

# Antenec: códigos electromagnético-numéricos aplicados al cálculo de antenas

Julián Ricardo Solano Acosta<sup>1</sup>

José Ignacio Castañeda F.<sup>2</sup>

## RESUMEN

Antenec es una implementación computarizada del método de momentos para el análisis de antenas compuestas por elementos delgados de alambre o aquellas que se puedan caracterizar por agrupación finita de estos. Antenec emplea métodos numéricos para resolver las ecuaciones integrales de campo eléctrico y potencial de elementos delgados de alambre arbitrariamente orientados. Dando como salidas los patrones de radiación de la distribución analizada y las características electromagnéticas de la misma.

**Palabras clave:** Antenas delgadas de alambre, Campos electromagnéticos, Códigos Electromagnético-Numéricos (NEC), Método de momentos.

## ABSTRACT

Atenec is a computerized implementation of the moments for the analysis of antennas composed by thin elements of wire or those that can be characterized by finite grouping of these. Atenec uses numeric methods to solve the integral equations of electric field and potential of guided thin elements of wire, giving as exits the patterns of radiation of the analyzed distribution and electromagnetic characteristic of the same one.

**Key Words:** Thin antennas of wire, Electromagnetic fields, Numeric Electromagnetic Codes (NEC), Method of moments.

## I. INTRODUCCIÓN

EL cálculo y modelamiento de antenas son partes centrales en la investigación, implementación y desarrollo de sistemas radiantes para comunicaciones inalámbricas. Dada la imposibilidad de obtener soluciones analíticas generales para las ecuaciones de campo eléctrico y potencial (vectorial y escalar) se deben usar métodos numéricos para hallar las respuestas a estas ecuaciones, respuestas que, cuando más, son una buena aproximación. Si bien los métodos numéricos datan de la misma época en que se originó el cálculo analítico solo la aparición de procesadores cada vez más rápidos y confiables han hecho posible su aplicación a problemas prácticos.

Las primeras aplicaciones computacionales destinadas al análisis de antenas datan de finales de los 60 con la aparición de Nec (Numerical-Electromagnetics Code) [1] y MININEC cuya última versión apareció

en 1984 para IBM-PC o compatible [2]. Siendo estas las aplicaciones más usadas hoy en día.

**Antenec**, es un programa de computadora que aplica el método de momentos para el análisis de antenas delgadas de alambre [3]. **Antenec** está diseñado para computadores IBM-PC o compatibles con el sistema operativo Windows instalado.

**Antenec** resuelve la impedancia y la corriente de elementos de alambre arbitrariamente orientados y conectados, teniendo en cuenta su entorno ya sea espacio libre o sobre un plano de tierra (perfecto o no), con múltiples puntos de alimentación. Las salidas son las gráficas de los patrones de radiación y los valores de impedancia, potencia, voltaje y corriente de cada fuente especificada.

## II. JUSTIFICACIÓN

### A. Limitaciones

Las aplicaciones existentes tienen limitaciones importantes en cuanto a la geometría, al número de alambres, conexiones y fuentes que pueden manejar; la exactitud de sus resultados con el aumento de la relación radio del elemento - longitud de onda de diseño ( $r_0/\lambda$ ) reduce su convergencia [4], además sus tiempos de procesamiento son bastante largos.

### B. Modo de Entrada

La especificación de una antena en la mayoría de las aplicaciones existentes se realiza mediante archivos planos (ASCII o Unicode) con un formato especial, lo que dificulta la especificación de una antena por parte del usuario, además para crear un archivo de entrada debe hacerse uso de aplicaciones externas.

### C. Salidas

Las versiones originales de NEC y MININEC dan como salida archivos planos con los resultados del cálculo, no generan gráficas de patrones; otros paquetes como Jampro JTS, si entregan este tipo de resultados pero limita su uso a antenas propietarias (antenas de catálogo).

### D. Entorno gráfico

Los programas existentes no utilizan las tecnologías de programación gráfica actuales, tampoco cuentan con una interfaz agradable e intuitiva.

<sup>1</sup> Ingeniero de Telecomunicaciones, Universidad Santo Tomás.

