

# Simulador Electromagnético de Estructuras Mixtas Conductoras de Hilo Grueso y Superficies Planas

F. Losilla López, F. D. Quesada Pereira, D. Cañete Rebenaque, J. L. Gómez Tornero y A. Álvarez Melcón  
Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones  
Universidad Politécnica de Cartagena, 30202 Cartagena, España  
e-mails: fernando.losilla@upct.es, fernando.quesada@upct.es,  
david.canete@upct.es, josel.gomez@upct.es, alejandro.alvarez@upct.es

**Abstract**— This paper presents a recently developed electromagnetic simulator which overcomes some of the traditional limitations of commercial software packages that analyze wire antennas combined with surface patches. A full Galerkin approach of the Method of Moments using subdomain triangle functions is employed to solve the frequency domain Electric Field Integral Equation (EFIE) for wire conducting structures. The full kernel of the EFIE is numerically computed using a suitable integration scheme. By doing so, it is possible to properly analyze moderately thick wire antennas. The analysis of the flattened surface patches is performed using rooftop basis and testing functions defined in triangular or rectangular cells. The junction of the wire and surface patches is modeled by using a new attachment mode which allows the wire to be placed everywhere inside the mesh cells. The new attachment mode has shown to be specially well suited for working in conjunction with rooftop basis functions.

## I. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas clásicos en electromagnetismo es el estudio de antenas de hilo. Este problema ha sido abordado a lo largo del tiempo en una gran cantidad de publicaciones científicas [1], como consecuencia de su aplicabilidad debida en gran medida al elevado número de sistemas radiantes que pueden ser modelados como un conjunto de conductores de sección cilíndrica. No obstante, no por tratarse de una materia tratada extensamente se encuentra en algún modo cerrada, pudiéndose encontrar en la actualidad continuamente nuevos trabajos que constituyen un cierto avance en algún aspecto concreto [2], [3].

El procedimiento habitual para el análisis de la radiación de estructuras de hilo consiste en la resolución de la Ecuación Integral de Campo Eléctrico en el dominio de la frecuencia mediante la aplicación del Método de los Momentos [4]. La principal asunción que se hace para simplificar el análisis electromagnético es considerar que no existe variación azimutal en la densidad de corriente que circula por el elemento radiante. Asimismo, generalmente se trabaja con secciones cilíndricas cuyo radio es pequeño en términos eléctricos  $r \ll \lambda$ . Este hecho reduce el orden de integración necesario para el cálculo de las interacciones entre las funciones de base y de test propias del método de los momentos. El Kernel de la ecuación integral queda reducido a una expresión que sólo depende de la variación axial a lo largo de la estructura. La mayoría de los programas simuladores comerciales, generalmente basados en NEC (Numerical Electromagnetic Code) [5], emplean esta

última simplificación. No obstante, cuando el radio del hilo es de tamaño  $r > 0.01\lambda$  la anterior aproximación conduce a resultados poco o nada precisos. En estas situaciones es necesario trabajar con el Kernel completo para un análisis adecuado del problema. Existe una expansión exacta del Kernel cilíndrico para estructuras con simetría axial [6] en términos de un sumatorio de funciones de Hankel esféricas. Esta expresión para el Kernel exacto resulta de utilidad para analizar antenas cilíndricas gruesas, donde todos los segmentos en los que se divide la antena compartan un mismo eje. Sin embargo, si se pretende estudiar antenas de hilo con una cierta curvatura o calcular la influencia existente entre una superficie conductora plana y la propia antena, la expansión exacta del Kernel no resulta apropiada. En este caso se hace necesario recurrir a una evaluación del Kernel completo mediante algún esquema de integración numérica.

Los elementos radiantes cilíndricos no se encuentran de forma usual aislados, siendo normal encontrar, por ejemplo, antenas de hilo de tipo monopolo situadas sobre una base metálica. Para poder evaluar como se comporta el sistema global en cuanto a radiación empleando el método de los momentos, se han de definir unas funciones de base y de test que se adapten a una superficie conductora plana. Las funciones de base más populares para trabajar con superficies conductoras tridimensionales son las denominadas de tipo Rooftop, introducidas por Rao, Wilton y Glisson [7]. Estas funciones son de variación lineal, pudiéndose definir tanto en celdas de mallado triangulares como en celdas rectangulares. Asimismo, presentan una serie de propiedades que las hacen de gran utilidad para el análisis electromagnético. Por otra parte, hay que definir una función de base adicional que haga el cometido de modelar el flujo de corriente existente entre la superficie conductora y la antena de hilo. A esta función de unión entre ambas partes de la estructura se la denomina *modo de attachment*. En la literatura técnica se han presentado diversos modelos de modos de attachment. Algunos de ellos se basan en la definición de un disco de corriente que fluye de forma radial de la antena cilíndrica a la superficie. Este disco debe tener un tamaño pequeño en términos eléctricos, por lo que no resulta apropiado para estudiar uniones de antenas de hilo con superficies conductoras cerca de las esquinas o bordes de éstas [8]. Este inconveniente ha sido solventado empleando una variante de disco de corriente que se dobla por las esquinas

