

Introducción a líneas de transmisión

Definición

Es un sistema de conductores capaces de transmitir potencia eléctrica desde una fuente a una carga.

De acuerdo a esta definición tanto la línea de alta tensión proveniente desde El Chocón, como una línea telefónica, un cable coaxial los terminales de un componente o las pistas de un circuito impreso son líneas de transmisión.

No es su único uso ya que también se las puede utilizar como circuitos sintonizados, transformadores (para adaptar impedancias), etc.

Tipos de líneas de transmisión

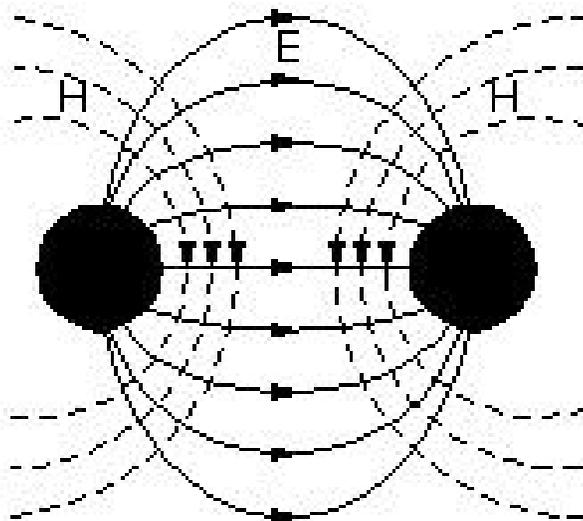
Las líneas de transmisión pueden dividirse en distintos tipos según su geometría o según su equilibrio eléctrico.

- Según su equilibrio eléctrico:
 - Balanceadas: son aquellas donde entre cada conductor y tierra aparece la misma diferencia de potencial (en módulo)
 - Desbalanceadas: no se cumple lo mencionado en el párrafo anterior ya que generalmente uno de los conductores está vinculado a tierra.
- Según su geometría:
 - unifilares, bifilares, coaxiales, cables radiantes, etc.

En la práctica esto provoca que por su geometría cierto tipo de líneas se utilicen mayormente como líneas desbalanceadas (por ejemplo los cables coaxiales) u otras como balanceadas (bifilares).

Descripción del funcionamiento

¿Cómo analizar el funcionamiento de una línea de transmisión? Utilizando la teoría electromagnética. Por ejemplo en una línea bifilar se pueden plantear las ecuaciones que describan la distribución del campo electromagnético en la misma



De la figura anterior se puede deducir la existencia de un vector de Poynting que va a lo largo de la línea de transmisión dado por la siguiente ecuación:

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H}$$

Este vector es el que sostiene las ondas de tensión y corriente que se desplazan en la línea.

Este método si bien no posee las limitaciones del método que se verá a continuación, implica el desarrollo de largos formuleos que están fuera del alcance de este curso.

Utilizando la teoría de circuitos

Esta visión más simplificada de las líneas de transmisión sólo es válida mientras que la distancia que separa los distintos conductores (d) que conforman la misma sea mucho menor que la longitud de onda (λ) de las señales que viajan por la misma. Al aplicar la teoría de circuitos a las líneas se descubrió que la solución que más se aproximaba a la realidad física era suponer a la línea compuesta por circuitos elementales tipo 'T' de constantes distribuidas por unidad de longitud.

O sea en el caso de las líneas de transmisión, por lo general se cumple que la longitud de onda λ de la señal es mucho menor que la longitud de la línea de transmisión y por lo tanto, no se pueden considerar a las constantes de la línea como concentradas, sino como distribuidas a lo largo de ella, por lo que la teoría clásica de análisis de circuitos que han visto hasta el momento no sería aplicable.

Para salvar este inconveniente, consideramos a la línea de transmisión compuesta por una sucesión de elementos de línea, cada uno de ellos, poseyendo una longitud infinitesimal dl ; para cada uno de estos elementos será válida la aplicación de la teoría de los circuitos, puesto que $\lambda \gg dl$.