<sup>2</sup> Miembro Grupo de Investigación en Comunicaciones, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

### III. PLANTEAMIENTO

Dados los inconvenientes anteriormente citados, se propuso construir una herramienta que los superara y que empleara las tecnologías actuales en cuanto a programación, graficación, almacenamiento y distribución. Una herramienta más amable y funcional y sobre todo más fácil de utilizar.

### IV. MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático empleado en Antenec es una adaptación del método de momentos [3], utilizando la aproximación sugerida por Wilton [5], la ventaja de utilizar este método radica en que el código resultante es relativamente corto.

La filosofía principal de este método es dividir cada elemento de alambre en segmentos de tamaño pequeño comparado con la longitud de onda de diseño, de modo que, la corriente pueda ser considerada constante en cada segmento y la carga total como la suma algebraica de la carga de cada segmento. Dado que el potencial sobre el elemento debe ser constante (es un elemento conductor), si se calcula el potencial en diferentes puntos sobre el conductor, se obtendrá un sistema de ecuaciones de N corrientes por N segmentos; a partir de su solución es posible calcular los parámetros electromagnéticos del elemento utilizando las ecuaciones de Maxwell y sus ecuaciones derivadas [6].

#### A. La ecuación integral de campo eléctrico y su solución

Para que la siguiente solución de la ecuación de campo eléctrico sea válida es necesario asumir que el radio del elemento es pequeño en comparación de la longitud del segmento y la longitud de onda de diseño; esto, porque la corriente debe ser considerada esencialmente axial (paralela al elemento) sin componentes azimutales.

La figura 1 muestra la geometría de un elemento arbitrariamente orientado. Se asume que el elemento es recto, aunque este análisis también es válido para elementos curvos; el mismo elemento con la segmentación requerida para el cálculo es mostrado en la figura 2.

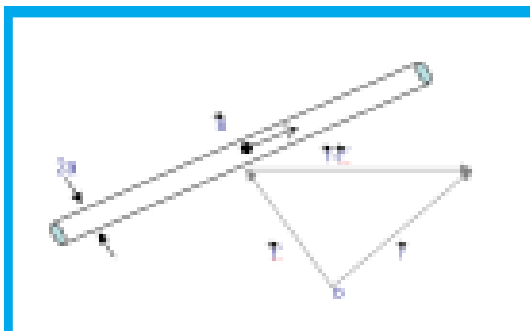


Figura 1. Un alambre arbitrariamente orientado

El potencial vectorial esta dado por:

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi_c} \int I(s) \vec{s}(s) k(s-s') ds \quad (1)$$

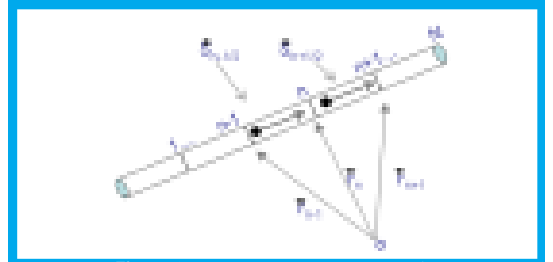


Figura 2. Esquema de segmentación

El potencial escalar esta dado por:

$$\phi = \frac{1}{4\pi_c} \int q(s) k(s-s') ds \quad (2)$$

Donde

$$k(s-s') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} d\phi$$

$$r = ((s-s')^2 + 4a^2 \text{sen}^2(\phi/2))^{1/2}$$

la densidad de carga [7] por la ecuación de continuidad esta dada por:

$$q(s) = \frac{-1}{j\omega} \frac{dI}{ds} \quad (3)$$

k se puede reemplazar por la aproximación [5]:

$$k_0 = \frac{e^{-jkr}}{r} \text{ siendo } r = ((s-s')^2 + a^2(s))^{1/2} \text{ Solo}$$

si  $|\vec{r} - \vec{r}'| \gg a$

Ahora bien, la ecuación que relaciona el campo eléctrico incidente con el potencial escalar y vectorial es:

$$\vec{E}_{inc} \cdot \vec{s} = -j\omega \vec{A} \cdot \vec{s} - \vec{s} \cdot \nabla \phi \quad (4)$$

La ecuación 4 es resuelta en **Antenec** siguiendo el siguiente procedimiento:

