

Apuntes sobre simulación de antenas con NEC-2

Ismael Pellejero Ibáñez (EA4FSI)

www.ipellejero.es

ismael.pellejero@gmail.com



Resumen: En este artículo se resumen algunos consejos útiles para la simulación eficiente de antenas con programas basados en el algoritmo NEC-2, desarrollado por el *Lawrence Livermore Laboratory*. Los consejos y reglas de diseño han sido recopilados tanto de los manuales de algunos de los programas como de artículos técnicos sobre simulación de antenas. Se ofrecen además algunas pautas para la simulación de antenas multibanda y de banda ancha.

1. Introducción

En estos apuntes se recopilan una serie de consejos y reglas de diseño para realizar simulaciones de antenas con programas basados en el algoritmo NEC-2. Los apuntes no están orientados a ser una guía para trabajar con los diferentes programas que usan este algoritmo, sino que sólo pretenden ser una referencia para usuarios ya iniciados en su manejo. Los consejos y reglas de diseño han sido recopilados tanto de los manuales de algunos de los programas como de artículos técnicos sobre simulación de antenas, con las referencias mostradas en el apartado 8.

El incumplimiento de las reglas de diseño inherentes al algoritmo NEC-2 puede tener serias repercusiones en los resultados de las simulaciones. Por ejemplo y de forma muy común, los resultados de las impedancias de antena calculados serán erróneos y los diagramas de radiación irreales.

El algoritmo NEC-2 fue desarrollado en 1981 en Estados Unidos por el *Lawrence Livermore National Laboratory*, con el patrocinio del *Naval Ocean Systems Center* y el *Air Force Weapons Laboratory* [Ref.1] y está basado en el método de los momentos [Ref.2].

Tenga en cuenta que algunas de las reglas no son de aplicación para versiones posteriores del algoritmo (NEC-3 y NEC-4), más avanzadas y cuyo código no es público. Por otro lado, tenga también en consideración que no todos los programas de simulación más conocidos de entre los disponibles de forma gratuita están basados en este algoritmo. Por ejemplo, 4Nec2 y EZNEC están basados en NEC-2, pero otros como MMANA-GAL están basados en variantes de MININEC [Ref.9].

Se utilizará la siguiente terminología (ver figura 1):

- **Modelo:** conjunto de simulación formado por todos los elementos radiantes de la antena (incluyendo posibles cargas), el generador y el tipo de tierra.
- **Hilo (wire):** cada uno de los conductores rectilíneos que forman parte de un modelo de antena en los programas basados en NEC-2. Para definir un hilo de longitud L_h en NEC-2, se especifican las coordenadas de los dos puntos que delimitan sus extremos, el material conductor empleado, el diámetro del hilo D_h y el número de segmentos que compondrán el hilo. Denominaremos Z_s a la altura de un hilo sobre el suelo. En caso de no ser paralelo al mismo, se considerará la altura de su extremo más cercano al suelo. Llamaremos N_s al número de segmentos que componen un hilo.
- **Segmento (segment):** cada una de las divisiones rectifi-

neas que forman cada hilo en una antena modelada con los programas basados en NEC-2 y que el algoritmo utiliza para los cálculos de corriente mediante pulsos. Los segmentos tendrán una longitud L_s , que puede ser especificada por el usuario o calculada automáticamente por algunos de los programas, proceso que se denomina autosegmentación. El método de los momentos en el que se basa NEC-2 calcula las interacciones entre segmentos.

- **Densidad de segmentos (segment density):** número de segmentos por longitud de onda de trabajo que contiene un hilo. Nótese que en el caso de antenas multibanda o de banda ancha, la densidad de segmentos será diferente para cada frecuencia de trabajo.
- **Longitud de onda (λ):** longitud de onda correspondiente a la frecuencia de trabajo con la que se realiza una simulación concreta con un programa basado en NEC-2.
- **Zona crítica:** parte de un modelo que presenta unas características geométricas que requieren diseños especiales para que los resultados de la simulación con NEC-2 sean correctos. (Figura 1)