[9]. No obstante, resulta aparatoso tener que trabajar con un tipo de función de base especial que nada tenga que ver con el mallado y con el resto de funciones de base empleadas. Otros modos de attachment requieren que la unión se produzca en un nodo del mallado. Este el caso del modelo implementado en el código NEC [10], donde es necesario que el punto de unión sea común a cuatro celdas rectangulares adyacentes, o del modo presentado en [11], el cual se puede usar en combinación con las funciones de base Rooftop.

Para evitar todos estos problemas, el software desarrollado incorpora un nuevo modelo de modo de attachment que ha demostrado ser muy preciso, y que ha demostrado carecer de los inconvenientes de los modelos previamente aparecidos en la literatura.

## II. DESARROLLO

El software desarrollado utiliza el Método de los Momentos para resolver la Ecuación Integral de Campo Eléctrico en su forma de potenciales mixtos. Se han empleado funciones de base triángulo para la expansión de la corriente en los segmentos cilíndricos, y funciones de base de tipo Rooftop para la densidad de corriente en la superficie plana. Como funciones de test se han escogido las mismas que como base, siguiendo un esquema de tipo Galerkin. La integración en las celdas rectangulares y en las de tipo triángulos se ha llevado a cabo empleando cuadraturas numéricas como las dadas en [12].

Una de las principales limitaciones de los simuladores comerciales que se emplean para analizar antenas de hilo, estriba en la utilización de la aproximación de kernel fino para resolver la *EFIE* mediante el Método los Momentos. La aproximación de Kernel fino asume que la variación azimutal de la función de Green de espacio libre ( $G(\vec{r}, \vec{r}') = e^{-j\beta|\vec{r}-\vec{r}'|}/|\vec{r}-\vec{r}'|$ ) es pequeña cuando el radio de la antena de hilo es reducido. De este modo la integración en función de las variables azimutales se elimina. En este caso la función de Green anterior se convierte en:

$$K(l, l') = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{e^{-j\beta R}}{R} d\phi' d\phi \simeq \frac{e^{-j\beta R_a}}{R_a} \quad (1)$$

Esta aproximación conduce a resultados erróneos si el grosor en términos eléctricos de la estructura cilíndrica es considerable. Para evitar esto, cuando el radio de la antena es  $r > 0.01\lambda$ , empleamos una regla de integración numérica para circunferencias en las variables azimutales [13], en combinación con una cuadratura de Gauss estándar para la integración longitudinal. El número de puntos de integración necesarios a lo largo del contorno del hilo para tener una buena precisión depende del radio de éste. Mediante este método se han conseguido analizar estructuras de hilo con radios hasta de  $0.2\lambda$ , pudiéndose modelar correctamente ciertos tipos de antenas complejas con simetría axial [14]. Una de las principales ventajas de esta técnica se encuentra en el hecho de poder calcular de forma apropiada las interacciones entre segmentos de hilo y celdas de superficie. De este modo,

combinando el modelo de Kernel fino y completo, se ha conseguido un programa simulador robusto que permite trabajar con estructuras de hilo con radios que van desde  $r \simeq 0.2\lambda$  hasta  $r \simeq 10^{-16}\lambda$ .

Para la extracción de la singularidad del Kernel cilíndrico, propia de las interacciones entre funciones de base definidas en un mismo segmento de mallado, se han desarrollado dos técnicas diferentes. Una de ellas esta basada en un cambio de coordenadas a polares, el cual consigue compensar el denominador de la función de Green pasándose a integrar en el nuevo dominio una función de variación suave [15]. La segunda técnica es de carácter más analítico, y se fundamenta en el uso de la integral elíptica completa de primera especie. Ambos procedimientos conducen a resultados muy parecidos, sobre todo cuando se analizan antenas cilíndricas gruesas.

Se han implementado dos modelos de excitación distintos para antenas de hilo. El primero de ellos es el clásico Delta-Gap, el cual es apropiado para antenas con radio pequeño  $r < 0.01\lambda$ . El segundo modelo consiste en la aplicación de un pulso de tensión de un determinado ancho a lo largo de la antena. Este método conduce a buenos resultados cuando la antena tiene un cierto grosor [2].