Los elementos son divididos en segmentos de igual tamaño como muestra la figura 2, los vectores  $\vec{r}_n$   $n=0,1,2,\dots,N+1$  son definidos con respecto al origen de coordenadas  $o$ , los vectores unitarios paralelos al eje de cada segmento son definidos como sigue:

$$\vec{s}_{n+1/2} = \left( \frac{\vec{r}_{n+1} - \vec{r}_n}{|\vec{r}_{n+1} - \vec{r}_n|} \right) \quad (5)$$

Como debe evaluarse el potencial en diferentes puntos sobre el elemento, se define la siguiente función de pulsos de prueba :

$$P_n(s) = \begin{cases} 1, & s_{n-1/2} < s < s_{n+1/2} \\ 0, & \text{e.c.o.c} \end{cases} \quad (6)$$

donde los puntos  $s_{n+1/2}$  determinan el punto medio de cada segmento.

$$s_{n+1/2} = \frac{s_{n+1/2} + s_n}{2} \quad (7)$$

(7) en términos de las coordenadas globales:

$$\vec{r}_{n+1/2} = \frac{\vec{r}_{n+1/2} + \vec{r}_n}{2} \quad (8)$$

Se asume que los componentes de los vectores  $\vec{E}_{inc}$  y  $\vec{A}$  son lo suficientemente constantes en cada segmento para que sus correspondientes valores pueden ser reemplazados por los obtenidos en los puntos  $s_n$ . Aplicando (6) en (4) obtenemos:

$$E_{inc}(s_m) \cdot \left[ \left( \frac{s_m - s_{m-1}}{2} \right) \delta_{m-1/2} + \left( \frac{s_{m+1} - s_m}{2} \right) \delta_{m+1/2} \right] = j\omega \vec{A}(s_m) \cdot \left[ \left( \frac{s_m - s_{m-1}}{2} \right) \delta_{m-1/2} + \left( \frac{s_{m+1} - s_m}{2} \right) \delta_{m+1/2} \right] + \phi(s_{m+1/2}) - \phi(s_{m-1/2}) \quad (9)$$

Utilizando las coordenadas globales:

$$E_{inc}(s_m) \cdot (\vec{r}_{m+1/2} - \vec{r}_{m-1/2}) = j\omega \vec{A}(s_m) \cdot (\vec{r}_{m+1/2} - \vec{r}_{m-1/2}) + \phi(s_{m+1/2}) - \phi(s_{m-1/2}) \quad (10)$$

Las corrientes son expandidas en pulsos centrados en las juntas de los segmentos como lo muestra la figura 3. En los extremos del alambre se coloca un pulso de amplitud cero dado que la corriente debe ser nula en esos puntos si el alambre no esta conectado a ningún otro.

La corriente total se expresa como:

$$I(s) = \sum_{n=1}^N I_n P_n(s) \quad (11)$$

La carga es representada como pulsos desplazados medio ancho de pulso con respecto a la corriente.

Sustituyendo (11) en (10) se produce un sistema de ecuaciones que puede expresarse en forma matricial [8]; cada elemento de la matriz  $Z_{m,n}$ , esta relacionado con la n-ésima corriente y cada punto  $s_m$  involucra los potenciales escalar y vectorial según:

$$\psi_{m,u,v} = \int_{s_u}^{s_v} k(s_m - s') ds' \quad (12)$$

Donde:

$$k(s - s') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{e^{-jkr_m}}{r_m} d\phi \quad (13)$$

$$r = ((s_m - s')^2 + 4a^2 \sin^2(\phi/2))^{1/2} \quad (14)$$

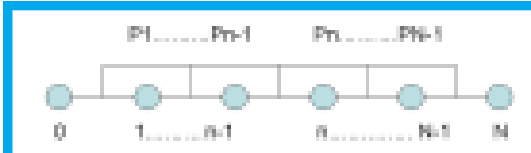


Figura 3. Representación de los pulsos de carga y corriente.

