

HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL ESTUDIO DEL PROBLEMA DIRECTO E INVERSO DE DISPERSIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Y. ÁLVAREZ¹, B. A. DOMÍNGUEZ¹, F. LAS-HERAS¹

¹Área de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Departamento de Ingeniería Eléctrica. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón. Universidad de Oviedo. España.
{yalopez ; acasas ; flasheras}@tsc.uniovi.es

Las directrices del nuevo Espacio Europeo de Educación Superior recomiendan la introducción de nuevas técnicas educativas y herramientas tecnológicas de ayuda a la docencia, especialmente en los grados y máster de carácter científico – técnicos relacionados con las tecnologías de la información y las comunicaciones. Con el fin de adaptar las asignaturas de grado y máster a dicho contexto educativo, se están desarrollando múltiples herramientas software de apoyo a la docencia. En esta comunicación se presenta un simulador que permite el estudio del campo electromagnético dispersado por uno o varios objetos de geometría arbitraria. El objetivo es disponer de una herramienta que facilite la visualización de los campos electromagnéticos ayudando a la comprensión del fenómeno de propagación de dichos campos. Asimismo, la herramienta también permite el análisis del problema inverso, es decir, la reconstrucción de la geometría del objeto dispersor a partir del conocimiento de los campos.

1. Motivación del trabajo

En gran parte de los problemas de ámbito científico-tecnológico, la adecuada representación gráfica de los resultados permite al profesional determinar la validez de los mismos de forma sencilla y fiable. Con el desarrollo de los computadores, no sólo es posible llevar a cabo la resolución de problemas más complejos, sino que se dispone de mejores herramientas gráficas para la visualización de datos. Esta capacidad para la representación es especialmente importante en el estudio de problemas electromagnéticos, pues a diferencia de otras ramas científicas, las magnitudes con las que se trabaja no son tan familiares para el ser humano, y por ello, su visualización facilita la interpretación de los resultados.

En el campo de la enseñanza, una de las competencias perseguidas en el nuevo Espacio Europeo de Educación Superior [1],[2] es dotar al alumno de la capacidad para interpretar resultados a partir de la observación de representaciones gráficas y extraer conclusiones sobre los mismos. En relación al aprendizaje de asignaturas relacionadas con el electromagnetismo en grados como el de Ingeniero de Telecomunicación, este concepto es aún más importante, pues el empleo de material gráfico permite clarificar aquellos conceptos que explicados mediante ecuaciones matemáticas no son tan obvios para el alumno [3],[4].

Respecto a la impartición de créditos prácticos de las asignaturas de grado y máster en Ingeniero de Telecomunicación o Ingeniero Eléctrico, se ha detectado la carencia de herramientas software de simulación orientadas a la docencia: en numerosos casos, el programa utilizado corresponde a aplicaciones de carácter comercial cuyo manejo no siempre es trivial para el alumno. Al contrario, se prefiere una herramienta informática cuyo uso sea relativamente sencillo, de forma que ayude a afianzar los conocimientos teóricos. Si la herramienta es compleja de utilizar, puede crear más confusión al alumno, en vez de ayudarle en la asimilación de los conocimientos.

Aunque existe una gran variedad de programas especializado en análisis de problemas electromagnéticos de diversa índole, son pocos los que disponen de una interfaz visual completa y funcional, que permita la representación de los resultados producidos. Otra observación sobre el software empleado en electromagnetismo (existente también en otros ámbitos científicos) es su excesiva especialización, de forma que para abordar el análisis de un problema concreto y la posterior visualización de resultados, puede ser necesario el empleo de varias herramientas software independientes.

2. Objetivos

En la presente comunicación se describe una herramienta software para el cálculo y visualización del campo electromagnético dispersado por objetos conductores de geometría arbitraria. Esta herramienta recibe el nombre de *iScope (Inverse and Direct Electromagnetic Scattering Problem)* y se concibe como soporte docente en los créditos prácticos de la asignatura “Propagación y Radiación”, que se impartirá en el segundo curso del grado en Ingeniería de Telecomunicación.

El objetivo que se persigue es disponer de una aplicación que permita el estudio del fenómeno de dispersión del campo electromagnético en 2D debido a la presencia de uno o varios cuerpos. Además, conocidos los campos dispersados, la herramienta software también presenta la posibilidad de llevar a cabo la reconstrucción de la geometría del cuerpo dispersor (problema inverso de dispersión).

Puesto que el programa desarrollado está orientado a la docencia, se ha tratado de dotarle de tres características fundamentales:

- *Facilidad de manejo*

La creación de una interfaz gráfica de sencilla utilización es uno de los aspectos más importantes que se ha considerado en la elaboración de la aplicación. Lo que se busca es permitir al alumno una gran interacción con el programa, para ello se le ofrece un importante número de parámetros variables a través de los cuales pueda identificar claramente el efecto de su modificación. De esta manera, a partir de los resultados de las simulaciones, podrá obtener una visión clara del fenómeno de dispersión electromagnética sin que intervenga en modo alguno la complejidad del software empleado. Por todo ello, la entrada y salida de datos está integrada en la propia interfaz gráfica.