La función de attachment implementada en el software consiste en la utilización de tres o cuatro medias rooftops Fig. 1, dependiendo de si el mallado es triangular o rectangular respectivamente, que se añaden sobre la celda de unión con la antena de hilo. Además de las medias rooftops se añade otra media rooftop de tipo triangular, definida en el segmento de mallado de hilo en contacto con la celda de superficie. Tanto las medias rooftop como el triángulo tienen el mismo coeficiente, ya que se trata en realidad de una misma función de base que modela el flujo de corriente entre la antena de tipo monopolo y la base conductora sobre la que se apoya. Entre las ventajas de este modo de attachment encontramos el hecho de que el hilo se puede situar en cualquier lugar dentro del mallado, y que no es necesario trabajar con alguna clase de función diferente a las definidas en el resto de la estructura. Se ha comprobado que el uso de esta tipo de función de attachment conduce a buenos resultados incluso para antenas situadas cerca de bordes o esquinas de superficies conductoras [16].

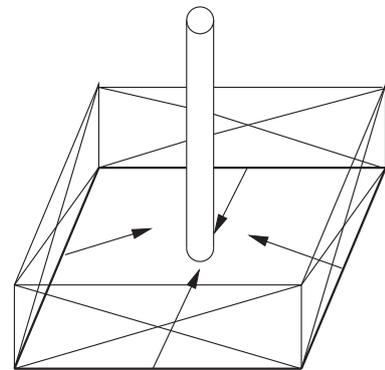
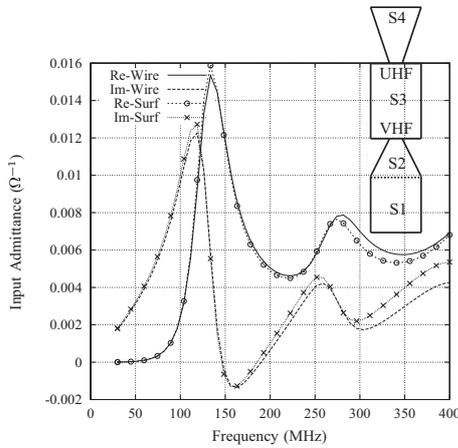


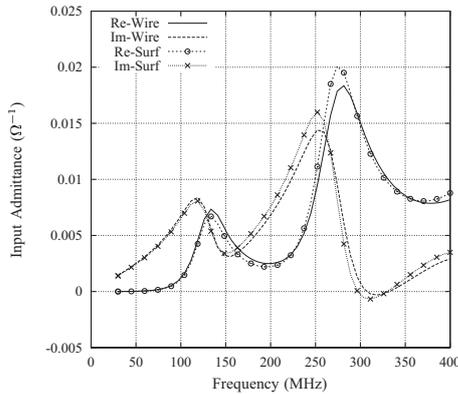
Fig. 1. Modo de unión entre hilo y superficie conductora implementado en el software.

### III. RESULTADOS

En esta sección presentamos a modo de ejemplo algunos resultados relevantes obtenidos empleando las técnicas implementadas en el software, y que han sido descritas en la sección anterior.



(a) Antena VHF .



(b) Antena UHF .

Fig. 2. Admitancia de entrada de una antena combinada formada por dos dipolos. S1: longitud=19.3cm, S2: longitud=20cm, S3: longitud=29.5cm, S4: longitud=20.6cm. Radio pequeño=1.7cm, Radio grande=6cm.

En la Fig. 2 se muestra la admitancia de entrada de una antena compleja formada por dos dipolos. La antena esta formada por cuatro secciones, dos cilíndricas y dos cónicas cuya función consiste en aumentar el ancho de banda. El cilindro inferior, el cono inferior y el cilindro central funcionan como un dipolo en la banda de VHF. El cono superior y el cilindro central se comportan, por otra parte, como un dipolo en la banda de UHF. Se comparan en la Fig. 2 el resultado de admitancia obtenido con el modelo descrito anteriormente para hilo grueso, con el calculado mediante un mallado superficial de la antena empleando celdas triangulares y funciones de base rooftop. El número de funciones de base empleadas en el modelo de hilo ha sido de 59, mientras que para el de superficie se han usado 984. Para la excitación de la antena

se ha usado el modelo de pulso [2]. Como se puede apreciar las dos simulaciones conducen a resultados muy similares en toda la banda de operación.

