

HERRAMIENTA SOFTWARE DE AYUDA A LA ADQUISICIÓN DE COMPETENCIAS SOBRE CÁLCULO DE PERÍMETROS DE SEGURIDAD ASOCIADOS A SISTEMAS RADIANTES

J. LAVIADA-MARTÍNEZ, Y. ÁLVAREZ-LÓPEZ, F. LAS-HERAS

Área de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oviedo. España.

La herramienta aquí presentada está destinada a la enseñanza del cálculo de volúmenes de seguridad asociados a un sistema que produzca emisiones radioeléctricas. Esta herramienta está enmarcada en el contexto de la asignatura “Proyectos” perteneciente al quinto curso de Ingeniero de Telecomunicación de la Universidad de Oviedo y tiene como objetivo reforzar una de las áreas en las que dichos ingenieros tienen competencias

1. Introducción

El plan de Ingeniero de Telecomunicación impartido en la Universidad de Oviedo incluye en su último curso la asignatura denominada “Proyectos”, cuyos descriptores, recogidos en [1], son “Metodología, formulación y elaboración de proyectos”.

Esta asignatura es impartida a partes iguales por las siguientes áreas de conocimiento: Área de Ingeniería Telemática, Área de Tecnología Electrónica y Área de Teoría de la Señal y Comunicaciones. En este artículo nos centraremos en la parte impartida por la última de estas áreas a la cual pertenecen los autores de este artículo.

Los contenidos teóricos de dicha asignatura están enfocados a dotar al alumno de la capacidad para la elaboración de un proyecto de Infraestructuras Comunes de Telecomunicaciones (ICT) de modo que, al final de la asignatura, el alumno debe ser capaz del diseño y elaboración de un proyecto ICT. De igual forma, los créditos prácticos de la asignatura complementan los contenidos teóricos de cara a la formación del alumno para la realización de un proyecto de ICT, aunque también se busca familiarizar al alumno con otro tipo de proyectos en el que también tendrá competencias una vez obtenida la titulación de Ingeniero de Telecomunicación.

En este ámbito, se encuentra la normativa en términos de Real Decreto y Ordenes recogidas por el Boletín Oficial del Estado en [2,3] relativa a la determinación de los niveles de exposición radioeléctrica en áreas cercanas a instalaciones radioeléctricas en las que puedan permanecer habitualmente personas. En dicha normativa, se recogen los valores máximos de campo electromagnético a los que debe ser expuesta una persona, debiendo delimitarse dicha zona con el objetivo de evitar problemas de salud.

El origen de esta normativa se encuentra en el pánico surgido durante el “boom” de los sistemas de telefonía móvil. A medida que estos sistemas comenzaron a expandirse, un buen número de antenas de telefonía base fueron instaladas en diversos emplazamientos con el objetivo de proporcionar cobertura en la mayor parte del territorio. La relativa proximidad de éstas a personas, especialmente aquellas situadas en las azoteas de edificios, desató una alarma social debido al temor a que éstas pudiesen ser nocivas para la salud.

A raíz de esta alarma social, diversos estudios fueron realizados siendo el más aceptado el recogido en el informe realizado por el ICNIRP [4] respecto a la política de exposición de personas a ondas electromagnéticas no ionizantes. Los valores recogidos en dicho informe, han sido adoptados como base para la regulación oficial, no solo en España, sino también en otros países como por ejemplo Suiza o Italia [5].

Una de las consecuencias de la normativa española, es que aquellas zonas donde los niveles electromagnéticos están por encima de un cierto límite (ver Tabla 1), deben ser debidamente señalizadas para evitar el paso dentro de la zona potencialmente dañino. De cara a abordar los ejercicios propuestos a este respecto, se ha creado una herramienta software que permita al alumno un análisis interactivo y ameno de este tipo de recintos. Como resultado, se espera que el alumno afiance conceptos relativos a la radiación y propagación de ondas electromagnéticas utilizando los conceptos previamente explicados en la asignatura de “Radiación y Radiopropagación” y que, finalmente, sea capaz de comprender la forma y tipo de volúmenes de protección más comunes.

Tabla 1. Valores máximos de referencia proporcionados por la normativa española.