- *Adecuada representación de resultados*

Las magnitudes empleadas en el electromagnetismo, tales como corrientes o campos electromagnéticos, tienen una dificultad añadida a la hora de su interpretación puesto que nos son familiares para las personas y poseen, en cierto modo, un carácter abstracto. De ahí que muchas veces el alumno se quede en las expresiones matemáticas sin llegar a profundizar en la interpretación física del problema. Es por ello que en el desarrollo de la aplicación se ha trabajado especialmente en la visualización de los resultados para presentar de una manera clara el fenómeno asociado a la dispersión electromagnética.

- *Compatibilidad con otras aplicaciones*

Aunque desde el punto de vista docente es más práctico el empleo de elementos gráficos integrados en la interfaz visual para la entrada de datos y la visualización de resultados, en determinados programas empleados en la docencia de electromagnetismo, el intercambio de datos se lleva a cabo a través de

ficheros. Es por ello que en el desarrollo de la aplicación también se contempla esta posibilidad, con vistas a su utilización en entornos profesionales.

3. Estructura de la aplicación

La aplicación *iScape* está constituida por tres etapas bien diferenciadas: una primera de generación e introducción de datos de entrada, una etapa de cálculo y otra de presentación y visualización de resultados. Su diagrama de bloques se ilustra la Figura 1, distinguiendo dos posibles itinerarios según se pretenda analizar el problema directo (itinerario azul) o inverso (itinerario rojo). Se observan además dos grandes bloques constituidos por los datos de entrada y de salida.

Los datos de entrada serán seleccionados según el tipo de problema a resolver, además, como se comentará posteriormente, la herramienta incorpora una utilidad para la generación de geometrías incluida en este bloque. Los datos de salida podrán ser almacenados y visualizados. La finalidad del almacenamiento es permitir una posterior utilización de dichos datos tanto en otra herramienta software como en el propio *iScape*, funcionando como datos de entrada. La visualización se trata de uno de los elementos clave de la herramienta desarrollada, su objetivo fundamental es permitir al alumno comprender de una manera directa el fenómeno de dispersión electromagnética. A través de la visualización el alumno tiene la posibilidad, entre otras, de observar los campos eléctricos incidentes, dispersados y totales así como su propagación mediante animaciones en tiempo real en función de los parámetros de entrada seleccionados.

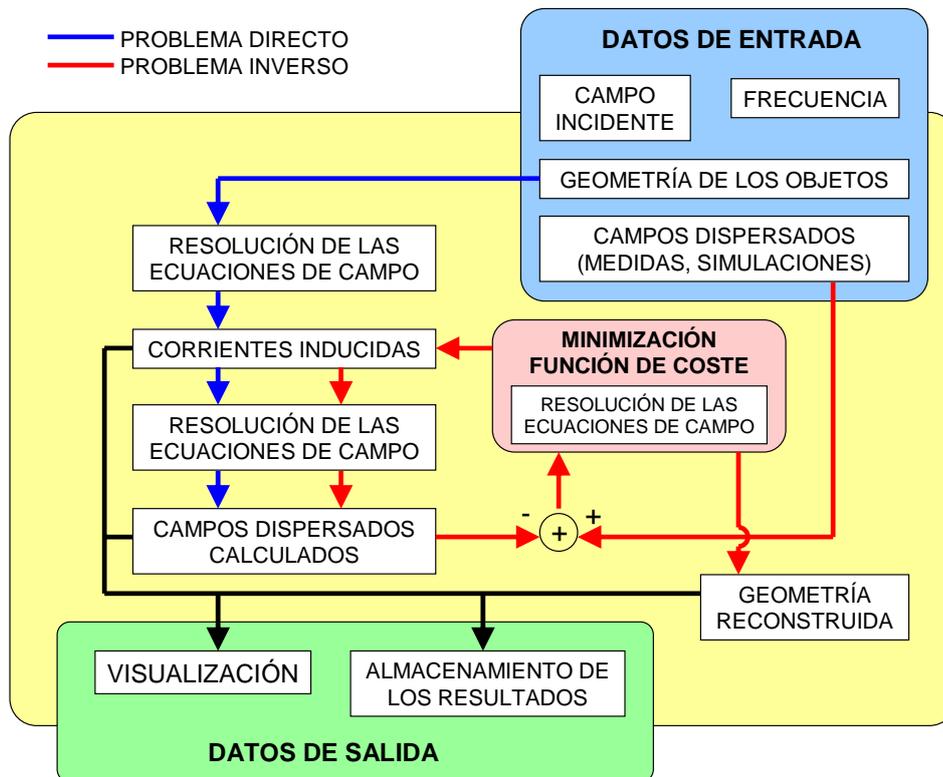


Figura 1. Diagrama de bloques de la aplicación.

El programa utilizado para la implementación de esta herramienta ha sido Matlab ®. En un principio se barajó la posibilidad de realizarlo en otro lenguaje como C++, sin embargo Matlab posee algunas características fundamentales que hicieron decantarse por esta opción, la más importante quizás sea el intuitivo entorno que posee para la creación de interfaces de usuario, GUIDE (*Graphical User Interface Development Environment*).

