

PRÁCTICA SOBRE LA FORMACION DE ONDAS EN LINEAS DE TRANSMISION CON EXCITACIÓN SENOIDAL

D. Alejandro Álvarez Melcón

D. José Luis Gómez Tornero

INTRODUCCIÓN

En la siguiente práctica el alumno va a poder repasar, mediante un programa de simulación, la teoría de ondas en líneas de transmisión. Para ello debe haber leído, antes de llegar a la práctica, el manual del programa que va a utilizar, así como haber realizado los ejercicios teóricos que acompañan a cada apartado de la práctica.

Al final de la práctica, cada alumno deberá entregar al profesor de prácticas la **hoja de resultados**, en la que el alumno ha debido, por un lado, responder a las **cuestiones teóricas** antes de llegar a la práctica, y por otro lado debe completar las preguntas con los **resultados que obtenga en el laboratorio**. En las siguientes páginas se describe el guión de la práctica, formulando las diversas preguntas teóricas y prácticas. Todas las respuestas deben escribirse en la hoja de resultados.

Como se explicaba en la introducción del manual del programa que se va a usar, en esta práctica vamos a simular las ondas que se forman en un escenario como el que se presenta en la siguiente figura:

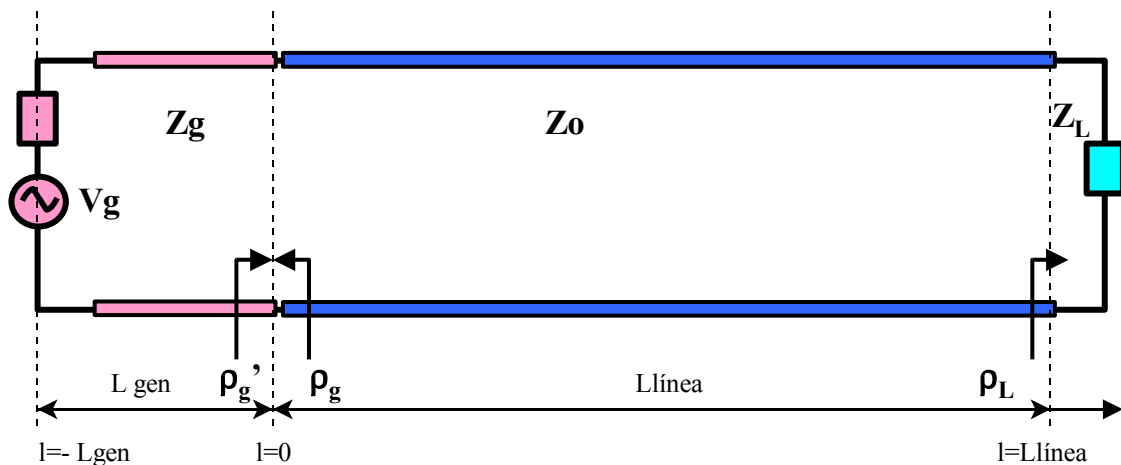


Fig 1.- Esquema del banco de test que se simula en el programa

Este escenario puede representar muchísimos entornos reales con los que se va a encontrar un ingeniero de radiofrecuencia. La generalidad de esta situación llega a cualquier sistema generador de una señal senoidal de radiofrecuencia o microondas (un oscilador, un amplificador, una antena receptora...) que desee transmitir dicha señal a otro sistema que hace de carga (una antena transmisora, un amplificador, un mezclador...) a través de una línea de transmisión de longitud $l = L_{línea}$.

En el transcurso de la práctica se irán exponiendo diferentes situaciones reales que el alumnos deberá simular con el programa, y comparar los resultados obtenidos con el mismo con las fórmulas matemáticas de las clases teóricas. La práctica consta de varios apartados o capítulos de una historia en la que el alumno asume la personalidad de un ingeniero de radiofrecuencia a bordo de un satélite interplanetario en un futuro no muy lejano...

CAPÍTULO I- REPASO DE CONOCIMIENTOS TEÓRICOS SOBRE PROPAGACIÓN DE ONDAS

Usted es un ingeniero de radiofrecuencia que trabaja en la Agencia Espacial Europea (E.S.A.). En los próximos meses se va a lanzar una sonda interplanetaria tripulada que tiene como misión llegar a Marte, el planeta en el que están centradas la mayor parte de las misiones espaciales de la industria espacial en el siglo XXI.