Niveles de referencia (valores rms)				
Rango de frecuencias	Campo-E (V/m)	Campo-H (A/m)	Campo-B (uT)	Densidad de potencia de la onda plana equivalente (W/m ²)
0-1Hz	--	$3,2 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	--
1-8Hz	10000	$3,2 \cdot 10^4 / f^2$	$4 \cdot 10^4 / f^2$	--
8-25Hz	10000	$4000 / f$	$5000 / f$	--
0,025-0,8KHz	$250 / f$	$4 / f$	$5 / f$	--
0,8-3KHz	$250 / f$	5	6.25	--
3-150KHz	87	5	6.25	--
0,15-1MHz	87	$0,73 / f$	$0,92 / f$	--
1-10MHz	$87 / f^{0,5}$	$0,73 / f$	$0,92 / f$	--
10-400MHz	28	0,073	0,092	2
400-2000MHz	$1,375 \cdot f^{0,5}$	$0,0037 \cdot f^{0,5}$	$0,0046 \cdot f^{0,5}$	$f / 200$
2-300GHz	61	0,16	0,20	10

2. Objetivos

La herramienta software aquí presentada tiene como objetivo que el alumno intensifique o desarrolle las siguientes destrezas:

Valoración de la aproximación de campo lejano: el alumno debe aprender a discernir cuando esta aproximación es válida o no, para en caso de ser posible, aplicarla.

Variación del campo cercano: el alumno debe comprender que la variación del campo cercano presenta una naturaleza diferente a la de campo lejano y que por tanto su caracterización analítica no es en general factible siendo necesario recurrir a otros métodos.

Interpretación de resultados: el alumno debe ser capaz de interpretar datos de antenas reales de modo que, a partir de éstos, sea capaz de hacer una correcta valoración del perímetro de seguridad asociado a las mismas.

El desarrollo de capacidades de análisis ligadas directamente con el desarrollo profesional, en particular en cuanto a sus atribuciones profesionales para la medida y certificación de estaciones radioeléctricas.

3. Descripción del problema a estudiar

Tal y como se comentó en la introducción, la normativa recogida en el Boletín Oficial del Estado [2] establece que se deben delimitar las zonas próximas a un sistema radiante que exceden los niveles máximos de campo electromagnético.

La radiación emitida por una cierta fuente, p. ej. una estación de telefonía base, disminuye con la distancia a la fuente para zonas alejadas del emisor. En el caso del campo eléctrico o magnético, este decaimiento es inversamente proporcional a la distancia y, por tanto, la potencia disminuye de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Como consecuencia

La figura 1 recoge una situación en la que existen dos antenas situadas en un entorno accesible por personas (p. ej. una azotea). Como consecuencia de la radiación de la antena existe un volumen que depende de las características de la antena y que puede tener una forma más o menos caprichosa, en el cual el campo electromagnético excede los valores recogidos en la Tabla 1. El cálculo de dicho volumen es el problema a estudiar.

Finalmente, es importante remarcar que dada la forma caprichosa que este volumen puede tener su señalización no es en absoluto trivial. Por ello, este volumen “crudo” suele enmarcarse por una forma canónica como una caja rectangular o un cilindro.

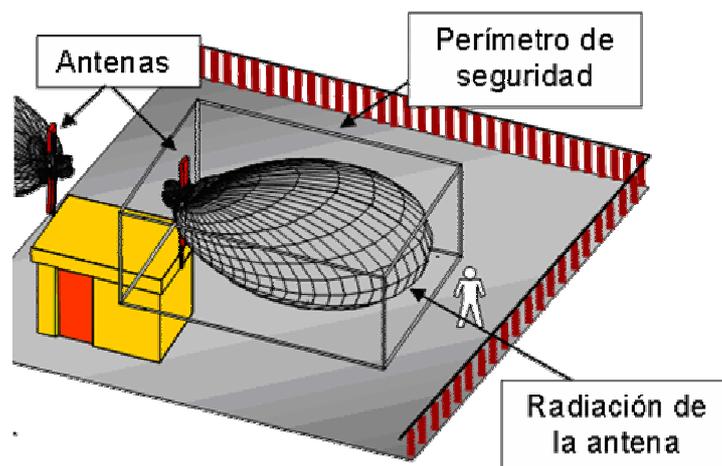


Figura 1. Perímetro de seguridad asociado a una antena de telefonía.