A continuación se describirá el funcionamiento de la herramienta Software *iScape* para cada uno de los dos casos posibles de estudio: el problema directo e inverso. Se hará una breve explicación de las funcionalidades de cada uno de los bloques así como un ejemplo práctico que ilustre todas las diferentes posibilidades que ofrece la aplicación.

4. Problema directo

El cálculo del campo dispersado por objetos conductores de geometría arbitraria a partir del campo incidente es lo que se denomina problema directo de dispersión. El objetivo del método desarrollado es obtener las corrientes eléctricas inducidas por una onda incidente sobre el contorno del objeto C' (ver Fig. 2). El conocimiento de dichas corrientes permitirá determinar el campo dispersado por el objeto tal y como se verá posteriormente.

El proceso de resolución del problema directo está constituido tres etapas cada una de las cuales posee un bloque específico dentro de la aplicación. Estas etapas se detallan en los siguientes subapartados.

4.1 Selección de los parámetros de simulación

El cálculo de las corrientes inducidas así como los campos eléctricos dispersados dependerá fundamentalmente del contorno del objeto dispersor, el campo incidente, la frecuencia de trabajo y el dominio de observación de los campos. Debido al carácter docente de la aplicación, se ha tratado de proporcionar el mayor número posible de grados de libertad en la configuración de dichos parámetros de entrada para que el alumno pueda modificarlos, observar su efecto y extraer sus propias conclusiones.

Una de las opciones más interesantes es la posibilidad de crear su propio contorno mediante una aplicación que se ha incluido en la herramienta. Dicha aplicación permite al alumno seleccionar contornos correspondientes a formas canónicas (rectángulos, óvalos o triángulos), definir la curva en función de los coeficientes de un DSF (Desarrollo en serie de Fourier), lo que además ayuda al afianzamiento del concepto de DSF de forma gráfica, y por último trazar sus propias formas, bien sea a partir las coordenadas de los vértices o mediante una unidad de dibujo utilizando el puntero del ratón para dibujar en el área habilitada a tal efecto en el software.

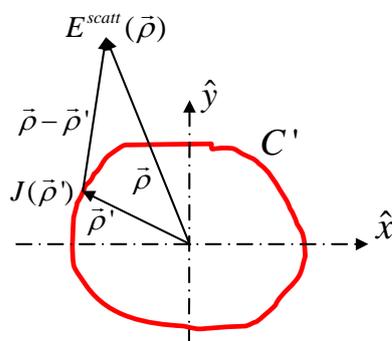


Figura 2. . Sistemas de coordenadas y definición de los vectores de observación del campo y de las corrientes.

En cuanto al resto de parámetros el alumno va a tener la opción de configurar:

- *Frecuencia de trabajo*, bien sea la fundamental y/o los 4 primeros armónicos.
- *Campo eléctrico incidente*, onda plana con un máximo de 8 ángulos de incidencia diferentes, o cilíndrica con un máximo de 8 puntos fuente con diferentes posiciones. Tanto ángulos como posiciones serán parámetros que el alumno podrá modificar con total libertad.
- *Dominio de observación de campo*, entendido como el conjunto de circunferencias alrededor del cuerpo dispersor sobre los cuales se llevará a cabo la medida del campo eléctrico dispersado. En este caso se da la opción de escoger entre 1 y 3 circunferencias de radio especificado por el usuario.

Todo este conjunto de configuraciones de los parámetros de entrada va a dar lugar a un conjunto muy amplio de casos de estudio a partir de los cuales el alumno podrá llegar a comprender la influencia de cada uno de ellos a la hora de resolver el problema directo de dispersión. Además, el hecho de obtener un mayor número de información, bien sea en frecuencia, dominio de observación o campo incidente, va a ser clave en la fase de solución del problema inverso tal y como se comentará en el apartado correspondiente.

4.2 Cálculo de las corrientes inducidas y campos eléctricos dispersados

Una vez seleccionados los parámetros de simulación se lleva a cabo el cálculo de las corrientes eléctricas inducidas. El conocimiento de dichas corrientes permite a su vez determinar el campo dispersado por el objeto, para lo cual se resuelve la Ecuación (1) [5],[6].

$$E^{scatt}(\vec{\rho}) = C_0 \int_{C'} J(\vec{\rho}') H_0^{(2)}(k_0 |\vec{\rho} - \vec{\rho}'|) dC' \quad (1)$$

Donde E^{scatt} es el campo dispersado, J son las corrientes eléctricas inducidas, $H_0^{(2)}$ es la función de Hankel de orden 0 y tipo 2, k_0 es el número de onda, definido como $k_0 = 2\pi f_0 / c$ (donde f_0 es la frecuencia de trabajo), y C_0 es un valor dependiente del medio de propagación (se considera espacio libre). Los vectores de posición $\vec{\rho}$ y $\vec{\rho}'$ quedan definidos en la Figura 2.