Es necesario eliminar la singularidad  $r=0$  de la ecuación (12) entonces:

$$k(s - s') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{d\phi}{r_m} + \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{e^{-jkr_m} - 1}{r_m} d\phi \quad (15)$$

El primer término de (15) puede expresarse como una integral elíptica de primer tipo.

$$\frac{\beta}{\pi a} F\left(\frac{\pi}{2}, \beta\right) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{d\phi}{r_m} \quad (16)$$

Donde,  $\beta = \frac{2a}{[(s_m - s')^2 + 4a^2]^{1/2}}$

$F\left(\frac{\pi}{2}, \beta\right)$  se puede aproximar como:

Donde,

$$F\left(\frac{\pi}{2}, \beta\right) \cong [a_0 m + a_1 m + a_2 m^2 + a_3 m^3] [b_0 m + b_1 m + b_2 m^2 + b_3 m^3] \ln(1/m) \quad (17)$$

$$m = 1 - \beta^2$$

$$a_0 = 1.386629$$

$$a_1 = 0.096663$$

$$a_2 = 0.035900$$

$$a_3 = 0.037425$$

$$b_0 = 0.5$$

$$b_1 = 0.1249$$

$$b_2 = 0.0688$$

$$b_3 = 0.0332$$

Así:

$$\frac{\beta}{\pi a} F\left(\frac{\pi}{2}, \beta\right) \xrightarrow{s \rightarrow s'} -\frac{1}{\pi a} \ln\left[\frac{s_m - s'}{8a}\right] \quad (18)$$

Restrayendo la singularidad  $k(s_m - s')$

$$k(s - s') = -\frac{1}{\pi a} \ln\left[\frac{s_m - s'}{8a}\right] + \frac{\beta}{\pi a} F\left(\frac{\pi}{2}, \beta\right) + \ln\left[\frac{s_m - s'}{8a}\right] + \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{e^{-\beta r} - 1}{r} d\phi \quad (19)$$

Sustituyendo en (12)

$$\psi_{m,u,v} = \int_{s_u}^{s_v} k(s_m - s') ds' = I_1 + I_2 + I_3 \quad (20)$$

Donde

$$I_1 = -\frac{1}{\pi a} \int_{s_u}^{s_v} \ln\left[\frac{s_m - s'}{8a}\right] ds' = \frac{8}{\pi} u(1 - \ln|u|) \Big|_{u_2}^{u_1} \quad (21)$$

Siendo  $u_1 = \frac{s_v - s}{8a}$

$$u_2 = \frac{s_u - s}{8a}$$

De igual forma,

$$I_2 = \int_{s_u}^{s_v} \frac{\beta}{\pi a} F\left(\frac{\pi}{2}, \beta\right) + \ln\left[\frac{s_m - s'}{8a}\right] ds' \quad (22)$$

Esta integral es resuelta haciendo uso del método de cuadratura gaussiana [8].

Por último,

$$I_3 = \frac{1}{2\pi} \int_{s_u}^{s_v} \frac{e^{-jkr_a}}{r_a} ds' \quad (23)$$

Donde,  $r_a = \sqrt{(s_v - s')^2 + a^2}$

El procedimiento de integración numérica es idéntico al empleado para obtener  $I_2$ .

Los resultados (21), (22) y (23) son empleados para evaluar (12).

$$\psi = \frac{1}{2\pi \Delta s} \ln\left(\frac{\Delta s}{a}\right) - j \frac{k}{4\pi} \text{ si } m=n$$

$$(24)$$

$$\psi \approx \frac{e^{-jkr_m}}{4\pi r_m} \text{ si } m \neq n$$

Los resultados de Antenc son válidos si el radio del elemento esta entre  $10^{-2}$  y  $10^{-6}$  longitudes de onda de diseño.

Por sustitución la ecuación a resolver es:

$$[Z_{mn}] [I_n] = [V_m] \quad (25)$$

Donde,

$$Z_{mn} = \frac{1}{4\pi j \omega \epsilon} \left[ k^2 (\vec{r}_{m+1/2} - \vec{r}_{m-1/2}) \cdot (\vec{s}_{m+1/2} \psi_{m,n,n+1/2} + \vec{s}_{m-1/2} \psi_{m,n,n-1/2}) - \frac{\psi_{m+1/2,n,n+1}}{s_{n+1} - s_n} + \frac{\psi_{m+1/2,n-1,n}}{s_n - s_{n-1}} + \frac{\psi_{m+1/2,n+1,n}}{s_n - s_{n+1}} + \frac{\psi_{m+1/2,n-1,n}}{s_n - s_{n-1}} \right] \quad (26)$$