4. Formulación del problema

Dada una antena con una ganancia directiva D , emitiendo una potencia radiada P_{rad} , el módulo de su campo eléctrico, en un punto definido por las coordenadas esféricas r, θ, ϕ perteneciente a la región de campo lejano, viene dado por:

$$\|\mathbf{E}(r, \theta, \phi)\|^2 = 2\eta \frac{P_{rad} D(\theta, \phi)}{4\pi r^2}, \quad (1)$$

siendo η la impedancia de espacio libre. Por tanto, si se define un cierto límite para el campo eléctrico E_{max} , la distancia a la cual debe situarse el perímetro de seguridad para una cierta antena será:

$$R(\theta, \phi) = \frac{1}{E_{max}} \sqrt{2\eta \frac{P_{rad} D(\theta, \phi)}{4\pi}}. \quad (2)$$

Es importante remarcar que esta sencilla formulación es solo válida cuando el perímetro de seguridad pertenece a la región de campo lejano, lo cual no es cierto para un amplio abanico de casos.

Debido a lo anterior, es necesario aplicar técnicas más elaboradas que nos permitan caracterizar la antena. Para ello, se caracterizará la antena por un conjunto de corrientes superficiales eléctricas \mathbf{J} y magnéticas, \mathbf{M} , a partir del programa ANCAN [6] y los ficheros de medida de las antenas.

Una vez obtenidas estas corrientes eléctricas y magnéticas, el campo eléctrico puede ser calculado en cualquier punto del espacio \mathbf{r} como la convolución de las mismas con las funciones de Green correspondientes:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -j\omega\mu\bar{\mathbf{G}}^{(e)}(\mathbf{r}) * \mathbf{J}(\mathbf{r}) + \bar{\mathbf{G}}^{(m)}(\mathbf{r}) * \mathbf{M}(\mathbf{r}), \quad (3)$$

siendo ω la frecuencia angular y μ la permeabilidad magnética. Las funciones de Green para corrientes eléctricas y magnéticas vienen dadas por:

$$\bar{\mathbf{G}}^{(e)}(\mathbf{r}) = \left[\bar{\mathbf{I}} + \frac{\nabla\nabla}{k_0^2} \right] g(\mathbf{r}) \quad (4)$$

$$\bar{\mathbf{G}}^{(m)}(\mathbf{r}) = -\nabla \times (g(\mathbf{r}) \bar{\mathbf{I}}) \quad (5)$$

Si las fuentes han sido reconstruidas sobre una malla regular apoyada sobre una caja rectangular, entonces es posible recuperar el campo sobre una malla regular con el mismo espacio (ver Figura 2) de forma muy eficiente aplicando la transformada de Fourier a la ecuación (3), de modo que las convoluciones se convierten en sencillos productos:

$$\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}) = -j\omega\mu\tilde{\bar{\mathbf{G}}}^{(e)}(\mathbf{r}) \cdot \tilde{\mathbf{J}}(\mathbf{r}) + \tilde{\bar{\mathbf{G}}}^{(m)}(\mathbf{r}) \cdot \tilde{\mathbf{M}}(\mathbf{r}). \quad (6)$$

Una vez calculado el campo en una malla regular, el cálculo del perímetro de seguridad se reduce a computar la isosuperficie donde el campo excede un cierto valor.

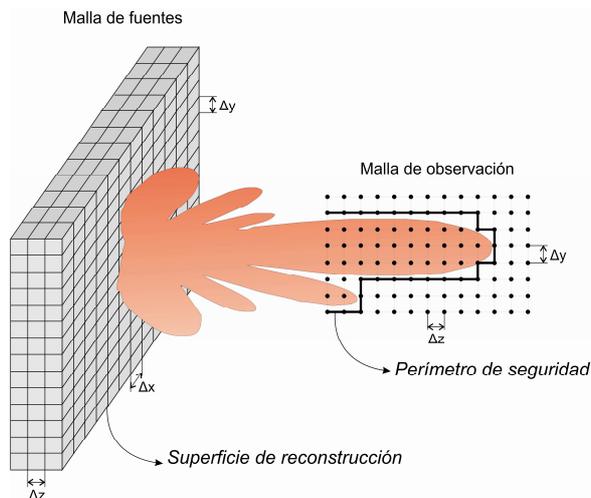


Figura 2. Mallado de la superficie de reconstrucción que engloba a la antena y de la malla de observación sobre la que se calculará el campo.