Usted quiere formar parte de la tripulación de la misión como técnico de radiofrecuencia, pero antes debe pasar unas pruebas teóricas. Así que desempolva los apuntes de la asignatura de Campos Electromagnéticos que dio en su carrera universitaria en la UPCT y repasa los conceptos teóricos que aprendió entonces.

El día del examen, entre las muchas preguntas que le hacen, debe responder a las siguientes preguntas teóricas sobre propagación de microondas en líneas de transmisión. Rellenar las respuestas en la hoja de resultados:

1. Escriba la **ecuación de la línea de transmisión** (ecuación del telegrafista o de Helmholtz) usando **notación temporal** (dominio del tiempo) y los **equivalentes circuitales** de la línea de transmisión sin pérdidas. Dibujar también un esquema del equivalente circuital de la sección elemental de la línea de transmisión y las corrientes y tensiones que se manejan para escribir las ecuaciones. Partir de las ecuaciones de Kirchoff del equivalente de línea de transmisión para llegar a la ecuación de la línea de transmisión.
2. Escriba la solución de dicha ecuación (**solución de onda de D'Alambert**) para las ondas de tensión y corriente, y explique el significado físico de los conceptos de ondas progresivas y regresivas, velocidad de propagación (v_p) e impedancia característica (Z_0). Expresé estos dos últimos (v_p y Z_0) mediante los parámetros circuitales equivalentes de la línea de transmisión.
 - 2.1- Escriba de nuevo la ecuación de onda, pero ahora en el **dominio fasorial**, es decir, suponiendo que estamos en régimen sinusoidal. Así mismo, escribir la solución de onda en forma de **fasores**. Relacione las ondas espacio-temporales con los fasores espaciales (un fasor lleva implícita la variación temporal, por eso nunca depende de la variable t), y describir la frecuencia f y la pulsación temporal ω , así como la constante de propagación β y la longitud de onda λ . Describir el periodo espacial y temporal de una **onda senoidal que se propaga por el espacio**, y la relación entre ambos.
 - 2.2- Explique qué se entiende por **coeficiente de reflexión** de una onda que llega a una discontinuidad. Relacione el coeficiente de reflexión con la discontinuidad de impedancias que ve la onda, distinguiendo entre el **caso transitorio** y el caso de **régimen permanente**.
 - 2.3- Explique cómo se define la **onda de potencia eléctrica** a partir de las ondas de tensión y corriente. Distinga entre **potencia instantánea** con cualquier tipo de ondas y **potencia media** en régimen senoidal.
 - 2.4- Defina **impedancia característica** de una onda de tensión o corriente que se propaga por una línea e **impedancia** (en general) de una onda. En un medio (como una línea de transmisión), ¿son idénticos estos dos conceptos?. ¿Cuándo es la impedancia igual a la impedancia característica?. Expresar la impedancia a partir de la impedancia característica y el coeficiente de reflexión. Usando el concepto de **impedancia compleja para régimen senoidal** (expresando dicha impedancia con su módulo y con su fase), formule la onda de **potencia media** que se propaga por un medio con una determinada impedancia. ¿Qué pasa si esta impedancia tiene una parte imaginaria, es decir, su fase es distinta de 0 ó 180 grados?
 - 2.5- Por último, exprese la potencia que transporta una onda, pero ahora expresándola a partir de las ondas de tensión y de corriente progresivas y regresivas y el coeficiente de reflexión del medio.

CAPÍTULO II- ADAPTACIÓN PERFECTA ENTRE SISTEMAS DE MICROONDAS

El examen fue todo un éxito, y ahora se encuentra a bordo de la sonda espacial, junto con sus compañeros de tripulación, camino del planeta rojo. Usted se encarga de supervisar el sistema de comunicaciones que permite que puedan estar en contacto con la Tierra.

