

# PROGRAMA PARA ANALIZAR EL TRANSITORIO DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA DESDE UNA FUENTE A UNA CARGA POR UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

José Luis Gómez Tornero

Fernando Quesada Pereira

Alejandro Alvarez Melcón

Departamento de Tecnologías de la Información y las Telecomunicaciones

Universidad Politécnica de Cartagena

[josel.gomez@upct.es](mailto:josel.gomez@upct.es)

[ferquepe@doctor.upc.es](mailto:ferquepe@doctor.upc.es)

[Alejandro.alvarez@upct.es](mailto:Alejandro.alvarez@upct.es)

## ABSTRACT

This contribution presents a software which has been developed to make more visual and comprehensive the study of the electromagnetic propagation of RF waves in a transmission line. The propagation of voltage, current and power waves from a source system to a load, using a transmission line, is one of the most basics aspects that any student of electrical engineering must understand, and one of the most common scenarios presented in actual work with RF systems. The theory studied in subjects related with microwaves and transmission lines must give the student a basic approach to the phenomena involved, and concepts like Maximum Power Transfer and Mismatch must be understood. In the stationary frequency domain this concepts are usually clear, but the student may often feel a gap when trying to understand what happens in the time domain. The software presented will help the student in the understanding of the transient process of electromagnetic power in such situations.

## 1. INTRODUCCIÓN

En cualquier sistema de comunicaciones por radiofrecuencia existe una fuente que emite una señal y una carga que recibe esa señal. Para que la energía electromagnética que transporta la señal llegue desde la fuente a la carga se suele usar un medio de transmisión guiado. Si este medio de transmisión mantiene una sección transversal constante en todo su recorrido, y la energía se propaga en forma de un único modo dominante TEM, se dice que es una línea de transmisión. El análisis de las ecuaciones de Maxwell predice como solución la formación de una onda progresiva y una regresiva. Si este estudio se hace en el dominio de la frecuencia, se observa que la solución nos lleva a dos ondas armónicas que se suman a lo largo de la línea, formando una onda estacionaria. La formación de la onda progresiva inicial, y de las sucesivas reflexiones que dan lugar a las ondas finales totales, da lugar a una transferencia de potencia neta desde la fuente a la carga, así como a un patrón o distribución de voltaje, corriente y potencia a lo largo de la línea. El estudio de la onda resultante, así como del uso final que se hace de la energía entregada por la fuente es importante para conocer la onda final y la eficiencia del sistema. Pero a menudo no queda claro cómo se ha llegado a ese régimen estacionario, y un estudio del transitorio permite entender cómo se ha formado la onda final a partir de la suma de muchas ondas parciales.

En esta contribución presentamos un programa diseñado para que el alumno pueda analizar diversas situaciones prácticas, mostrando los fenómenos de transitorios que se producen y cómo influyen en el sistema de comunicaciones.

## 2. EL MODELO DEL SISTEMA

En la figura 1 se muestra el modelo usado para representar el sistema formado por una fuente de microondas, una línea de

transmisión y una carga. El programa divide la simulación en diferentes pasos, correspondiendo el inicio y fin de cada paso a la aparición de una nueva onda parcial (que contribuye a la onda total) al incidir cualquiera de las ondas presentes con una discontinuidad. Las dos posibles discontinuidades que existen en el sistema son la unión fuente-línea y la de la línea con la carga. Cuando el programa realiza la simulación de la propagación y formación de ondas, para cada paso muestra una animación en la que visualmente se aprecian dichos fenómenos. Al finalizar cada paso, el usuario puede continuar con el siguiente paso, observando las nuevas ondas que se generan, repetir el último paso o reinicializar la simulación.

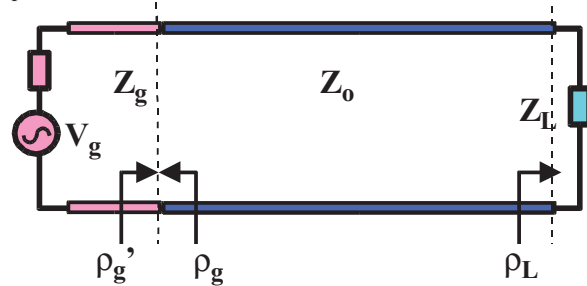


Figura 1. Modelo del sistema fuente + línea + carga.