5. Características de la herramienta software

El software aquí presentado ha sido desarrollado utilizando Matlab [6]. La elección de esta herramienta se basa en tres hechos fundamentales:

- *Facilidad de desarrollo de software:* el amplio abanico de funciones disponibles, orientadas tanto al análisis numérico como a la correcta visualización de los resultados, permite un cómodo desarrollo de códigos numéricos. Esta característica también es extensible a la creación de interfaces gráficas, de modo que se pueden crear herramientas atractivas para el usuario en muy poco tiempo.
- *Posibilidad de integración con lenguajes precompilados:* el análisis de problemas electromagnéticos puede ser muy intensivo en uso de CPU incluso para problemas de dimensiones moderadas. Por este motivo, una implementación 100% desarrollada en Matlab no es recomendable pues sería demasiado lenta y, por tanto, poco interactiva. Por este motivo, es especialmente útil la posibilidad de Matlab para incluir funciones desarrolladas en otros lenguajes como Fortran, C o C++, con el objetivo de acelerar aquellas zonas del código que requieren un mayor tiempo.

5.1. Núcleo de cálculo

El núcleo de cálculo se divide en dos partes consecutivas y bien diferenciadas. En la primera de ellas se lleva a cabo el cálculo del campo radiado por las fuentes equivalentes que modelan la antena. Dichas fuentes han sido previamente calculadas a partir de medidas y son entregadas al alumno en forma de ficheros de texto que son cargados en el programa mediante la opción correspondiente. Una vez cargadas las fuentes equivalentes, se procede a precalcular el campo emitido por la antena en una retícula tridimensional cuyas dimensiones pueden ser estimadas a priori a partir del diagrama de radiación de la antena. El campo calculado mediante (6) (previo cómputo numérico de las transformadas de Fourier oportunas) es la parte más intensa computacionalmente y ha sido implementada en Fortran.

La segunda parte del núcleo de cálculo la constituye el cómputo del volumen de protección. Para ello se obtienen los valores electromagnéticos máximos en función de la normativa y se calcula la

isosuperficie a dicho valor. Esta parte ha sido rediseñada para que tanto los cambios en el valor de la potencia radiada por la antena como los cambios en el umbral, puedan ser evaluados en tiempo real con el objetivo de mejorar la interactividad.

5.2. Interfaz gráfica

La interfaz gráfica obedece a un diseño sencillo que permite el control de tan solo aquellas opciones que pueden ser de interés para su formación, fijándose el resto de parámetros de forma automática. La pantalla inicial del programa queda recogida en la figura 1, donde se puede ver como todas las opciones están desactivadas a excepción de la carga de ficheros de datos y la visualización de los valores de la normativa dados en [2].

Las principales opciones que permite la interfaz gráfica son las siguientes:

- *Carga de ficheros de datos*: es posible cargar tanto datos provenientes de una medida de una antena para su posterior procesado como datos provenientes de sesiones anteriores.
- *Visualización de los datos guardados*: permite ver el volumen donde se han reconstruido las corrientes. La principal función es permitir al usuario poder ubicar la antena dentro de otras representaciones.
- *Configuración del rango de valores en los que se precalcula el campo*: esta pensado para que el alumno de un rango estimado de valores en función de las aproximaciones teóricas de campo lejano más una cierta tolerancia. También es posible visualizar el rango de valores en los que se calcula el campo para facilitar la inspección del mencionado rango.
- *Cálculo de cortes*: permite una visualización bidimensional del campo electromagnético total, dando lugar a visualizaciones más completas (ver Figura 5).
- *Visualización de elementos de referencia*: para poder tener un elemento de comparación, se permite la visualización de un cuerpo similar al de una persona de altura 1,84 m (ver Figura 4).
- *Visualización de la aproximación de campo lejano*: se incorpora esta opción con el objetivo de comparar el perímetro de seguridad obtenido de forma directa y con la aproximación de campo lejano.
- *Modificación dinámica de parámetros*: es posible modificar los valores de Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) así como los valores máximos de campo electromagnético de forma que se observe su impacto en el volumen de seguridad de forma interactiva.
- *Visualización de los valores de la normativa*: permite al alumno observar la variación de los valores límite en función de la frecuencia de trabajo.