En la figura Fig. 3 se muestra la impedancia de entrada de un monopolo de hilo grueso de longitud  $l = 12.5cm$  y radio  $a = 11.29cm$ , sobre un plato cuadrado de lado  $w = 2.0m$ . Se compara el resultado obtenido con el correspondiente para el mismo monopolo sobre un plano de masa infinito. Como se aprecia ambos resultados son muy parecidos.

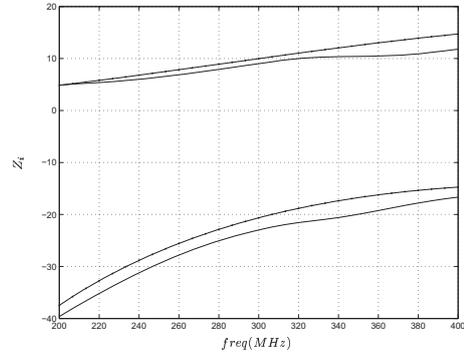


Fig. 3. Impedancia de un monopolo de hilo grueso sobre plano de masa finito

### IV. APLICACIÓN Y CONCLUSIONES

El software que se ha desarrollado se ha centrado en la simulación de las radiaciones y acoplos del mástil de comunicaciones de un submarino. Aún así, el programa, que se ha llamado PERAL (Programa para las Emisiones Radiadas de Antenas Lineales), es capaz de simular cualquier tipo de geometría que se le introduzca. La introducción de geometrías complejas implica un tiempo de ejecución considerable por el elevado número de funciones de base a utilizar. Se han tomado algunas medidas destinadas a bajar este tiempo, como por ejemplo reducir el número de puntos de integración según la separación respecto de la celda fuente. Como lenguaje de programación se ha optado por Fortran 90 por su eficiencia para cálculos matemáticos. En cuanto a la parte visual y a la utilización del programa, se ha procurado facilitar su uso por parte de cualquier usuario, intentando que, aun no estando éste familiarizado con el programa, pueda rápidamente obtener los resultados deseados. La comunicación del usuario con el programa se realiza exclusivamente a través de ventanas gráficas. No es necesario abandonar estas ventanas en ningún momento, pues la aplicación incorpora integrada en ellas una serie de utilidades para visualizar las salidas del programa y editar las entradas. En la figura Fig. 4 se puede ver el aspecto que presenta la ventana principal. Debido a la gran cantidad de parámetros que son necesarios para ejecutar una simulación, se han generado unos ficheros de entrada a la aplicación para almacenar los datos. Estos ficheros almacenan información sobre la geometría del mástil de comunicaciones con sus antenas, y otros datos acerca de parámetros de visualización de las salidas, frecuencias de cálculo y opciones de integración. Para facilitar el uso de estos ficheros de entrada se ha optado

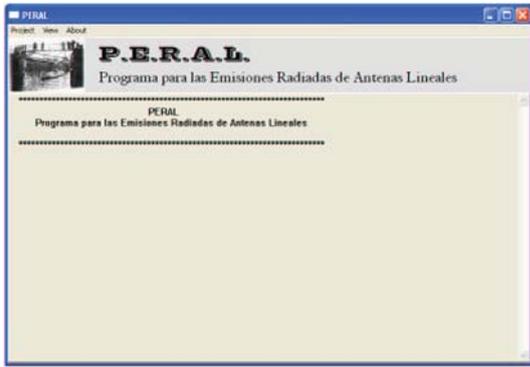


Fig. 4. Ventana principal de la aplicación.

por que la aplicación realice su trabajo mediante proyectos. Un proyecto contiene la información necesaria para cargar todos los ficheros de entrada asociados a una simulación y para generar todos los ficheros de salida de esa misma simulación. Además, gracias al uso de proyectos se pueden representar parámetros de salida sin necesidad de recalcularlos si ya fueron calculados en una sesión anterior de trabajo con el programa. Se pueden modificar todos los datos de los ficheros de entrada mediante una ventana de edición dividida en pestañas como la de la figura Fig. 5. En esta ventana de dialogo las dos primeras pestañas describen la geometría de la estructura, y con la información que contienen se puede generar el mallado de ésta. Además en estas pestañas se pueden especificar otros datos como las potencias incidentes a las antenas, las conductividades de los distintos elementos de la estructura, la curvatura que pueden sufrir las antenas por causa del viento, o si se desea que se incluya un plano de masa representando al mar en la simulación. La tercera pestaña define parámetros de análisis para aplicar a la simulación, como los parámetros de salida que se desea obtener, rangos de frecuencia en los que realizar los cálculos, y puntos en los cuales visualizar el campo radiado. La última pestaña contiene parámetros relativos al método de integración utilizado, como por ejemplo el orden de la cuadratura para cada tipo de interacción.