Para el cálculo de dichas corrientes, se ha empleado el Método de los Momentos (MoM) en 2D. Este método es un procedimiento matemático que permite reducir a sistemas matriciales las ecuaciones de Maxwell y las condiciones de contorno, planteadas para el cálculo de las corrientes (las incógnitas del problema) inducidas en la superficie del cuerpo por los campos incidentes.

Una vez calculadas dichas corrientes y los campos incidentes, los resultados se almacenan automáticamente en archivos de texto con formato *.txt*, bien para su posterior tratamiento en otra herramienta software o como datos de entrada para la reconstrucción de geometrías en el proceso de resolución del problema inverso. Destacar que, durante la fase de cálculo, existe una ventana que muestra al usuario en todo momento el estado de la simulación, lo que le permite hacer una interpretación detallada de todo el proceso de simulación así como de los tiempos de cálculo empleados.

4.3 Visualización de resultados

Tras el proceso de cálculo el programa permite al alumno la visualización las corrientes inducidas y el campo dispersado calculados. Para éstos últimos, se podrá observar tanto la fase (en grados), como la

amplitud (en dB). Se ofrece además la posibilidad de seleccionar el ángulo de incidencia del campo incidente, en el caso de ondas planas o la posición de la fuente, en ondas cilíndricas, y la frecuencia de trabajo, esto permite observar de manera directa la influencia de los parámetros de entrada en las magnitudes calculadas.

En la Figura 3 se muestra una captura de pantalla de la ventana correspondiente a la visualización de los campos. De izquierda a derecha y de arriba a abajo se representa la amplitud (normalizada, en dB) del campo incidente, campo dispersado, campo total, y visualización temporal (animación). Esta última representación es de especial interés desde el punto de vista docente, ya que facilita la comprensión del fenómeno de propagación y dispersión electromagnética, permitiendo visualizar la modificación que sufre la onda incidente debido a la presencia del objeto dispersor.

5. Problema inverso

Se ha pretendido completar la herramienta software desarrollada con una utilidad que permita la recuperación de la geometría del objeto dispersor conocido el campo dispersado, es decir, resolver el problema inverso de dispersión electromagnética [7],[8]. Para ello, es necesario la minimización de una función de coste establecida como la diferencia entre el campo dispersado suministrado como entrada, y el campo dispersado que genera una distribución de corrientes eléctricas *equivalentes* (ver Figura 1). La intensidad de dichas corrientes *equivalentes* está directamente relacionada con la geometría del objeto dispersor, de forma que los mayores niveles de corriente se corresponderán con aquellos puntos pertenecientes al contorno C' del objeto dispersor.

Al igual que en el caso del problema directo, la resolución del problema inverso está estructurado en tres etapas cada una de las cuales está representada en un bloque dentro de la aplicación, sobre cada una de ellas se hablará a continuación.

5.1 Selección de los parámetros de entrada

En este primer bloque el alumno deberá seleccionar un conjunto de campos dispersados por el cuerpo cuyo contorno se quiere reconstruir y que serán empleados como datos de entrada. Para ello inicialmente se deberá indicar a la aplicación el nombre común de los ficheros de entrada de tal manera que ésta sea capaz de importarlos y así indicar al usuario, de manera automática, toda la información disponible para llevar a cabo la simulación.

Cabe destacar que debido a que la herramienta software permite la importación de ficheros de texto con los datos de campo dispersado, es posible utilizar no sólo los valores obtenidos mediante simulación del problema directo, sino también los obtenidos tras el procesado de medidas de RCS (*Radar Cross Section*) realizadas en cámaras anecoicas, permitiendo la identificación de los objetos dispersores medidos así como la reconstrucción de su geometría. Por tanto, la aplicación se puede utilizar no sólo con fines docentes, sino también en entornos profesionales para procesado de medidas ligadas a la reconstrucción de geometrías (problemas de *imaging*).

Tal y como se describió en el apartado correspondiente al problema directo, el campo dispersado puede ser calculado a diferentes frecuencias, medido sobre diferentes dominios de observación y puede ser debido además a la incidencia de ondas planas, con diferentes ángulos de incidencia, u ondas cilíndricas, generadas por fuentes situadas en diferentes posiciones. Todos estos se datos se traducen en una mayor información para llevar a cabo la reconstrucción del contorno del cuerpo dispersor. Es por ello que el alumno, una vez importados los campos dispersados, tendrá la opción de escoger aquellos que considere necesarios en función de estos parámetros.

En este caso se incluye además, la posibilidad de generar la malla sobre la cual se van a reconstruir las corrientes equivalentes que determinarán el contorno. Para ello se debe indicar tanto las dimensiones como los diferenciales de superficie de cada uno de los elementos que la constituyen, todo ello en términos de longitudes de onda.

Finalmente el alumno dispone de un gran número de combinaciones de datos de entrada que le van a permitir analizar, de una manera directa, la influencia de cada uno de los parámetros, a la hora de reconstruir la geometría de un cuerpo conocido su campo dispersado, en términos de mayor o menor definición del contorno y resolución en la geometría reconstruida.