6. Requisitos

Desde el punto de vista software la herramienta aquí presentada necesita el entorno Matlab para poder ser ejecutada, siendo este el único requisito indispensable. En concreto se necesita la versión de *Matlab 2008a o superior*. Puesto que Matlab está disponible tanto en entornos Windows como en

entornos Unix, la herramienta software puede ser potencialmente utilizada en cualquiera de dichos sistemas operativos. En particular, la herramienta ha sido probada en los siguientes sistemas operativos:

- Windows XP 32 bits
- Windows XP 64 bits
- CentOS 4.8 64 bits.

Opcionalmente los usuarios pueden utilizar el programa ANCAN [7] para la visualización de datos relativos a las corrientes superficiales así como el cálculo de la directividad de la antena.

Desde el punto de vista hardware, el programa se ejecuta de forma fluida en ordenadores equipados con al menos:

- Procesador Intel Core 2 Duo a 2.4 GHz o equivalente.
- 2 GB de memoria RAM.

7. Ejemplo de uso aplicado a la actividad docente

La aplicación de esta herramienta en la asignatura está planificada para una práctica de duración dos horas. Los datos utilizados son relativos a un sistema compuesto por una estación de telefonía móvil funcionando en la banda de 1800 MHz. La actividad propuesta está descompuesta en los siguientes pasos:

1. Visualizar el sistema radiante y sus características –PIRE y diagrama de radiación de campo lejano– con el programa ANCAN [7]. A partir de estos parámetros el alumno hará una primera estimación del volumen de referencia basada en la aproximación de campo lejano.
2. Introducir los ficheros de datos provenientes del ANCAN en la herramienta de cálculo de volúmenes de exclusión y visualizar el perímetro de seguridad para una PIRE de 500 W (valor en el rango de estaciones para un entorno urbano). Llegados a este punto el alumno puede comprobar si las aproximaciones analíticas de campo lejano muestran una buena precisión con los resultados obtenidos a partir de medidas.
3. Comprobar las variaciones en la forma del perímetro de seguridad, tanto en 3D como en cortes, al aumentar el valor de PIRE. De esta forma se muestra al alumno como en caso de valores de PIRE altos, donde la región de exclusión se encuentra en la zona de campo lejano de la antena, el perímetro de seguridad será proporcional al diagrama de radiación (campo lejano). Por el contrario, valores bajos de PIRE dan lugar a volúmenes de exclusión de formas caprichosas que poco o nada tienen que ver con el diagrama de radiación de la antena
4. Como prueba final, se propone de forma opcional comprobar el efecto de variar los límites en valores RMS tanto para el campo eléctrico como magnético. De esta forma, el alumno verificará de forma empírica como las relaciones que existen entre ambas cantidades para campo lejano, no se verifican en las proximidades de la antena, debiendo por tanto tratarse de forma individualizada.

8. Conclusiones

En esta comunicación se ha presentado una herramienta software de fácil manejo que permite al alumno calcular perímetros de seguridad entorno a sistemas radiantes tal y como se refleja en la normativa estatal. De esta forma, el alumno que se encuentra cursando el último curso de Ingeniería de Telecomunicación obtiene base en una de las materias en las que tiene atribuciones profesionales.

Además, el alumno refuerza los conceptos aprendidos en el curso anterior con respecto a la radiación y propagación de ondas electromagnéticas, haciendo especial hincapié en el correcto uso de las aproximaciones de campo lejano.