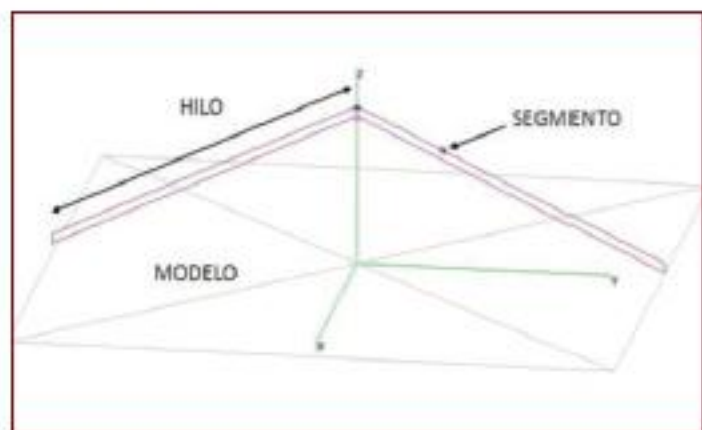


Figura 1. Terminología usada en NEC-2. Modelo de antena dipolo plegado con carga resistiva

2. Sistemas de coordenadas.

La comprensión del sistema de coordenadas empleado por un programa de simulación es fundamental tanto para el diseño de los modelos como para la evaluación de los resultados de las simulaciones. Los sistemas de coordenadas pueden diferir entre las distintas aplicaciones basadas en NEC-2. En la figura 2 se muestra el sistema de coordenadas usado por el programa 4Nec2. (Figura 2)

El suelo o tierra se simula en el plano XY, correspondiendo el eje Z a la elevación sobre la misma.

Se definen los siguientes ángulos:

- **Theta:** ángulo medido entre el semieje Z positivo y el plano de tierra XY. El plano de tierra puede definirse por tanto como $\text{Theta}=90^\circ$.
- **Phi:** ángulo medido entre el semieje X positivo y el plano YZ.
- **Elevación:** ángulo medido entre el plano de tierra XY y el semieje Z positivo. Una elevación de 90° se corresponde a la perpendicular al plano de tierra.
- **Acimut:** ángulo medido en planos paralelos al plano de tierra XY. Los ángulos de acimut se miden en el sentido horario marcado desde el eje Y hacia el eje X, correspondiendo 0° al propio eje Y.

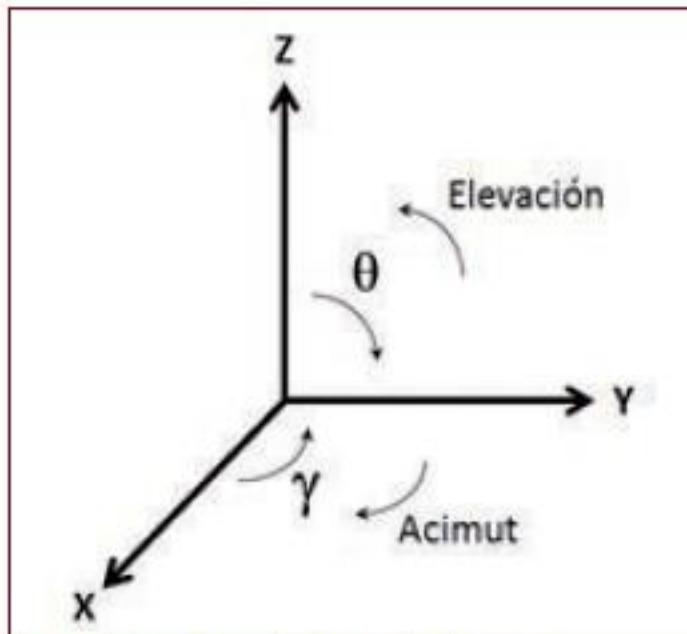


Figura 2. Sistema de coordenadas empleado en 4Nec2

2.1. Convenciones para la representación de modelos

Para posibilitar la comparación entre los diagramas de radiación de diferentes antenas de una forma sencilla, conviene que todos los modelos se representen geoméricamente de acuerdo a unas convenciones generales. En este apartado se muestra un ejemplo de convenciones obtenido de [Ref.5]:

- Si existe tierra, se ubicará en el plano XY.
- El eje Z representará la altura de la antena sobre el plano de tierra XY.
- Todos los elementos lineales de la antena se representarán en el eje Y o en ejes paralelos al mismo.
- Se usará el eje X para la dirección frente/espalda (*front-to-back*). Para elementos aislados, se establecerá $X=0$.
- Si el modelo presenta simetría, siempre que sea posible se utilizarán los ejes de coordenadas como ejes de simetría.