## 3. EL PROGRAMA

El programa presenta la interfaz mostrada en la figura 2. En la parte de arriba el usuario debe introducir los parámetros eléctricos y físicos de los tres subsistemas que forman el sistema: generador, línea de transmisión y carga. Una vez introducidos dichos parámetros del modelo, el usuario debe introducir los parámetros de la simulación, que son la resolución espacial (y temporal) y el tiempo de pausa entre cada imagen de la animación en la que se representa el transitorio de formación de las diferentes ondas generadas en el transcurso del tiempo.

De entre las diferentes facilidades que da el programa al usuario están las siguientes:

- Capacidad de escoger entre visualización de ondas de tensión, corriente y/o potencia.
- Posibilidad de ver, además de la onda total que resulta de la suma de todas las ondas creadas hasta ese momento, las ondas nuevas que se crean en cada discontinuidad (reflejadas y transmitidas).
- Carta de Smith para ubicar los coeficientes de reflexión que ve la línea hacia la fuente ( $\rho_g$ ) y hacia la carga ( $\rho_L$ ).
- Markers para medir las amplitudes y desfases de las diferentes ondas que se forman en cualquier punto de la línea de transmisión.
- Sonda de alta impedancia que se puede colocar en cualquier punto de la línea y permite visualizar la

evolución temporal de la tensión, corriente y/o potencia como lo haría un osciloscopio.

- Diferentes velocidades de animación, así como la opción de animar fotograma a fotograma pulsando una tecla.

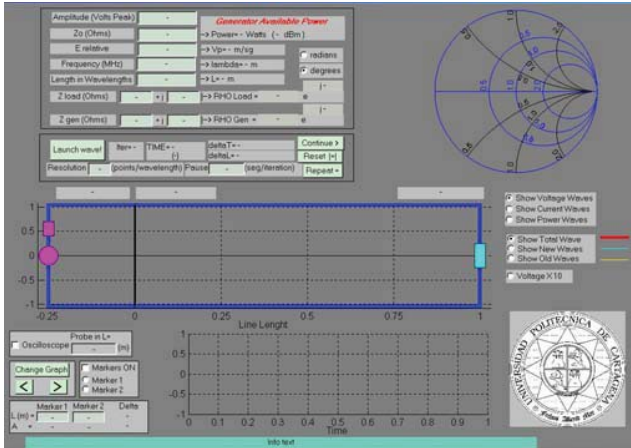


Figura 2. Interfaz gráfica del programa de simulación.

#### 4.EJEMPLO: ADAPTADOR EN $\lambda/4$

Presentamos ahora un ejemplo ilustrativo y que da una idea de la utilidad del programa. Se trata de simular una red de adaptación de impedancias mediante una línea de transmisión en  $\lambda/4$ . Usando las expresiones conocidas para las impedancias de entrada de dicho transformador se puede conseguir, por ejemplo, adaptar una impedancia de carga de  $Z_L=3000\Omega$  a una impedancia de generador de  $Z_{IN}=50\Omega$  usando una línea de  $Z_0=387,29\Omega$  y de longitud múltiplo impar de  $\lambda/4$ . Al simular el transitorio de adaptación de impedancias, se obtienen unos resultados como los que se presentan en las siguientes figuras.