Referencias

- [1] “Resolución de 8 de agosto de 2000, de la Universidad de Oviedo, por la que se publica la adaptación del plan de estudios de Ingeniero de Telecomunicación a los Reales Decretos 614/1997, de 25 de abril, y 779/1998, de 30 de abril,” Boletín Oficial del Estado, España (2000).
- [2] “Real decreto 1066/2001, de 28 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas,” Boletín Oficial del Estado, España (2001).
- [3] “Orden CTE/23/2002, de 11 de enero, por la que se establecen condiciones para la presentación de determinados estudios y certificaciones por operadores de servicios de radiocomunicaciones,” Boletín Oficial del Estado, España (2002).
- [4] “Council recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz),” Official J. European Community L1999, vol. 59.
- [5] “Decree 10 September 1998, No.381. Regulations for the determination of ceiling values of radiofrequency compatible with human health,” Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n.257, Italia (1998).
- [6] *Matlab User Guide*, The Mathworks, 2009, <http://www.mathworks.com>.
- [7] Y. Alvarez, F. Las-Heras, "ANCAN: An Integrated Software Tool for the Analysis and Characterization of Antenna Arrays," *Antennas and Propagation Magazine, IEEE* , vol.49, no.6, pp.156-164, Dic. 2007

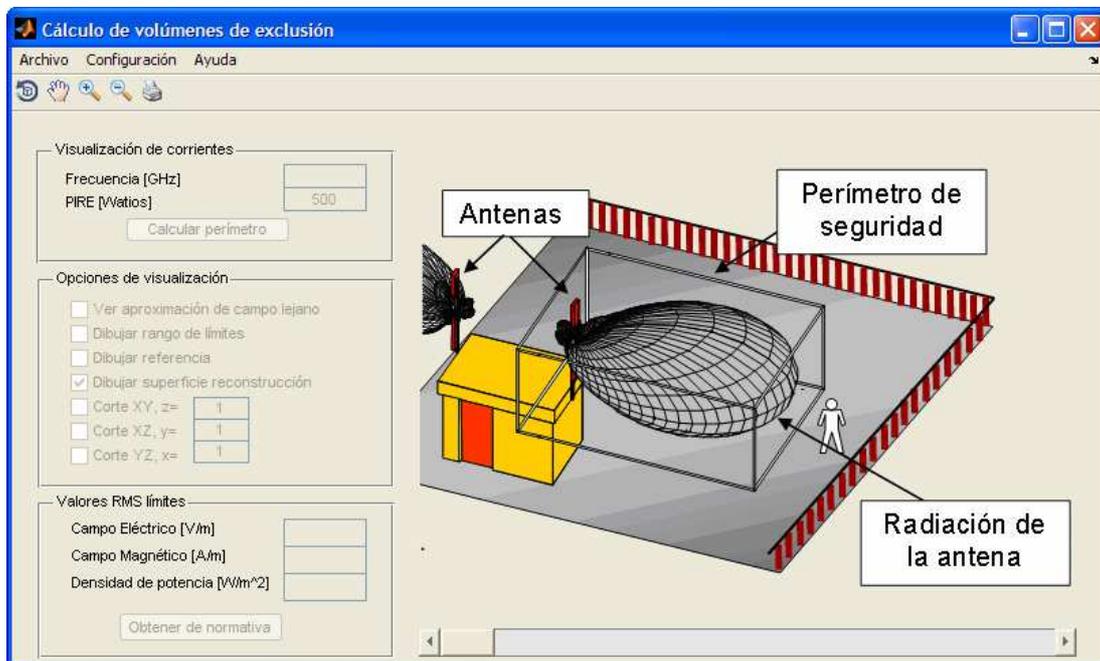


Figura 3. Pantalla inicial del programa.