y

$$V_m = E_{inc}(s_m) \cdot (\vec{r}_{m+1/2} - \vec{r}_{m-1/2}) \quad (27)$$

$Z_{mn}$  es una matriz cuadrada e  $I_n$  y  $V_m$  son matrices columna con  $n=1,2,3\dots N$  y  $m=1,2,3\dots N$ ; donde  $N$  es el número total de pulsos, la matriz 25 se resuelve en **Antenec** utilizando el método de cofactores.

## V. CONFIGURACIONES COMPUESTAS

La teoría desarrollada para alambres rectos es igualmente aplicable a elementos curvos que pueden ser tratados como agrupación de alambres rectos.

La corriente en las juntas de los alambres delgados se comporta de acuerdo con las leyes de Kirchoff [9].

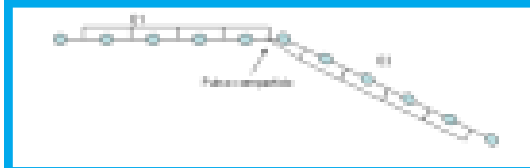


Figura 4. El elemento 2 comparte un pulso con el

Si se añade un segundo elemento al de la figura 3, ese segundo elemento posee un pulso diferente de cero en el punto de unión como muestra la figura 4, los segmentos y cálculos del alambre 1 se realizan según sus dimensiones, como también los del alambre 2 cuyas dimensiones pueden ser diferentes a los del alambre 1. Un pulso completo se genera en la junta, situación que se repite si añadimos un tercer alambre (figura 5); así para una junta de  $N$  alambres son necesarios  $N-1$  pulsos compartidos, las direcciones de las corrientes son asumidas en el orden de entrada de las coordenadas del elemento, de esta manera, usando la referencia de corriente y la ley de corrientes de Kirchoff se calcula la corriente en la junta; por ejemplo, en la figura 5,  $I_1=I_2+I_3$ .

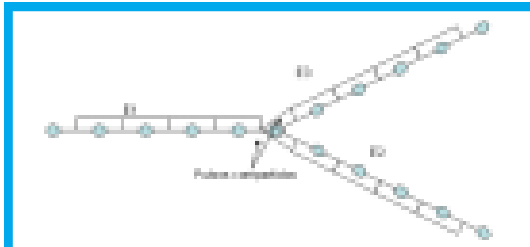


Figura 5. Los elementos 2 y 3 comparte un pulso con el elemento 1

## VI. PLANO DE TIERRA

El método de las imágenes [10] es utilizado en **Antenec** para resolver las corrientes de los elementos ubicados sobre un plano conductor.

Considerando la estructura, un alambre representado como  $N$  segmentos en presencia de un plano conductor, se puede reemplazar por la estructura original y su correspondiente imagen especular, así se obtienen  $2N$  segmentos y  $2N$  corrientes por determinar, aplicando esto en (25) se obtiene:

$$[Z_{m2n}][I_{2n}] = [V_{2m}] \quad (28)$$

que se resuelve por el método descrito anteriormente. Para un elemento conectado a tierra, un pulso es añadido en la conexión, de esta manera la corriente continúa hacia su imagen.

## VII. CÁLCULO DEL CAMPO LEJANO

Una vez calculadas las corrientes el campo eléctrico se obtiene de:

$$\vec{E}(\vec{r}_0) = \int_L \frac{jk n}{4\pi} \cdot \frac{e^{jkr}}{r_0} \cdot [\vec{k} \cdot \vec{I}(s)\vec{k} - \vec{I}(s)] e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}} ds \quad (29)$$

Donde  $\vec{r}_0$  es el vector de posición desde el punto

$$\text{de observación } \vec{k} = \frac{\vec{r}_0}{|\vec{r}_0|} \text{ y } k = k\hat{k} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

(29) es evaluada en cada uno de los segmentos del elemento para cada pulso de corriente, reduciéndose así todo el proceso a una suma sobre los segmentos del elemento.