3. Geometría de los modelos

Antes de definir la estructura de un modelo en NEC-2, es necesario considerar de qué forma se definen los flujos de corriente en cada programa de simulación. Por ejemplo, en 4Nec2 la corriente positiva siempre fluye del extremo 1 al extremo 2 de cada hilo.

Por otro lado, es necesario respetar las reglas geométricas que se exponen en los siguientes apartados.

3.1. Reglas generales

Resulta de interés aplicar las siguientes reglas generales en el diseño de los modelos:

- Dos hilos no pueden cruzarse en los puntos intermedios de cualquiera de sus segmentos [Ref.5].
- En un modelo con varios hilos, es recomendable no conectar segmentos cortos con segmentos largos [Ref.4]. Algunos programas pueden imponer condiciones al respecto, como en el caso de 4Nec2, en el que se especifica que para dos segmentos conectados "i" y "j" ha de cumplirse: $L_{si} \leq 5 \times L_{sj}$ [Ref.7].
- En una unión entre dos segmentos, el ángulo formado entre los mismos, las longitudes de los segmentos y su diámetro han de ser tales que el tramo (1/3) central de ambos segmentos no se solape [Ref.4,8].
- Dos hilos paralelos o casi paralelos que estén muy cer-

ca el uno del otro, deberán tener sus segmentos alineados [Ref.3,4] y tener el mismo tipo de segmentación [Ref.7]. Además, se recomienda que la distancia entre los mismos sea de al menos varios diámetros de hilo [Ref.8].

- Si dos hilos de diferente diámetro están próximos, aunque sus segmentos estén alineados, pueden producirse errores en el cálculo de la ganancia y de la impedancia de entrada de la antena, especialmente en la parte de la reactancia [Ref.5,11]. En modelos de estas características conviene realizar el test AGT (ver apartado 7.2) para comprobar su validez.
- Si dos hilos de diferente diámetro se unen en un punto, los resultados de la simulación no serán precisos [Ref.5]. El problema puede reducirse haciendo que el diámetro cambie escaladamente a través de varios hilos adicionales intermedios [Ref.3].
- NEC-2 permite la unión de hasta unos 30 hilos equiespaciados angularmente en un mismo punto [Ref.3], por ejemplo para simular un plano de radiales. No conviene usar un número superior porque el ángulo entre hilos sería demasiado pequeño y los resultados de NEC-2 perderían precisión [Ref.5].

3.2. Longitud de los segmentos

Para mejorar los resultados de las simulaciones y salvo en zonas críticas de los modelos, es recomendable que todos los segmentos de un modelo tengan la misma longitud [Ref.4,5].

Respecto a la longitud mínima de los segmentos ($L_{smín}$), en las distintas referencias disponibles se citan las siguientes restricciones relacionadas con el diámetro del hilo y con la longitud de onda de trabajo:

- [Ref.8]: $L_{smín} > Dh$
- [Ref.4]: $L_{smín} > 2 \times Dh$
- [Ref.5]: $L_{smín} > 4 \times Dh$
- [Ref.7,10]: $L_{smín} > (\lambda / 10000)$

En relación a la longitud máxima de los segmentos ($L_{smáx}$), se especifican las siguientes restricciones relacionadas con la longitud de onda de trabajo:

- [Ref.4,7]: $L_{smáx} < (\lambda / 20)$ debe cumplirse al menos en las zonas críticas.
- [Ref.7,10]: $L_{smáx} < (\lambda / 10)$ será suficiente en la mayoría de los casos, pudiendo usarse incluso $L_{smáx} < (\lambda / 5)$ para segmentos integrados en hilos de gran longitud sin zonas críticas.

3.3. Radio de los hilos

El radio de los hilos vendrá determinado por $(Dh/2)$. Algunos programas pueden imponer restricciones para el radio mínimo y máximo de los hilos, en función de la longitud de los segmentos. Por ejemplo:

- [Ref.7]: en 4Nec2, ha de cumplirse la relación $(Dh/2) < (Ls/10)$.

3.4. Densidad de segmentos

Normalmente, cuanto mayor sea la densidad de segmentos, mejores resultados se obtendrán en las simulaciones, con el coste de un mayor tiempo de computación. No obstante, si un modelo ya es lo suficientemente preciso, un aumento en la densidad de segmentos no supondrá ninguna mejora.