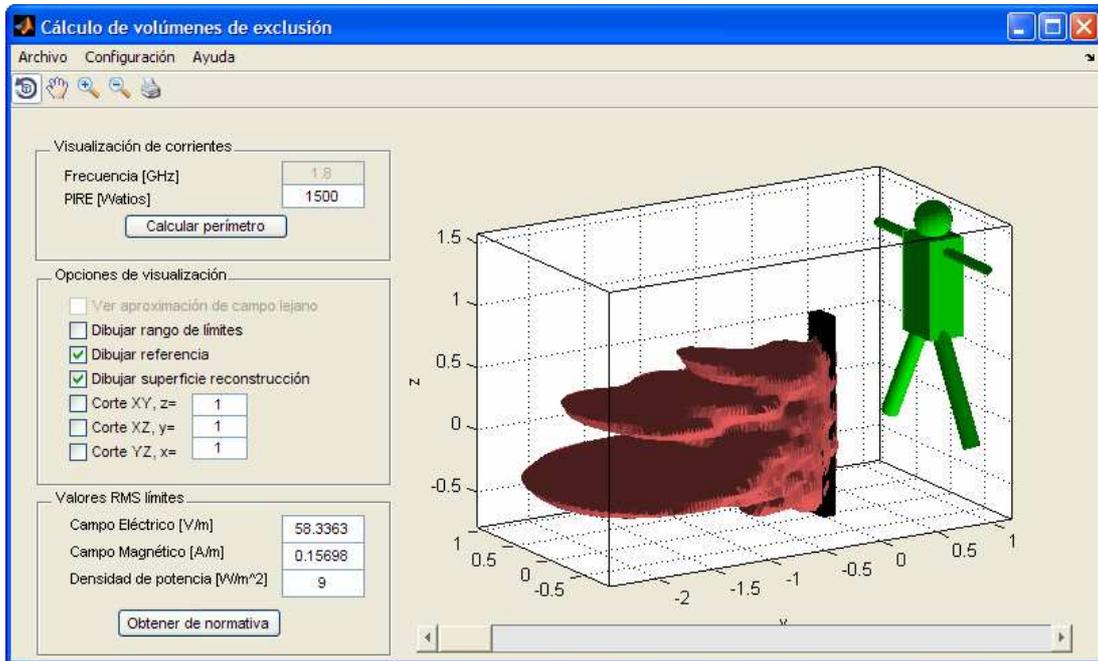


Figura 4. Visualización de un volumen de referencia para una estación de telefonía móvil junto a un elemento de referencia.

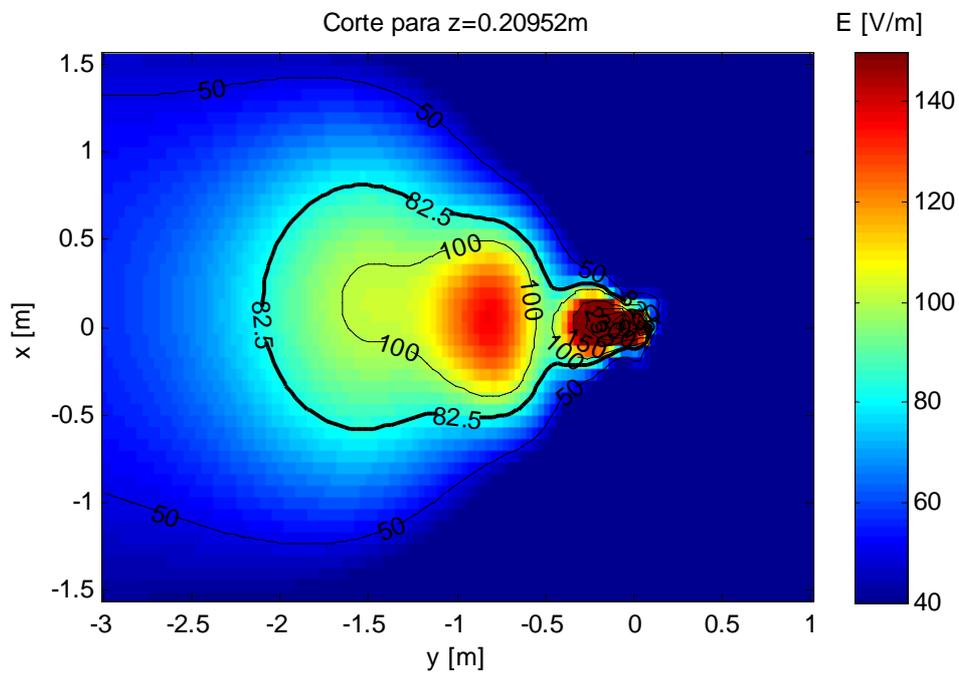


Figura 5. Corte para horizontal de campo eléctrico obtenido para una PIRE de 1500 W.