En la figura siguiente se muestra un esquema del diagrama de bloques básico del sistema transmisión por microondas que utilizan para comunicarse con la Tierra. Se trata de un sistema formado por tres bloques:

- Un **transmisor de microondas** que genera una **portadora de 1 GHz** modulada con las tramas de audio, vídeo y demás datos de telemetrías del satélite. El transmisor presenta una **impedancia de salida de 50Ω** , y tiene una potencia disponible de **1 Watio** para que la onda transmitida llegue a la Tierra.
- Un **cable coaxial**, que se puede modelar como una **línea de transmisión sin pérdidas** y con constante dieléctrica relativa $\epsilon_r=1$, y de longitud **$L=0.99$ metros**.
- Una **antena parabólica** que radia la onda de microondas por el espacio, dirigiéndola hacia la Tierra. La antena presenta una **impedancia de entrada de 50Ω** .

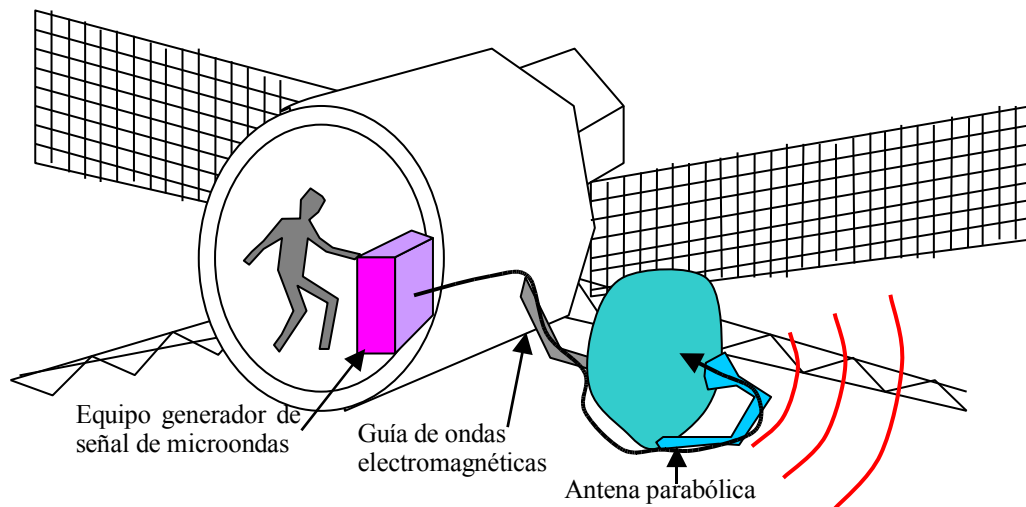


Fig 2.- Esquema del equipo transmisor de microondas a bordo de la sonda espacial

Usted debe hacer una comprobación del correcto funcionamiento del sistema de radiocomunicaciones, ya que en caso de que fallara la misión fracasaría, no sólo porque sería imposible enviar las imágenes científicas, sino además porque sin la comunicación con la estación base de la Tierra es muy difícil volver a nuestro planeta.

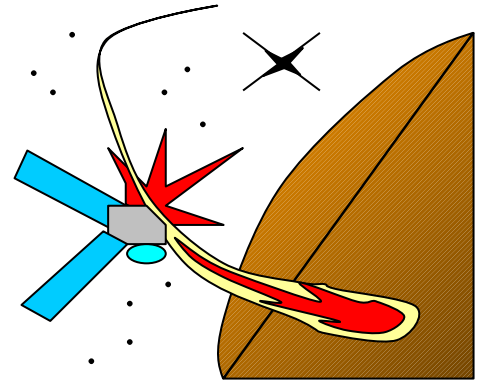
Ahora es cuando empezamos a usar el programa de simulación para modelar la situación en que se encuentra el sistema transmisor. Para ello el alumno debe ejecutar el programa e introducir los parámetros necesarios para poder simular el escenario expuesto, respondiendo a las siguientes preguntas teóricas y prácticas en la hoja de resultados.