El campo es evaluado en sus componentes real e imaginaria en los ángulos  $\theta$  y  $\phi$ .

La ganancia de potencia de la antena esta determinada por:

$$G = 10 \log \left( \frac{4\pi P(\theta, \phi)}{P_{in}} \right) \quad (30)$$

Donde  $P(\theta, \phi)$  es la potencia radiada por esterradian en la dirección  $(\theta, \phi)$  y  $P_{in}$  es la potencia de entrada de la antena.

$$P_{in} = \sum_{n=1}^N \frac{1}{2} \text{Re}(V_n I_n^*) \quad (31)$$

Donde  $n$  es el número de fuentes y  $P(\theta, \phi)$  es determinada por:

$$P(\theta, \phi) = \frac{1}{2} r_0^2 \text{Re}[\vec{E} \times \vec{H}] = \frac{r_0^2}{2} \vec{E} \cdot \vec{E}^* \quad (32)$$

## VIII. ANTENEC

### A. Filosofía

El código electromagnético-numérico para antenas **Antenec** fue pensado como una herramienta para el análisis, diseño y simulación de antenas de alambre delgado o aquellas que puedan ser modeladas como agrupaciones de estas.

### B. Descripción

**Antenec** consta de una sola ventana maestra (figura 6), con todos los elementos necesarios para la correcta simulación de la antena; en esta ventana se encuentra la tabla de entrada; [11] en la que se introducen las coordenadas necesarias para especificar un elemento no nulo de alambre; también se introduce la información sobre la alimentación del elemento.

Es posible definir el entorno como espacio libre, o plano de tierra, este último puede ser perfecto o pueden especificarse los valores de conductividad y la constante dieléctrica del terreno.



Figura 6. Ventana principal de Antenec.

En la ventana principal se encuentran también cuatro cuadros de imagen donde se da una vista previa de los diferentes patrones, cada patrón de radiación se puede ver en detalle haciendo doble clic sobre el cuadro deseado. También se muestra una distribución tridimensional de la antena especificada en la tabla de entrada.

Los diseños pueden ser guardados para ser recuperados después o se pueden exportar para ser utilizados en el software Radiales FM [12].

### C. Salidas

Las salidas en pantalla de **Antenec** son los patrones de radiación de azimut y elevación logarítmicos polares y rectangulares; sobre estos patrones se pueden observar los valores de ganancia relativa en cada una de las direcciones (figura 8) como también la ganancia de potencia máxima. También se entregan los valores de corriente, voltaje y potencia para cada una de las fuentes especificadas, la impedancia en cada punto de alimentación y la potencia total de entrada a la antena.

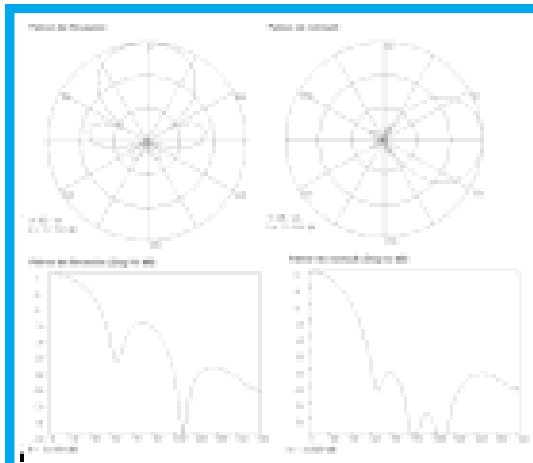


Figura 7. Patrones calculados por Antenec para una antena Yagi-Uda de 6 elementos.

**Antenec** genera un archivo en formato Word con las características de la antena y los parámetros calculados en la ubicación especificada.

### D. Limitaciones

**Antenec** puede manejar hasta 3500 elementos de hasta 3500 segmentos cada uno, con una especificación máxima de fuentes de 3500; **Antenec** entrega resultados válidos si el radio del elemento esta entre  $10^{-2}$  y  $10^{-6}$  longitudes de onda.