5.2 Cálculo del contorno del dispersor

Tras la selección de los parámetros de entrada el siguiente paso supondrá la resolución del problema inverso que permita reconstruir la geometría del cuerpo. Como ya se ha comentado, la estrategia seguida en esta aplicación es la búsqueda de las corrientes eléctricas *equivalentes* que generen un campo dispersado como el proporcionado como dato de entrada.

El proceso es el siguiente: en primer lugar calculan dichas corrientes para cada uno de los campos dispersados seleccionados. Una vez obtenidos se combinan todos ellos para obtener así una distribución de corrientes cuyo máximo de amplitud corresponderá con el contorno de la geometría total reconstruida. Para el cálculo de las corrientes equivalentes lo que se hace es, para cada uno de los elementos de la malla se resuelve la función de coste establecida como la diferencia entre el campo dispersado suministrado como entrada y el campo dispersado que es generado por dichas corrientes *equivalentes*.

Dependiendo del número de datos de entrada y de elementos de la malla donde se va a reconstruir la geometría, el proceso tendrá una mayor o menor duración, por lo que en todo momento se le va indicando al usuario el estado de la simulación. Esto supone una alta interactividad que permite entender el funcionamiento del algoritmo empleado en la resolución del problema inverso.

Una vez reconstruida la geometría los resultados obtenidos, así como los parámetros de la simulación son almacenados automáticamente en un fichero de texto.

5.3 Visualización de resultados

En este caso también se ha trabajado en el modo de presentar los resultados obtenidos que permita una clara interpretación de la geometría reconstruida por parte del alumno. En la Figura 4 se puede observar un ejemplo de la ventana de visualización de resultados tras la reconstrucción de la geometría. Se ofrece la posibilidad de observar las corrientes equivalentes reconstruidas en dB o unidades naturales, así como en diferentes escalas de colores y niveles entre el máximo y el mínimo.

6. Resultados obtenidos

En este apartado se presentará un ejemplo ilustrativo de las funcionalidades que ofrece la herramienta software *iScape*. Para ello se llevará a cabo un estudio del problema directo e inverso de dispersión electromagnética que se propondrá como una práctica en el próximo curso 2010-2011. En dicha práctica se tratará de analizar, por una parte, los campos dispersados por diferentes geometrías estudiando el efecto de la presencia de aristas, cavidades, etc. Y por otra, la influencia del tamaño del objeto así como de su geometría a la hora de llevar a cabo el proceso de reconstrucción. El desarrollo de la práctica se puede dividir en cinco etapas:

6.1 Diseño de la geometría

Utilizando el módulo de creación de geometrías, se generará un cuadrado de dimensiones $2\lambda \times 2\lambda$, un cardioide de ecuación $\rho(\phi) = 1.2 + 0.2 \sin(3\phi)$, y una geometría arbitraria diseñada por el alumno. Los resultados serán almacenados para su posterior análisis mediante la aplicación correspondiente a la resolución del problema directo.

6.2 Cálculo del campo dispersado

A partir de las geometrías creadas en el apartado anterior el alumno deberá simular, para cada una de ellas, el campo dispersado cuando están iluminados por diferentes ondas planas y cilíndricas, a varias frecuencias y sobre diferentes dominios de observación.