- 2.1- Rellenar los parámetros de entrada del simulador, obteniendo los diferentes datos que hay que introducir en las casillas del simulador. Escribir la fórmula y el desarrollo que se ha usado para obtener la **amplitud de pico** que debe tener la primera onda de tensión para que la **potencia media disponible** sea de **1 Watio**.
- 2.2- Con una resolución de 20 puntos/longitud de onda visualizar el transitorio de la onda de tensión que se genera y responder a las preguntas que se formulan.
- 2.3- Una vez observada la onda que se ha formado en **régimen permanente** (es decir, una **onda total** que es estable, cuando no hay más contribuciones significativas de **ondas locales**), responder a las preguntas que se plantean en la hoja de resultados.
- 2.4- La situación analizada es la de **adaptación perfecta** entre los tres subsistemas básicos que forman el sistema transmisor. Explique qué significa que estén adaptados estos tres sistemas respondiendo a estas dos preguntas. ¿Existen reflexiones de ondas? ¿Se aprovecha toda la potencia disponible del generador?. Por lo tanto, ¿es deseable esta situación?.

CAPÍTULO III- UN METEORITO DAÑA LA ANTENA

La misión va en marcha, y tu labor como técnico de los sistemas de radiocomunicaciones de a bordo está siendo tranquila. Pero al acercarse la sonda a la órbita de Marte ha sufrido el impacto de un meteorito que se dirigía hacia la superficie del planeta atraído por su campo gravitatorio.

Los daños han sido varios; en los sistemas de propulsión, en los paneles solares y en la antena de comunicaciones con la Tierra, entre otros. Cada especialista debe intentar recuperar en la medida de lo posible el sistema dañado bajo su responsabilidad.



En concreto, el meteorito ha dejado incrustado en el alimentador de la antena parabólica **un trozo de material metálico**, de manera que interrumpe el paso de la señal de microondas, creando un **cortocircuito**. La impedancia equivalente que se ve a la entrada del conector de la antena es de **0.1 Ω** (impedancia equivalente de carga que presenta al cable coaxial).

Con este nuevo valor de la impedancia equivalente de la antena, y con el resto de valores anteriores para los parámetros del generador (frecuencia de portadora, impedancia de salida, potencia disponible) y del cable coaxial (longitud, cte. dieléctrica e impedancia característica de la línea equivalente), realizar las simulaciones que se indican a continuación y responder a las preguntas que se formulan en la hoja de resultados.

3.1- Con el nuevo parámetro de impedancia de carga de 0.1 Ω , simular el sistema de comunicaciones y analizar la **onda estacionaria** que se genera, según se describe en la hoja de resultados, y responder a las preguntas que se formulan.

3.2- Se define como **R.O.E.** (Relación o coeficiente de Onda Estacionaria) (**SWVR** Standing Wave Voltage Ratio en inglés), como el cociente entre la máxima y la mínima tensión de pico que existe en una línea de transmisión. Dicho coeficiente tiene una relación muy estrecha con el coeficiente de reflexión que existe en una línea de transmisión sin pérdidas, y por lo tanto, es una buena medida de la desadaptación que existe en el sistema de microondas. Esta es la relación que existe entre el ROE y el coeficiente de reflexión:

$$R.O.E. = \frac{|V_{\text{máx}}|}{|V_{\text{mín}}|} = \frac{|V^+ + V^-|}{|V^+ - V^-|} = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}$$

Responder a las preguntas que se plantean en la hoja de resultados para entender mejor este concepto y cómo mide el grado de desadaptación.

3.3- Por último, visualizar la evolución de la **onda de potencia** que se propaga por la línea para entender el concepto de **energía reactiva** almacenada en una línea de transmisión.

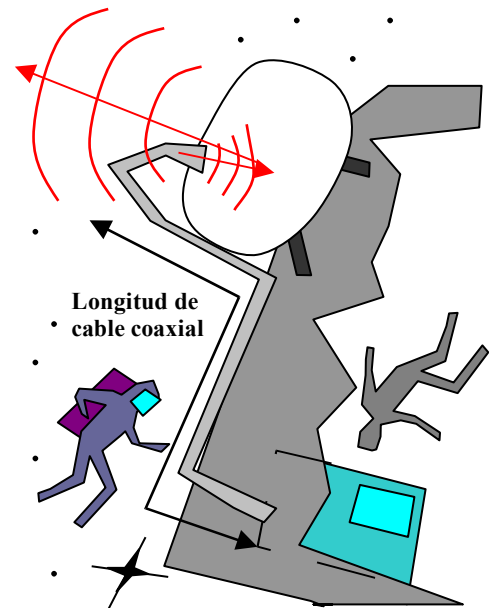
CAPÍTULO IV- LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN COMO ADAPTADOR DE IMPEDANCIAS EN LAMBDA CUARTOS