Por otro lado, es necesario considerar que si el número total de segmentos de un modelo es muy elevado, puede

llegar a superarse el límite máximo que imponen algunos programas [Ref.9].

Un hilo ha de tener al menos 8-10 segmentos por cada semilongitud de onda [Ref.5,8]. Si no se respeta esta regla, los resultados no serán precisos, especialmente los del cálculo de la impedancia de entrada de la antena. Si un hilo tiene un cuarto de longitud de onda, 5 segmentos es un buen mínimo [Ref.5].

Para el caso de antenas multibanda o de banda ancha, la densidad de segmentos será distinta para cada frecuencia. Por tanto, el número de segmentos empleado ha de variarse con la frecuencia, o bien determinarse de forma que esté por encima del mínimo recomendado para la frecuencia de trabajo más alta (longitud de onda menor) [Ref.8].

Para determinar la densidad óptima de segmentos, puede realizarse un test de convergencia (ver apartado 7.1).

4. Tipos de suelo y altura de los hilos

A continuación se muestran las características de los distintos tipos de tierra disponibles en los programas más comunes que implementan el algoritmo NEC-2. Para cada caso, se especifica si los hilos pueden tocar tierra o no y en caso negativo a qué altura mínima sobre el suelo han de emplazarse.

En cualquiera de los casos diferentes del espacio libre ha de contarse además con el diámetro de los hilos: la altura mínima de un hilo horizontal sobre el suelo debe ser de al menos dos veces el diámetro de dicho hilo:

- [Ref.4]: $Z_s > 2 \times D_h$

4.1. Espacio libre

En las simulaciones en espacio libre (*free space*), lógicamente, no hay suelo. Normalmente, los resultados serán similares a los que suelen ofrecerse en los libros de texto.

4.2. Tierra perfecta

La tierra perfecta (*perfect ground*) consiste en un plano de tierra conductor eléctrico perfecto, sin pérdidas. Es una buena opción para realizar simulaciones suprimiendo las pérdidas del terreno, que permitan evaluarlas comparando con simulaciones posteriores sobre tierra real.

Los hilos del modelo pueden estar en contacto con la tierra perfecta.

4.3. Tierra rápida

Con la tierra rápida (*fast ground*), NEC-2 utiliza un método basado en coeficientes de reflexión complejos.

Los hilos del modelo no pueden estar en contacto con la tierra rápida.

En el caso de los hilos horizontales, se debe respetar además una altura sobre el suelo de al menos la décima parte de la longitud de onda de trabajo:

- [Ref.4,8]: $Z_s > (\lambda / 10)$ para hilos horizontales.

4.4. Tierra MININEC

El modelo de tierra MININEC asume tierra perfecta para el cálculo de corrientes y cambia a tierra dieléctrica para el cálculo de diagramas de campo lejano (tierra sin pérdidas). Se utilizan cálculos híbridos de compromiso, diseñados para la primera generación de PCs poco potentes.

Los hilos verticales pueden estar en contacto con la tierra MININEC.

Los hilos horizontales no pueden tocar tierra. Han de

estar a una altura sobre el suelo de al menos la quinta parte de la longitud de onda de trabajo:

- [Ref.4,8]: $Z_s > (\lambda / 5)$ para hilos horizontales.

Si no se cumple esta regla, las simulaciones con NEC-2 pueden ofrecer como resultado impedancias erróneas y ganancias anormalmente altas, especialmente para polarización horizontal.

4.5. Tierra Sommerfeld-Norton (S-N)

Se trata del modelo de tierra más preciso y con mayor coste computacional, siendo el mejor método para simular hilos horizontales a escasa altura sobre el suelo.

Los hilos, ya sean verticales u horizontales, no pueden tocar tierra.

Una forma de simular una conexión a tierra de un hilo vertical es mediante un plano ficticio de al menos ocho radiales [Ref.7], teniendo en cuenta que se modificarán las características de conductividad eléctrica del terreno simulado y que por tanto los resultados pueden ser inexactos.

En las referencias consultadas se han encontrado las siguientes reglas respecto a la altura de los hilos horizontales:

- [Ref.4]: $Z_s > (\lambda / 200)$
- [Ref.5,8]: $Z_s > (\lambda / 1000)$

5. Generadores, cargas y líneas de transmisión

En este apartado se muestran consejos y reglas de diseño sobre el uso y características de los generadores, las cargas y las líneas de transmisión a emplear en las simulaciones.