En conclusión, ¿existe físicamente una línea de transmisión? Pues diremos que básicamente se trata de dos conductores próximos entre sí, cuya finalidad es la de guiar la onda electromagnética que se propaga de modo transversal electro magnético (TEM); los vectores campo eléctrico E y campo magnético H son perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación, es decir a los conductores de la línea. La onda electromagnética, en general de alta frecuencia, desde un generador (un transmisor de alta frecuencia) hasta una carga (generalmente una antena). Sin embargo se debe tener en cuenta que todos estos fenómenos que trataremos de explicar ocurren a todas las frecuencias, pero a frecuencias bajas (audio y continua) se pueden considerar despreciables.

Análisis de una línea de transmisión

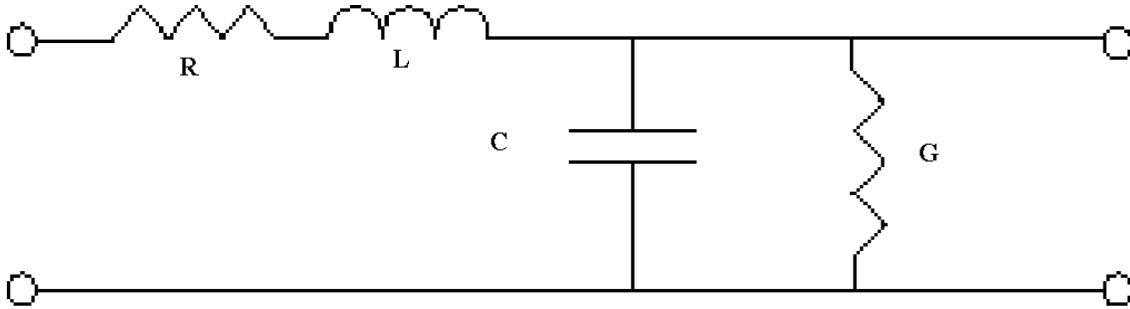
El siguiente análisis es independiente del tipo de línea, que puede ser: bifilar, coaxil, de cintas paralelas o micro strip. Los conductores que forman la línea se caracterizan por poseer:

1. Una resistencia a la corriente continua y otra resistencia variable con la frecuencia, debido al efecto "pelicular" por el cual la corriente circula por la superficie de l conductor y no por el centro. Ambas resistencias en conjunto definen la Resistencia distribuida medida en Ω /metro
2. Además, en alta frecuencia, los conductores de la línea se encuentran concatenados por un campo magnético variable, lo que da lugar a una inductancia distribuida.
3. Por otro lado, entre los dos conductores que forman la línea existe una diferencia de potencial que da origen a un campo eléctrico; por este motivo aparece una capacidad distribuida a lo largo de la línea.

4. Por último, puesto que el dieléctrico no es perfecto, presenta componentes de pérdida en paralelo con la línea caracterizando así una conductancia distribuida.

Todos estas características definen al elemento de línea de longitud Dx (diferencial de longitud de línea), que ya habíamos definido. Así, cada elemento de línea de línea Dx estará compuesto por:

1. R = resistencia por unidad de longitud.
2. L = inductancia por unidad de longitud.
3. C = capacidad por unidad de longitud.)(entre los conductores)
4. G = conductancia por unidad de longitud. (es la inversa de la resistencia de aislación entre ambos conductores).



Aplicando las leyes de Kirchoff y operando (mucho) se obtiene:

(9)

$$E_{(x)} = V_1 \cdot e^{-g \cdot x} + V_2 \cdot e^{g \cdot x}$$

$$I_{(x)} = \frac{V_1}{Z_0} \cdot e^{-g \cdot x} - \frac{V_2}{Z_0} \cdot e^{g \cdot x}$$

Con las siguientes definiciones

$$\sqrt{z \cdot y} = a + j \cdot b = g \qquad \sqrt{\frac{z}{y}} = Z_0$$

Z : impedancia distribuida de la línea.

Y : admitancia distribuida de la línea.