Con esta nueva impedancia, el equipo transmisor no puede funcionar correctamente, como hemos visto. Así que hay que salir a la cubierta de la sonda espacial para intentar sacar el fragmento de meteorito que obstruye el paso de la señal de radio. Un astronauta de la tripulación sale a la cubierta y logra extraerlo, aunque la antena sigue estando dañada físicamente por el impacto recibido, y sus prestaciones eléctricas han empeorado.

Después de analizar los daños de la antena, observa que la misma sigue sin presentar una impedancia de entrada de 50Ω , y después del impacto del meteorito presenta una impedancia de entrada de 20Ω .

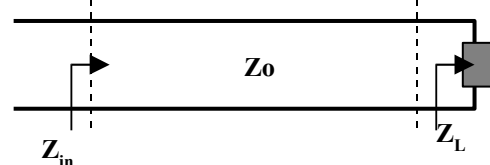
Se necesita una solución inmediata para poder arreglar la desadaptación de impedancias que hay en la línea en este instante. El objetivo es conseguir que la **impedancia de entrada que ve el generador (en su conector de salida que se une con el cable coaxial)** sea de nuevo de 50Ω para que así no haya desadaptación de impedancias con el generador de microondas.

La mejor solución que encuentras es la de usar una línea de transmisión como circuito adaptador de impedancias distribuido. Esta solución consiste en usar una línea de transmisión de una determinada impedancia característica Z_0 y de longitud $L=\lambda/4$. De nuevo se deberá realizar una reparación en las instalaciones de la nave espacial, cambiando el cable coaxial que une el generador de señal con la antena. Cada salida es un riesgo para el técnico astronauta, así que en ti recae la responsabilidad de realizar un buen diseño para la reparación.



Como sabemos, en una línea de transmisión se puede demostrar que la relación entre la impedancia que se ve a la entrada y la impedancia terminal (la que hay en el otro extremo de la línea), se relacionan con la siguiente fórmula:

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + j * Z_0 * \tan(\beta L)}{Z_0 + j * Z_L * \tan(\beta L)}$$



Responder a las siguientes preguntas teóricas y rellenar las simulaciones para comprobar el correcto funcionamiento del circuito propuesto.

4.1- Una de las características que más diferencian a la electrónica de microondas de la de menores frecuencias es la del **comportamiento de la impedancia a lo largo de una línea de transmisión**. Como hemos visto, por la fórmula anterior, la impedancia que se ve en un extremo de la línea, Z_{in} , no tiene por qué ser la que hay en el otro extremo, Z_L . Realice los pasos que se proponen en la hoja de resultados para entender mejor este fenómeno.

4.2-Con la fórmula de la impedancia de entrada en una línea de transmisión introducida en las líneas de arriba, desarrollar la expresión de la impedancia cuando $L=\lambda/4+n*\lambda/2$, con $n=0,1,2,3...$

4.3-Utilizando la expresión anterior, si la antena dañada presenta una impedancia de $Z_L=20 \Omega$ y queremos una impedancia de entrada de $Z_{in}=50 \Omega$, calcular la impedancia característica que debe tener una línea adaptadora en $\lambda/4$ (de longitud $L=3.25\lambda$, es decir, $n=6$ en la expresión del apartado 4.1), para conseguirlo.

4.4- Simular la situación del apartado 4.2, respondiendo a las diferentes preguntas que se realizan en la hoja de resultados.

CAPÍTULO V- CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA REACTIVA A PARTIR DE LA DISTRIBUCIÓN DE ONDA ESTACIONARIA

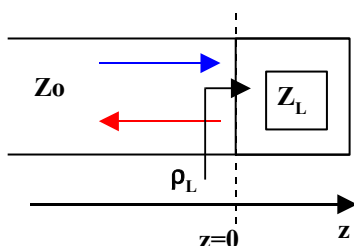
Después del problema con el meteorito se pudieron reestablecer las comunicaciones con la Tierra, y el aterrizaje en Marte se hizo sin más problemas. Sin embargo, ya en la superficie del planeta rojo la misión se encuentra con otro nuevo problema inesperado.