Las cargas y las líneas de transmisión usadas en NEC-2 son modelos matemáticos, no modelos físicos. Por tanto, no contribuyen a la radiación de la antena [Ref.5,8]. Si se considera que la línea de transmisión puede tener influencia en la radiación de la antena real que se está simulando, puede tratarse de modelarse en algunos casos concretos, como el de la línea paralela.

Por regla general, un generador de voltaje complejo de valor $1 + j0$ será adecuado para la mayoría de las simulaciones [Ref.4,5]. En la simulación de *arrays* puede ser necesario utilizar varios generadores desfasados entre sí.

Tenga en cuenta que no se permite el uso de generadores o cargas en extremos de hilos en circuito abierto [Ref.7,11]. El generador vería carga en uno de sus extremos y circuito abierto en el otro, por lo que teóricamente no se generaría corriente en ninguno de los sentidos. En la simulación, la impedancia de entrada de la antena sería incorrecta, alcanzando valores excesivamente altos (especialmente en la parte reactiva) y se generaría un nivel de corriente demasiado bajo, a través del acoplamiento mutuo entre la parte del generador conectada a la antena y el trozo de segmento conectado al otro lado del generador y que queda en circuito abierto.

Si el generador va a estar ubicado en el centro de un hilo, se recomienda modelar dicho hilo con un número de segmentos impar [Ref.5], de forma que exista simetría en la distribución de corriente en el hilo.

Si un generador ha de ubicarse en el vértice de unión entre dos hilos que forman un ángulo distinto de 180° , como es el caso de las antenas en V invertida, pueden usarse varias técnicas [Ref.3,5,6,8,10]. Ver figura 3:

- Fuente desfasada del centro (*off-center*): la opción menos

precisa consiste en ubicar un único generador en uno de los hilos. La distribución de corriente puede ser asimétrica y los valores de impedancia de entrada de la antena pueden ser inexactos. La precisión puede mejorarse mediante la técnica de "segment tapering", dividiendo cada hilo en varios hilos concatenados y haciendo que los más próximos al generador tengan segmentos de menor longitud, de forma que el generador se vaya aproximando al vértice.

- **Fuente dual (split-feed / dual source):** consiste en utilizar dos generadores (uno en cada segmento extremo de los hilos que se unen) de la mitad del voltaje que se usaría con un generador único. Interesa configurar una densidad de segmentos alta para que los generadores se acerquen lo máximo posible al vértice de unión entre los hilos.

- **Fuente centrada con 3 hilos (3-wire, center source):** finalmente, la opción más precisa consiste en unir ambos hilos por un pequeño hilo adicional de tres segmentos, emplazando el generador en el segmento central. Es la técnica más precisa desde el punto de vista de la simulación de la impedancia de las antenas, siempre y cuando la longitud de los tres segmentos del hilo adicional sea similar a la longitud de los segmentos de los dos hilos principales. (Figura 3)