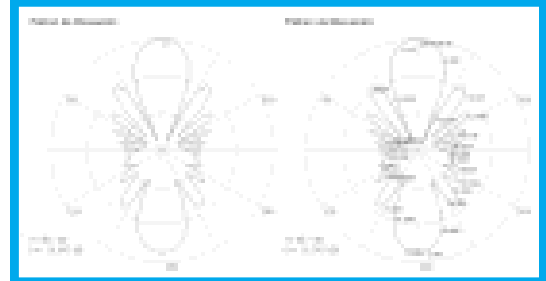


Figura 8. Patrones de elevación con y sin valores, para una antena en forma de V alimentada en el vértice, orientada según x,y a 24.9MHz.

## IX. VALIDACIONES

### A. Antenec Vs cálculos teóricos

Una de las antenas más utilizadas es el dipolo de media longitud de onda, el análisis teórico de Krauss [6] es válido si el diámetro del dipolo es menor a  $\lambda/200$ , la siguiente tabla muestra las diferencias entre el cálculo teórico y el obtenido con **Antenec**.

Parámetro	Krauss	Antenec
Impedancia ( $\Omega$ )	73+j42.5	79.202+j40.783
Ganancia (dB)	2.15	2.147
Ancho del Haz de media potencia (deg)	78	74.2

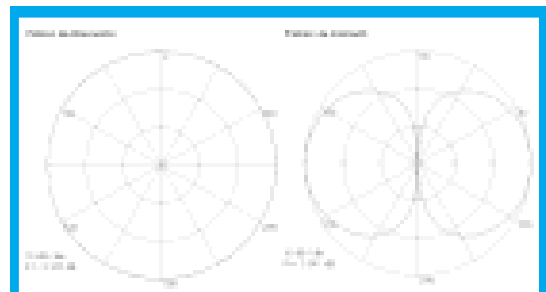


Figura 9. Patrón horizontal y vertical para un dipolo  $\lambda/2$

### B. Antenec Vs una antena de catálogo

Comparando la antena corner reflector CR4 de Rf Industries Inc. contra su caracterización en **Antenec** obtenemos los siguientes resultados:

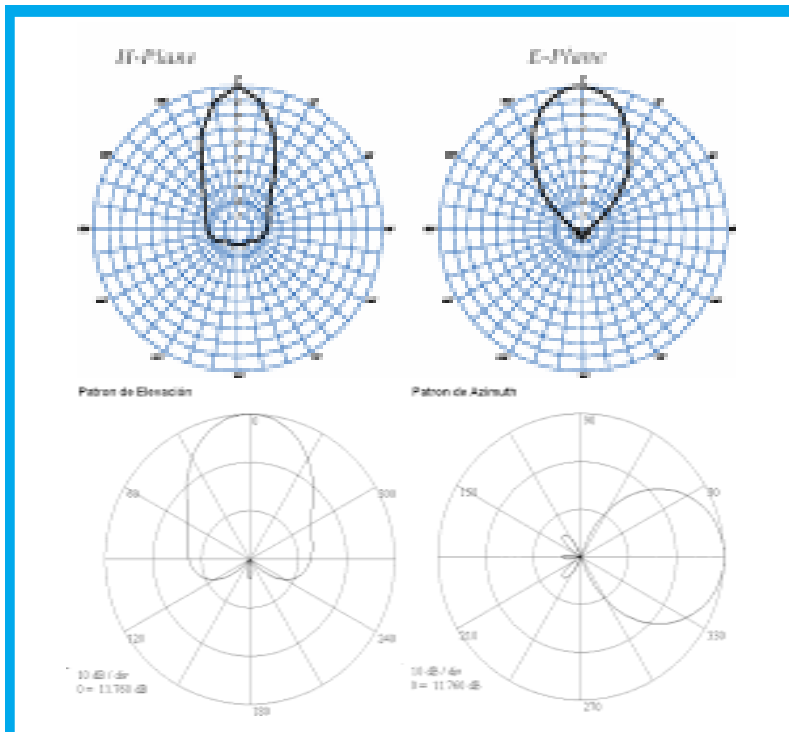


Figura 9. Patrones de elevación y azimut de la corner reflector CR4 de Rf Industries, nótese que los patrones del catálogo son porcentuales y los de Antenec logarítmicos.