Debido a la atmósfera de Marte, enrarecida con diversos gases ionizados, el sistema de radiocomunicaciones vuelve a fallar. Al parecer el medio ionizado se crea en el conector de la antena una carga reactiva y reflejando hacia el generador parte de la energía electromagnética que se pretende dirigir hacia la antena para establecer comunicación con la Tierra. Dicho fenómeno se quiere estudiar para poder modelizar el comportamiento de la atmósfera en los sistemas de radiocomunicaciones, y de paso intentar recuperar las comunicaciones.

Para ello usted decide estudiar la distribución de ondas en la línea de transmisión y calcular la impedancia compleja que se ve a la entrada de la antena. Como vimos en el capítulo III, la desadaptación genera ondas reflejadas, que confieren un patrón de onda estacionaria a la onda total que se crea en la línea de transmisión.

En este apartado vamos a ver cómo, estudiando la **distribución de vientres y nudos de la onda estacionaria resultante**, se puede conocer el valor de la impedancia terminal que se ve a la entrada de la antena.

Para ello debe recordar lo que ocurre en un escenario como el siguiente, en el que tenemos una onda de tensión progresiva y otra regresiva en una línea de transmisión de impedancia característica Z_0 . Al incidir la onda progresiva sobre una **discontinuidad** (una **impedancia compleja Z_L distinta a Z_0**), existe una **coeficiente de reflexión complejo ρ** $\Gamma = |\rho_L|e^{j\varphi}$, de manera que la onda estacionaria que se crea es:



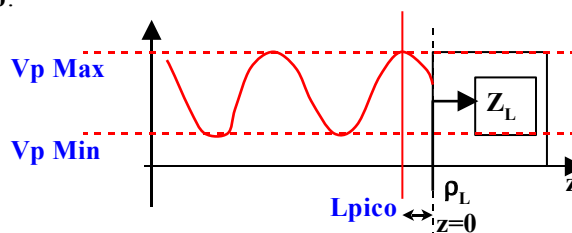
$$V_{TOTAL} = V^+ (e^{-j\beta z} + |\rho| e^{+j\varphi} e^{+j\beta z})$$

$$|V_{TOTAL}| = |V^+| \sqrt{1 + |\rho|^2 + 2|\rho| \cos(2\beta z + \varphi)}$$

Esta fórmula nos está diciendo que mirando la tensión de pico instantánea de la distribución de tensión en la línea podemos conocer qué tipo de carga tenemos. Así, lo primero que debemos hacer es encontrar el punto de la línea donde está el **máximo de tensión** (tensión de pico máxima) **más cercano a la carga**. Según la fórmula expuesta, como podemos ver en la figura siguiente, este máximo estará separado de la carga una distancia que depende de φ , siendo φ el **ángulo del coeficiente de reflexión de carga complejo**.

Midiendo la distancia L_{pico} que separa el pico más cercano a la carga de la misma, podemos encontrar el valor del desfase φ aplicando esta fórmula:

$$\varphi = 2 * \beta * L_{pico} \text{ (rad)}$$



O lo que es lo mismo, como $\beta = 2\pi/\lambda$:
$$\varphi = 4\pi * \frac{L_{pico}}{\lambda} \text{ (rad)} = 360 * 2 * \frac{L_{pico}}{\lambda} \text{ (deg)}$$

Así, por ejemplo, un cortocircuito presenta un $\rho = -1$, con fase igual a 180 grados, y por eso el máximo está situado a $L_{pico} = \lambda/4$ de la carga, como es de esperar pues en la carga está el nulo de tensión. Un circuito abierto tiene un $\rho = 1$, con fase de cero grados, y por eso $L_{pico} = 0$, es decir, el máximo de tensión está en la misma carga.

5.1-Para terminar con el desarrollo de esta práctica, responda a las cuestiones que se plantean en la hoja de resultados. No olvide entregar dicha hoja antes de abandonar el laboratorio.