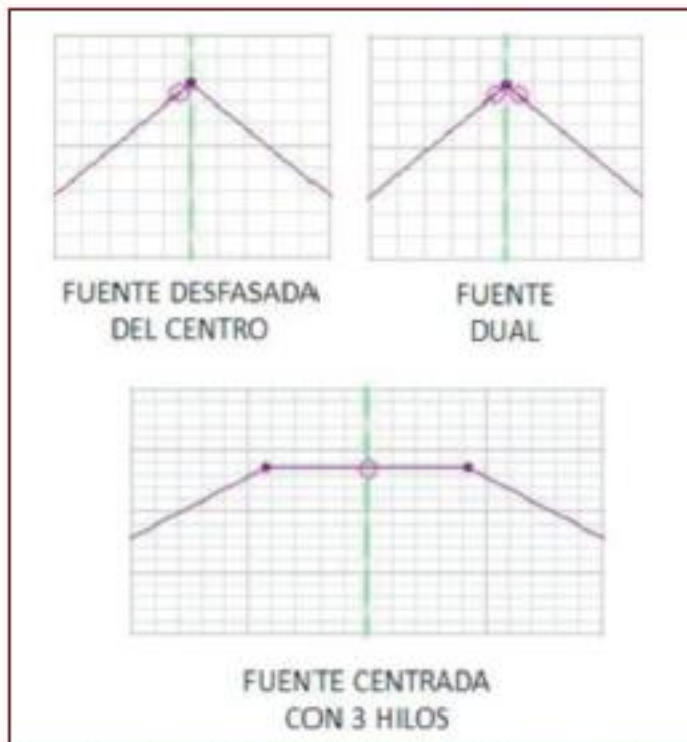


Figura 3. Emplazamiento del generador en el vértice de unión de dos hilos

6. Otras consideraciones

En este apartado se muestran otros consejos y reglas de diseño no relacionados con los apartados anteriores:

- El método de los momentos [Ref.2] es adecuado para la simulación de antenas con hilos conductores estrechos. La simulación de conductores gruesos puede ser problemática, especialmente en las bandas de VHF/UHF [Ref.8].

- NEC-2 no tiene capacidad para modelar dieléctricos, como radiales enterrados o antenas con hilos aislados eléctricamente (*twin-lead / pole, twin-lead folded dipole*) [Ref.4].

- Tenga en cuenta que NEC-2 computa la corriente total en la antena, sin diferenciar entre corrientes en modo común y corrientes en modo diferencial [Ref.4].

- En todos los diagramas de radiación calculados con NEC-2, la ganancia viene expresada en dBi.

- NEC-2 no permite modelar hilos subterráneos [Ref.5,11].

- NEC-2 no es adecuado para el modelado de antenas de lazo (*loop*) de tamaño pequeño (perímetro inferior a 0.05 λ), ya que en las simulaciones la impedancia de entrada de la antena resultaría nula o negativa [Ref.11].

7. Verificación de modelos

Una vez definido el modelo, algunos programas que implementan el algoritmo NEC-2 disponen de opciones de validación geométrica, para comprobar si existen hilos inconexos o cruces incorrectos, así como opciones de validación de segmentos, que verifican si se cumplen las reglas expuestas en los apartados anteriores. Conviene realizar ambas validaciones antes de pasar los tests de convergencia y de ganancia media.

En el caso de antenas de banda ancha o antenas multibanda que operan entre una frecuencia mínima $F_{mín}$ y una frecuencia máxima $F_{máx}$, propongo la siguiente estrategia de diseño, apoyada por ejemplo en una hoja de cálculo:

- Una vez definida la geometría de la antena, numerar los hilos, identificando además su diámetro $Dh(i)$ y su longitud $Lh(i)$. Para cada uno de los hilos "i", realizar las tareas que se exponen a continuación.

- Para $F_{mín}$, calcular las longitudes $L_{smín}(F_{mín})$ y $L_{smáx}(F_{mín})$ para los segmentos de ese hilo (ver apartado 3.2), considerando además si el hilo estará en una zona crítica o no.

- Para $F_{máx}$, calcular las longitudes $L_{smín}(F_{máx})$ y $L_{smáx}(F_{máx})$ para los segmentos de ese hilo (ver apartado 3.2), considerando además si el hilo estará en una zona crítica o no.

- Para $F_{mín}$, determinar el número mínimo de segmentos $N_{mín}(F_{mín})$, considerando tanto el criterio de número de segmentos por semilongitud de onda como el cálculo $Lh(i) / L_{smáx}(F_{mín})$.

- Para $F_{mín}$, determinar el número máximo de segmentos $N_{máx}(F_{mín})$, calculando $Lh(i) / L_{smín}(F_{mín})$.

- Para $F_{máx}$, determinar el número mínimo de segmentos $N_{mín}(F_{máx})$, considerando tanto el criterio de número de segmentos por semilongitud de onda como el cálculo $Lh(i) / L_{smáx}(F_{máx})$.

- Para $F_{máx}$, determinar el número máximo de segmentos $N_{máx}(F_{máx})$, calculando $Lh(i) / L_{smín}(F_{máx})$.

- El número de segmentos permitido para el hilo "i", $Ns(i)$, estará comprendido en el rango $[N_{mín}(F_{máx}), N_{máx}(F_{mín})]$. Obtenga el valor óptimo final a través del test de convergencia que se muestra en el siguiente apartado.

Para comprobar la validez de un modelo, se recomienda pasar tanto el test de convergencia como el test de ganancia media. El cumplimiento de uno sólo de los tests no asegura que el modelo sea adecuado [Ref.8].