Parámetro	Catálogo	Antenec
Impedancia ( $\Omega$ )	Acoplador externo	117.04+j10.6
Ganancia (dB)	10	11.7
Ancho del Haz de media potencia (deg) Plano H	60	51.6
Ancho del Haz de media potencia (deg) Plano E	40	37.2
Relación Frontal a Trasero (dB)	30	29.2
Frecuencia de Prueba (MHz)	450	450

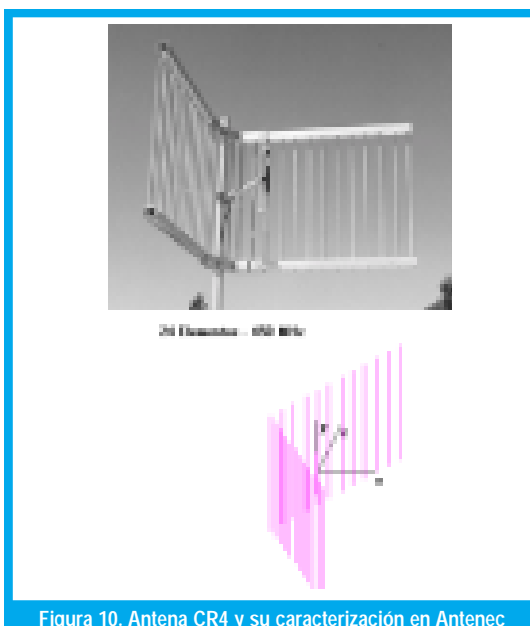


Figura 10. Antena CR4 y su caracterización en Antenec

## X. CONCLUSIONES

Antenec representa una muy valiosa herramienta en el modelamiento y análisis de arreglos de antenas, sin importar su geometría espacial. Facilita el diseño, puede simularse en condiciones ideales los patrones de radiación que se obtendrían de un montaje real antes de realizarlo de manera física. Construye una importante aplicación de los Códigos Electromagnéticos Numéricos (NEC) en el desarrollo de software de simulación versátil, práctico y funcional.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. J. Burke, A. J. Poggio, "Numerical Electromagnetics Code (NEC)," NOSC TD 116. Enero 1981.
- [2] A. J. Julian, J. C. Logan, J. W. Rockway, "MININEC: A Mini-Numerical Electromagnetics Code," NOSC TD 516, Septiembre 1984.
- [3] R. F. Harrington, "Field Computation by Moment Methods," MacMillan Company, New York, 1968.
- [4] H. H. Chao, B. J. Strait, "Computer Programs for Radiation and Scattering by Arbitrary Configurations of bent Wires" Scientific report No 7, September 1970.
- [5] D. R. Wilton, "Wire Problems," Lecture Notes for short Course on Computational Methods in Electromagnetics. 1981.
- [6] J. D. Krauss, "Electromagnetics", ed- 4, McGraw Hill, 1992.
- [7] R. W. King, "The Theory of Linear Antennas," Harvard University Press, Cambridge, MA, 1956..
- [8] A. Ralston, "A First Course in Numerical Analysis," McGraw Hill 1992.
- [9] Kemerly, Hayt, "Introducción al análisis de circuitos," McGraw Hill 1994.
- [10] C. T. Johnk, "Teoría Electromagnética, Campos y Ondas," Limusa editores, 1996.
- [11] J. Solano, "Antenec Manual del usuario," 2002.
- [12] J. Solano, "Radiales FM + Antenec Sistema de diseño y simulación automatizado de estaciones de FM," 2002.
- [13] RF Industries Pty, www.rfindustries.com.au

## AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Guillermo Escobar por impulsarme a desarrollar este software, y al Ingeniero José Felix Vega por su valioso apoyo en la redacción de este artículo.

### Julián Ricardo Solano

Ingeniero de Telecomunicaciones Universidad Santo Tomás. Bogotá 2003. Programador de computadores y diseñador de Software, trabaja en el proyecto Antenec desde Marzo de 2002.  
julianricardo@rocketmail.com

### José Ignacio Castañeda Fandiño

Ingeniero Electrónico Universidad Distrital F. J. de C, Especialista en Telecomunicaciones Móviles. Docente de la Especialización en Telecomunicaciones Móviles Universidad Distrital F. J. de C.  
jicnacio@udistrital.edu.co