Disponible en: <http://www.quesbolonia.gob.es/> [Consulta: 15 octubre 2010]
- [8] Web de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT). Disponible en: <http://www.fecyt.es> [Consulta: 15 octubre 2010]
- [9] Web española del proceso de Bolonia en la educación secundaria. Disponible en: <http://www.educacion.es/boloniaensecundaria/> [Consulta: 15 octubre 2010]
- [10] Web española de la ETSIT de la UPCT. Disponible en: <http://www.etsit.upct.es/> [Consulta: 15 octubre 2010]

- [11] Proyecto financiado por la Fundación Séneca 02972/PI/05, “*Desarrollo de un radiotelescopio para divulgación de Radioastronomía y exploración de nuestra Galaxia*”, Coordinador: José Luis Gómez Tornero, Universidad Politécnica de Cartagena (2006-2008). Información disponible en:
<http://www.upct.es/geat/>→Radiotelescopio [Consulta: 15 octubre 2010]
- [12] GOMEZ TORNERO, J.L. et al., Capítulo 13 de *TICAI2007: TICs para el Aprendizaje de la Ingeniería*, "Oscilador de microondas por generación de armónicos para facilitar el aprendizaje de circuitos de alta frecuencia", ©IEEE, Sociedad de Educación: Capítulos Español, Portugués y Colombiano, Martín Llamas Nistal, Carlos Vaz de Carvalho, y Carlos Rueda Artunduaga, editores, ISBN 978-84-8158-380-9, pp.87-94, 2008.
- [13] GOMEZ TORNERO, J.L. et al. *Development of a Small Radio Telescope at the Technical University of Cartagena, IEEE Education Engineering 2010, EDUCON 2010*, ISBN 978-1-4244-6571-2, pp.1195-1201, April 2010.
- [14] GOMEZ TORNERO, J.L. et al. *Interactive Lab to Learn Radio Astronomy, Microwave & Antenna Engineering at the Technical University of Cartagena (Spain)*, International Journal of Online Engineering (iJOE) of the International Association of Online Engineering (IAOE). Publicación programada para Febrero de 2011.
- [15] MUÑOZ LAPAZ, A.J. *Desarrollo de un entorno interactivo para asistir en el proceso de aprendizaje y enseñanza de circuitos de microondas*. Proyecto Fin de Carrera, ETSIT UPCT, Cartagena, Noviembre 2008. Director: José Luis Gómez Tornero. Disponible en el Repositorio Digital de la Biblioteca de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT):
<http://repositorio.bib.upct.es/dspace/handle/10317/742> [Consulta: 15 octubre 2010]
- [16] GOMEZ TORNERO, J.L. *Transmisión por Soporte Físico; Ejercicios resueltos de circuitos pasivos y activos de microondas*, MORPI, S.L., 2006 (ISBN: 84-95781-70-0).
- [17] POZAR, D.M. *Microwave Engineering*, 3rd Ed., John Wiley and Sons, 1998.
- [18] BAHL, I. *Microwave Solid State Design*, 2nd Ed. John Wiley and Sons, 2003.
- [19] COLLIN, E.R. *Foundations for Microwave Engineering*, 2nd Ed., IEEE Press, 2001.
- [20] POZAR, D.M. , *Microwave and RF wireless systems*, John Wiley & Sons 2000.