7.1. Test de convergencia

El test de convergencia permite determinar el número óptimo de segmentos a utilizar en un modelo.

Consiste en realizar varias simulaciones de un mismo modelo, incrementando en cada simulación el número de segmentos en un 50% (menor porcentaje si no se consigue respetar las reglas geométricas) y anotando en cada caso la ganancia máxima y la impedancia de entrada de la antena. El nivel de segmentación óptimo vendrá dado por el límite en el que ya no se observan cambios significativos en ambos parámetros [Ref.5,8]. No tendrá sentido usar un número de segmentos mayor que el obtenido, ya que los resultados

no mejorarán y se empleará mayor tiempo de computación.

Para cada configuración de número de segmentos que vaya a simular, antes de realizar el test de convergencia efectúe una validación de segmentos con el programa de simulación.

En el caso de antenas de banda ancha o antenas multibanda, realice el test de convergencia solamente con configuraciones de número de segmentos por hilo que estén dentro de los límites calculados en el apartado anterior. No tiene sentido probar otras configuraciones porque se incurriría en errores geométricos. Antes de efectuar el test de convergencia con cada posible configuración de número de segmentos, realice una validación de segmentos en las frecuencias mínima y máxima de la banda de trabajo de la antena, como doble precaución para evitar el incumplimiento de reglas geométricas. El test de convergencia deberá repetirse en un conjunto de frecuencias lo suficientemente representativo de toda la banda de trabajo de la antena. En base a los resultados de los tests, es posible que en las simulaciones sea necesario usar distintas configuraciones de número de segmentos para cada frecuencia de trabajo de la antena.

7.2. Test de ganancia media (AGT)

El test de ganancia media o AGT (*Average Gain Test*) es una herramienta útil para comprobar la validez de un modelo y está disponible en la práctica totalidad de programas que implementan NEC-2. Ver figura 4.

El test consiste en emplazar el modelo sin cargas ni líneas de transmisión en el espacio libre (antenas horizontales) o sobre tierra perfecta (antenas verticales) y simular el diagrama de radiación en 3D.

En teoría, la ganancia media de una antena sin pérdidas, considerando un muestreo adecuado de todas las direcciones de radiación posibles, ha de ser igual a 1. Es decir, la antena ha de radiar toda la potencia suministrada por el generador [Ref.5,8]. Si no se cumple esta regla, probablemente el modelo tenga defectos en las especificaciones del generador o en su ubicación.

Los resultados del test AGT han de interpretarse de la siguiente forma [Ref.7]:

- $AGT < 0.80$: el modelo es cuestionable y debe refinarse.
- $0.80 \leq AGT < 0.90$: el modelo puede ser útil pero podría mejorarse.
- $0.90 \leq AGT < 0.95$: el modelo puede usarse para casi todos los propósitos.
- $0.95 \leq AGT < 1.05$: modelo muy preciso.
- $1.05 \leq AGT < 1.10$: el modelo puede usarse para casi todos los propósitos.
- $1.10 \leq AGT \leq 1.20$: el modelo puede ser útil pero podría mejorarse.
- $AGT > 1.20$: el modelo es cuestionable y debe refinarse.

En el caso de antenas de banda ancha o antenas multibanda, repita el test de convergencia en un conjunto de frecuencias lo suficientemente representativo de toda la banda de trabajo de la antena. (Figura 4)

8. Referencias

1. J.G. BURKE, A.J. POGGIO et al. *Numerical Electromagnetics Code (NEC) - Method of Moments. Part II: Program Description - Code*. Lawrence Livermore Laboratory. Enero 1981. <http://nec2.org/other/nec2prt1.pdf>.
2. R.P. HAVILAND, W4MB. *Programs for Antenna Analysis by the Method of Moments*. ARRL Antenna Compendium Vol.4. ARRL, 1995.
3. J.G. BURKE, A.J. POGGIO et al. *Numerical Electromagnetics*