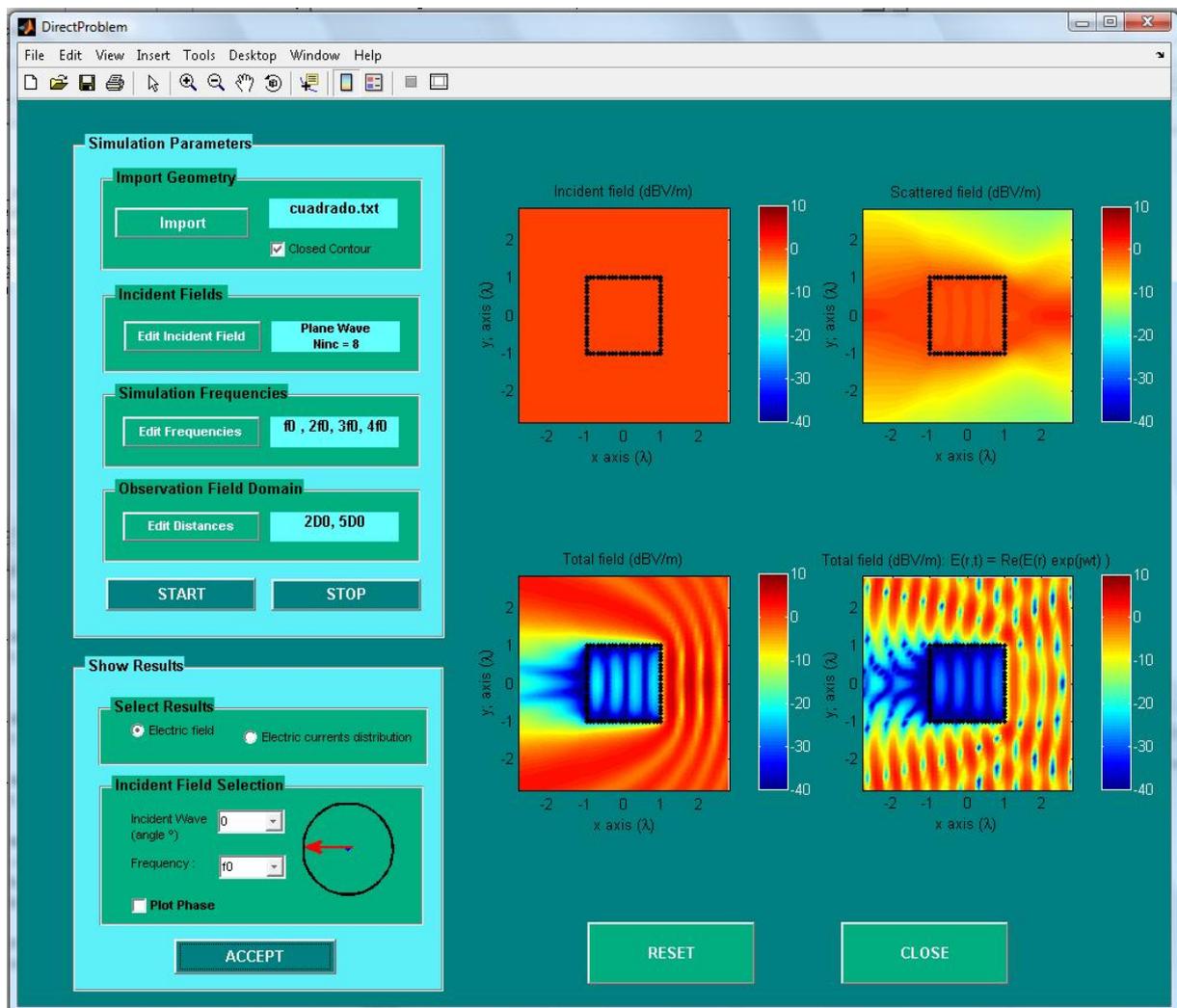


Figura 3. Ventana para el cálculo del campo dispersado y visualización del mismo.

6.3 Análisis e interpretación de resultados

Tras la simulación se mostrará una pantalla como la representada en la Figura 3. El alumno puede comprobar inicialmente el comportamiento esperado del campo total y dispersado en presencia del cuerpo, observando el efecto sombra y la variación de la propagación del campo eléctrico para los diferentes ángulos de incidencia y posiciones de la fuente. En este apartado también es interesante analizar las distribuciones de corriente eléctrica sobre las geometrías, observando la situación de los máximos y las diferencias, sobre todo, entre las aristas del cuadrado y los bordes más suaves del resto de geometrías.

6.4 Reconstrucción de la geometría

A partir de los datos generados en las etapas anteriores, el alumno deberá llevar a cabo la reconstrucción de las geometrías variando el número y las propiedades de los campos dispersados empleados como datos de entrada. También es interesante variar el tamaño de los elementos de la malla para comprobar su influencia en la resolución de la imagen.