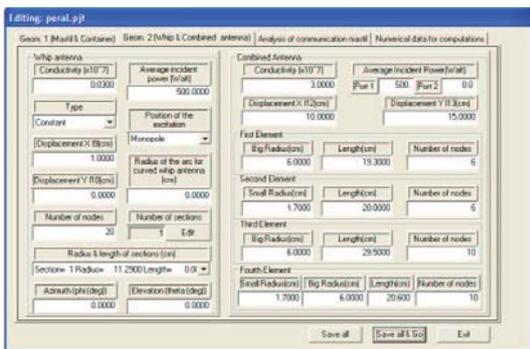


Fig. 5. Edición de datos de entrada de la aplicación.

Finalmente, se pueden representar dos tipos de parámetros de salida: parámetros circuitales de la estructura, y diagramas

de campo eléctrico. Cada uno de estos tipos de parámetros está asociado con un tipo de simulación. En el primer caso, una simulación de parámetros circuitales puede dar lugar a la representación de los parámetros de impedancia, admitancia y de scattering de la estructura. En esta simulación los parámetros son representados en un intervalo de frecuencias. El segundo tipo de simulación se realiza a una sola frecuencia, y se obtienen diagramas de campo radiado, tanto lejano como cercano, además de la representación tridimensional de la densidad superficial de corriente sobre la estructura.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la financiación recibida para la realización de este trabajo por parte de IZAR-CARENAS S.A. También se agradece el soporte a los proyectos nacionales ESP2001-4546-PE, TIC2000-0591-C03-03 y proyecto Séneca 2003.

#### REFERENCES

- [1] C. M. Butler and D. R. Wilton, "Analysis of various numerical techniques applied to thin wire scatterers," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 23, pp. 534–540, July 1975.
- [2] D. H. Werner, "A method of moments approach for the efficient and accurate modeling of moderately thick cylindrical wire antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 46, pp. 373–382, March 1998.
- [3] S. D. Rogers and C. M. Butler, "An efficient curved-wire integral equation solution technique," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 49, pp. 70–79, January 2001.
- [4] R. F. Harrington, *Field Computation by Moment Methods*. New York: The MacMillan Company, 1968.
- [5] G. J. Burke and A. J. Poggio, "Numerical electromagnetic code (nec), method of moments, part ii: Program description- code," Technical Report N00014-71-C-0187, Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, California, January 1981.
- [6] W.-X. Wang, "The exact kernel for cylindrical antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 39, pp. 434–435, April 1991.
- [7] S. M. Rao, D. R. Wilton, and A. W. Glisson, "Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 30, pp. 409–418, May 1982.
- [8] E. H. Newman and D. M. Pozar, "Electromagnetic modeling of composite wire and surface geometries," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 26, pp. 784–788, Nov 1978.
- [9] I. Tekin and E. H. Newman, "Method of moments solution for a wire attached to an arbitrary faceted surface," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 46, pp. 559–562, April 1998.
- [10] N. C. Albertsen, J. E. Hansen, and N. E. Jensen, "Computation of radiation from wire antennas on conducting bodies," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 22, pp. 200–206, March 1974.
- [11] S. M. Rao, *Electromagnetic Scattering and Radiation of Arbitrarily-Shaped Surfaces by Triangular Patch Modeling*. 300 N ZEEB ROAD, ANN ARBOR, MI 48106, 18 BEDFORD ROW, LONDON WC1R 4EJ, ENGLAND: UMI Dissertation Services, 1980.
- [12] R. Cools, "Monomial cubature rules since Stroud," *Journal of Computational Applied Mathematics*, vol. 112, no. 21, pp. 1–2, 1999.
- [13] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*. New York: Dover, 1965.
- [14] F. D. Quesada and A. Álvarez Melcón, "A novel technique for the analysis of complex antennas with rotational symmetry using a simple thick wire model," in *AP-S International Symposium*, (Columbus, Ohio), IEEE, June 22-27 2003.
- [15] F. Q. Pereira, J. L. G. Tornero, and A. A. Melcon, "Una técnica simple y efectiva para el análisis de antenas de hilo de grosor considerable," in *Union Científica de Radio Internacional*, (Alcala de Henares, Madrid, Spain), URSI'02, Septiembre 11-13 2002.
- [16] F. D. Quesada, D. Cañete, and A. Álvarez Melcón, "A new attachment model for the study of wire-plate junction antennas," in *AP-S International Symposium*, (Columbus, Ohio), IEEE, June 22-27 2003.