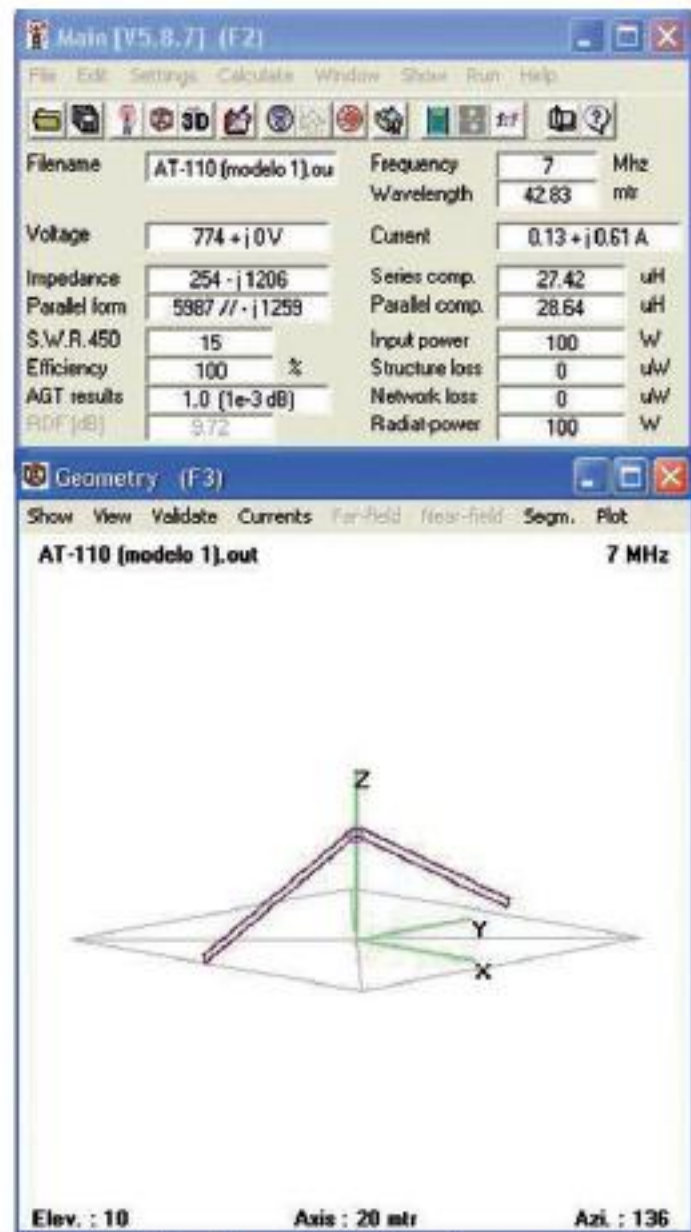


Figura 4. Resultados del test de ganancia media en un modelo de 4Nec2

tics Code (NEC) - Method of Moments. Part II: User's Guide. Lawrence Livermore Laboratory. Enero 1981. <http://nec2.org/other/nec2prt3.pdf>.

4. S. STEARNS, K6OIK (Northrop Grumman Electromagnetic Systems Laboratory). *Antenna Modeling for Radio Amateurs*. ARRL Pacificon Antenna Seminar, San Ramon, CA. Octubre 2008. <http://www.fars.k6ya.org/docs/k6oik>.

5. L.B. CEBIK, W4RNL. *A Beginner's Guide to Modeling with NEC*. QST, Noviembre 2000 a Febrero 2001. American Radio Relay League. <http://home.ict.nl/~arivoors/supfiles.htm>.

6. L.B. CEBIK, W4RNL. *Dipoles: Variety and Modeling Hazards. Linear, V and Folded Dipoles in NEC*. *Antennex Monthly Columns - Antenna Modeling 207*. <http://guests.antennex.com/rooms/w4rnl/col0207/amod108.html>.

7. A. VOORS. *4Nec2 General Help*. <http://home.ict.nl/~arivoors/>.

8. Varios autores. *Antenna Modeling & System Planning*. The ARRL Antenna Book. 2nd edition. Newington:ARRL, 2010. p.4-1/4-18.

9. R. LEWALLEN, W7EL. *MININEC: The Other Edge of the Sword*. QST, Febrero 1991. American Radio Relay League.

10. L.B. CEBIK, W4RNL. *V Arrays and Beams*. Long Wire Notes. AntenneX Online Magazine, 2006.

11. R. LEWALLEN, W7EL. *EZNEC v.5.0 User Manual*. http://eznec.com/misc/EZNEC_Printable_Manual/5.0/EZW50_User_Manual_A4.pdf. ●