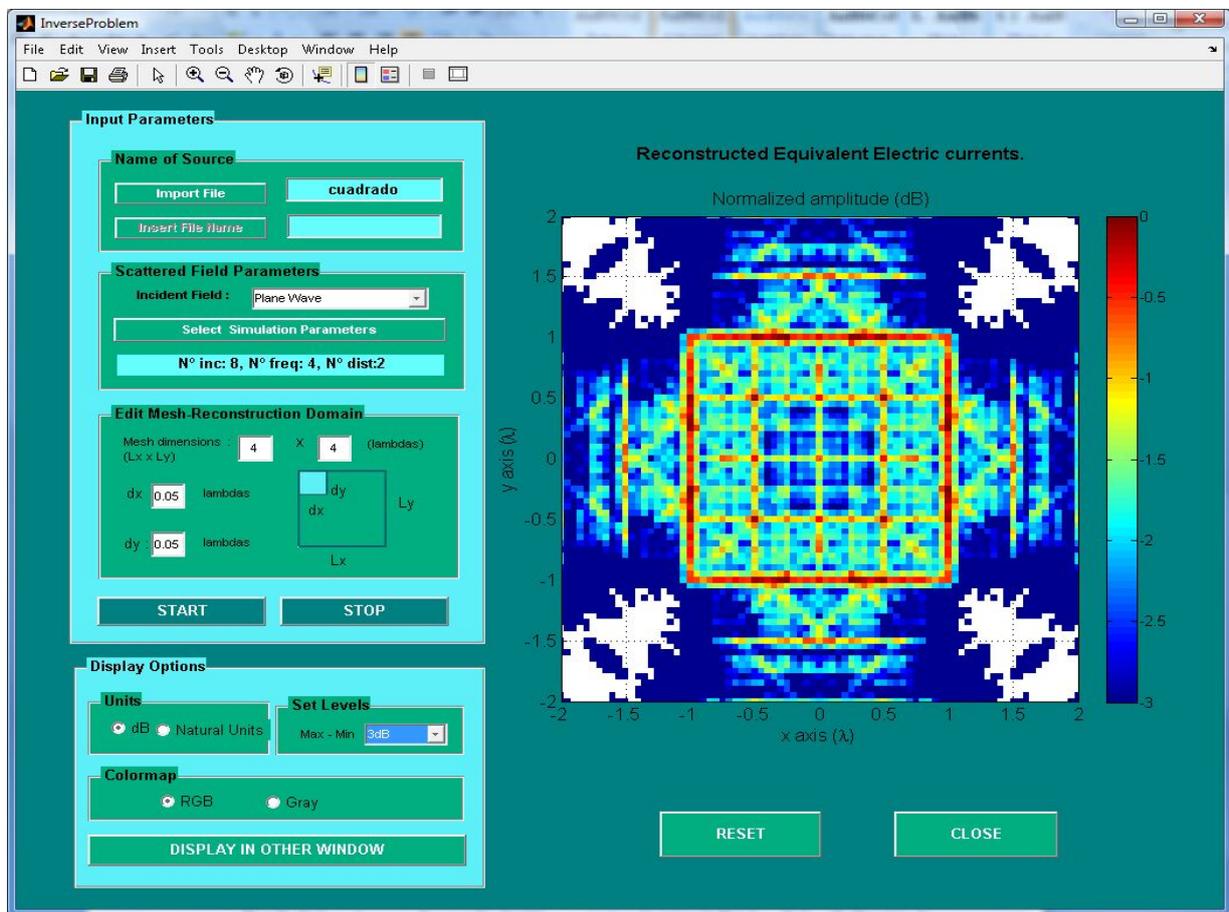


Figura 4. Ventana para la representación de las corrientes equivalentes reconstruidas (solución del problema inverso). Ejemplo : reconstrucción cuadrado de dimensiones $2\lambda \times 2\lambda$. Campo incidente: 8 ondas planas con ángulos de incidencia equiespaciados. Frecuencia: fundamental y tres primeros armónicos. Dominio de observación del campo: 2 circunferencias de radio $2D_0$ y $4D_0$, siendo D_0 el radio de la menor circunferencia que rodea al objeto.