En la figura 3 vemos la potencia instantánea que llega a la carga de  $3\text{ M}\Omega$  desde que el generador inyecta la energía de que dispone hasta 47 nanosegundos después. El generador usado está adaptado a  $50\Omega$ , y tiene una potencia media disponible (Available Power) de 250 mWattios. Esta potencia es la que es capaz de suministrar a una carga de  $50\Omega$ , pero en nuestro caso el generador ve, inicialmente, una desadaptación de impedancias de sus  $50\Omega$  respecto a los  $387\Omega$  de impedancia característica de la línea de transmisión. Será la suma de ondas de tensión y corriente reflejadas en la carga de  $3\text{ M}\Omega$ , y la longitud de la línea lo que provocará que al final el generador vea una impedancia de  $50\Omega$  a su salida, y se aproveche toda la potencia disponible en la carga, obteniéndose una señal de potencia media igual a 250mW. Esta será la potencia neta (media) que viaje por la línea desde la fuente a la carga, si bien la potencia instantánea tiene picos positivos (potencia progresiva) y negativos (potencia regresiva) que superan el Watio de pico, como se ve en la figura 4, donde se mide la potencia instantánea a 30 mm de la carga ( $\lambda/10$ ). Este proceso no es trivial ni intuitivo, por lo que el uso del programa puede ser indispensable para entender este fenómeno. Así mismo, en la figura 5 se representa en el conector de salida del generador, la evolución combinada de la onda de tensión y la de corriente, que dan lugar a la potencia instantánea de la figura 4 y a la evolución de la impedancia de entrada (transitorio de

adaptación de impedancias) resumida en la tabla de la figura 6. Se puede observar cómo conforme pasa el tiempo la impedancia de entrada tiende desde los  $387\Omega$  de la línea de transmisión a los  $50\Omega$  finales, disminuyendo la tensión (línea azul) y aumentando la corriente (línea amarilla), con lo que aumenta la transferencia de potencia (línea roja de la figura 3). Este proceso queda numéricamente reflejado en la tabla de la figura 7.

#### 5.CONCLUSIONES

El programa presentado ofrece al alumnos un medio muy visual para entender fenómenos tan importantes y básicos como los transitorios de la propagación de ondas eléctricas en líneas de transmisión, las reflexiones en discontinuidades, la desadaptación de impedancias o la transferencia de potencia entre una fuente y una carga. La validez de los resultados permite extender el programa para simular con la misma filosofía sistemas más complicados, como los osciladores en reflexión, de manera que se facilita el entendimiento del proceso transitorio de la formación de la señal armónica final (lo que es muy complejo al producirse fenómenos no lineales).

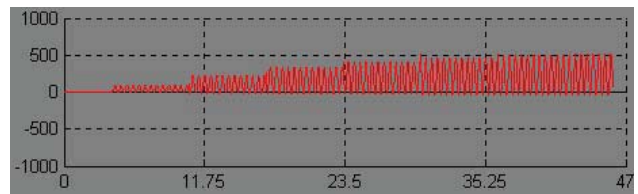


Figura 3. Evolución de la potencia instantánea en la carga.

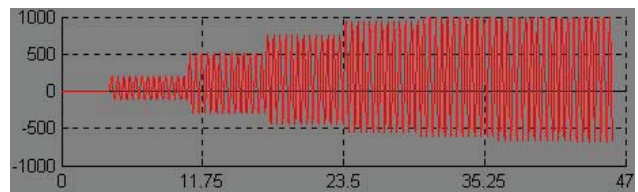


Figura 4. Potencia instantánea positiva y negativa en la línea.

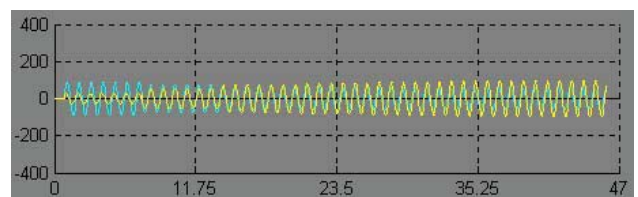


Figura 5. Ondas de tensión y corriente a la salida del generador.

Tiempo (nanosegs)	Vin PICO (Volts)	Iin PICO (mAmps)	Zin  (Ohmios)
0 - 7,25	8,809	26,380	334,2
7,25 - 13,70	7,378	53,893	136,9
13,70 - 20,15	6,707	72,352	92,7
20,15 - 26,60	6,327	83,334	75,9
26,60 - 33,05	6,100	89,867	67,8
33,05 - 39,50	5,965	93,754	63,6
39,50 - 45,95	5,885	96,067	61,2

Figura 6. Tabla con la evolución de la impedancia de entrada.