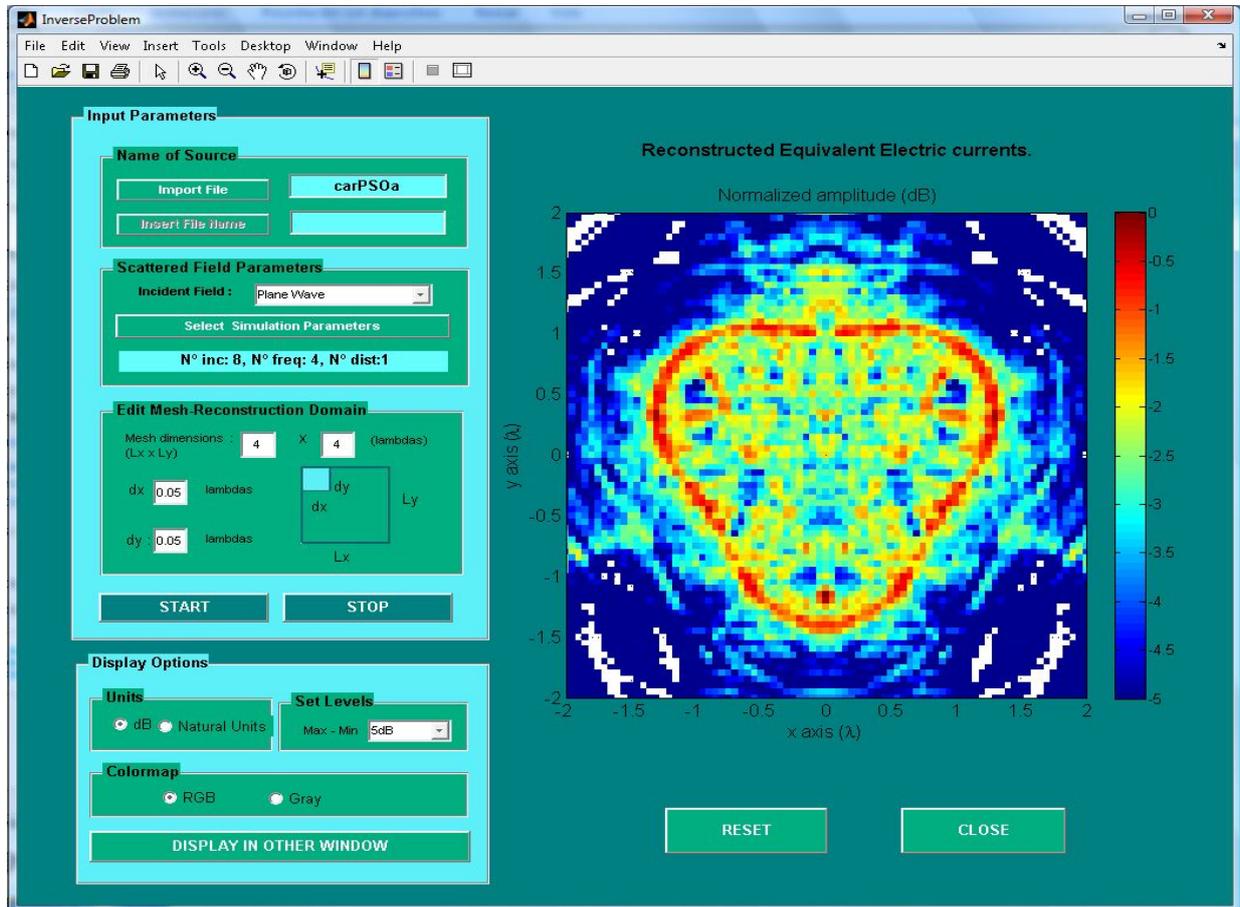


Figura 5. Ventana para la representación de las corrientes equivalentes reconstruidas. Ejemplo: reconstrucción cardioide de ecuación $\rho(\phi) = 1.2 + 0.2 \sin(3\phi)$. Campo incidente: 8 ondas planas con ángulos de incidencia equiespaciados. Frecuencia: fundamental y tres primeros armónicos. Dominio de observación del campo: una circunferencia de radio $2D_0$, siendo D_0 el radio de la menor circunferencia que rodea al objeto.

6.5 Análisis e interpretación de resultados

Una vez reconstruidos los contornos *iScape* mostrará por pantalla resultados como los representados en las Figuras 4 y 5. El alumno podrá comprobar fácilmente la necesidad de conocer el campo dispersado por el objeto para diferentes incidencias si quiere tener una geometría bien definida. El problema reside en que si se tiene un único campo como dato de entrada la geometría sólo podrá ser reconstruida por la parte sobre la cual incide la onda que da lugar al campo dispersado, ya que se carece de información de la parte que está en sombra. El hecho de trabajar con medidas a más de una frecuencia también va a determinar la resolución de la geometría reconstruida.

Otro hecho a comprobar en este apartado, es la dificultad que presenta la reconstrucción contornos con zonas que presentan cavidades. Este hecho se puede comprobar si se comparan las figuras 4 y 5, en ambas se han empleado como datos de entrada los campos dispersados por el cuadrado y el cardioide iniciales cuando sobre ellos inciden 8 ondas planas con ángulos de incidencia separados uniformemente y medidos a tres frecuencias diferentes. Se puede observar cómo, mientras que en el cuadrado el contorno está perfectamente definido en el cardioide existen zonas donde no se ha podido reconstruir. Estos es

debido a que las zonas cóncavas actúan como reflectores, lo que provoca que el máximo del campo se concentre en un punto exterior al contorno.

7. Conclusiones

Se ha presentado una herramienta software de ayuda a la docencia de la asignatura “Propagación y Radiación” (2º curso del grado en Ingeniería de Telecomunicación). La aplicación, concebida para el estudio del problema directo e inverso de dispersión electromagnética, presenta una interfaz gráfica de sencilla utilización, lo que facilita su utilización por parte de los alumnos. Asimismo, la representación de los resultados (campo dispersado, corrientes inducidas) constituye una ayuda para el estudio de los mecanismos de propagación y dispersión del campo electromagnético. La capacidad para llevar a cabo la resolución del problema inverso de dispersión supone un valor añadido no sólo con fines docentes, sino también como herramienta software para procesado de medidas de campo en cámara anecoica.

8. Agradecimientos

Este proyecto ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España/FEDER bajo los proyectos TEC2008-01638/TEC (INVENTA) y CONSOLIDER-INGENIO CSD2008-00068 (TERASENSE). Por la Cátedra Telefónica-Universidad de Oviedo, y por el Gobierno del Principado de Asturias, Plan de Ciencia, Tecnología e Innovación de Asturias bajo la beca BP09139.

9. Referencias

- [1] Texto de la declaración de Bolonia [on-line]. Disponible en: www.bologna-berlin2003.de/en/aktuell/index.htm [Consulta: abril 2006].
- [2] “Realizing the European Higher Education Area”. Communiqué of the Conference of Ministers responsible for Higher Education in Berlin on 19 September 2003.
- [3] R. W. Cole, E. K. Miller, S. Chakbarti, S. Gogineni. *Learning about Fields and Waves Using Visual Electromagnetics*. *IEEE Transactions on Education*, vol. 33, pp. 81-95, February 1990.
- [4] Y. Álvarez, F. Las-Heras. *Software Tool for Antenna Array Simulation as Educational Support in Telecommunication Engineering*. *2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. Albuquerque, NM (USA), pp. 104. julio 2007.
- [5] A. Cardama, L. Jofre, et al.. *Antenas*. Ediciones UPC, Noviembre 2002.
- [6] C. A. Balanis. *Advanced Engineering Electromagnetics*. John Wiley & Sons, 1989.
- [7] Mehmet Çayören., Ibrahim Akduman, Ali Yapar, Lorenzo Crocco, “A new algorithm for the shape reconstruction of perfectly conducting objects”, *Inverse Problems* 23 (2007) – Institute of Physics Publishing, pp. 2087-1100. April 2007. Online at stacks.iop.org/IP/23/1087.
- [8] Ilaria Catapano, Lorenzo Crocco, Tomasso Isernia, “On simple methods for shape reconstruction of unknown scatterers”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 5, pp. 1431-1436, May 2007.