γ : constante de propagación de la línea

α : atenuación de la línea

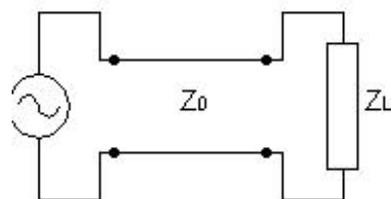
β : constante de fase de la línea

Z_0 : impedancia característica

CONCEPTO DE Z_0 (Impedancia característica): Sería la impedancia que podríamos medir sobre la línea si esta tuviera longitud infinita. Es la relación entra la tensión total y la corriente en un punto cualquiera de la línea. Si pudiéramos mandar un banco de medición que estuviera midiendo impedancia a medida que va viajando, Z_0 es la impedancia que se mediría. Es la impedancia que ve la onda de tensión o de corriente mientras viaja a lo largo de la línea de transmisión.

Las anteriores son las ecuaciones que rigen el comportamiento de una línea de transmisión.

A continuación veremos que significan estas ecuaciones para lo cual se supondrá un circuito simple formado por un generador, una impedancia de carga (Z_L) y una línea de transmisión de impedancia característica Z_0 vinculando ambos.



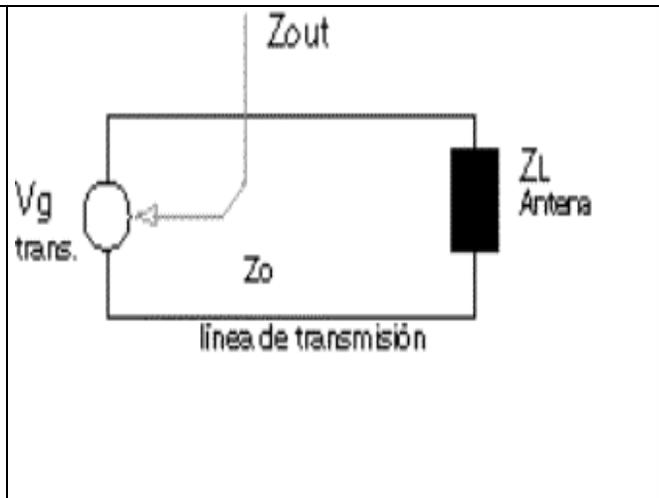
El primer termino del segundo miembro muestra una onda que viaja del generador hacia la carga (onda incidente) y el segundo término una que viaja de la carga hacia el generador (onda reflejada). Para poder obtener las condiciones de contorno que nos permitan obtener los valores de las constantes V_1 y V_2 plantearemos distintos casos de un circuito simple compuesto por un generador ideal, una impedancia de carga (Z_L) y una línea de transmisión de impedancia característica Z_0 que los vincula.

1er caso $Z_L=Z_0$

Se puede demostrar que si estoy mandando una onda por una línea que termina en una carga Z_L que es igual a su impedancia característica Z_0 , entonces no tendremos onda reflejada.

Adaptación de Impedancias

Cuando se conecta un transmisor de radiofrecuencia a una línea de transmisión, siempre se busca que la impedancia característica de la línea, sea igual a la impedancia de salida del transmisor, para lograr así la máxima transferencia de potencia. Lo mismo sucede cuando se desea conectar la antena (carga) a la línea. En caso de que las impedancias de línea y carga sean distintas, parte de la energía entregada por el transmisor, "rebotará" en la antena, volviendo como una **onda reflejada**. Esta energía reflejada no solo trae como consecuencia perdida en el rendimiento del equipo, sino podría dañar el transmisor si el diseñador no consideró algún tipo de protección.



Analizando la ecuación de la onda incidente es posible demostrar analizando la situación de dos puntos que en el mismo instante tengan el mismo valor de tensión o corriente, que se cumple:

$$b \cdot l = 2 \cdot p$$

$$l \cdot f = v$$

O sea que la velocidad de propagación es igual al producto de la frecuencia por la longitud de onda. La velocidad de propagación entre otros parámetros depende del dieléctrico de la línea, por lo tanto dos señales de igual frecuencia tendrán distinta λ dependiendo del medio de propagación.

(Recordar que la constante de fase b depende de las características de la línea).

NOTA: Si nos fijamos en catálogos del fabricante de líneas de transmisión, podemos encontrar por ejemplo para el caso de un determinado cable coaxial:

$Z_0 = (50 \pm 2) \Omega$

La velocidad de propagación la da en función de la velocidad de la luz en el vacío (68%).

Capacidad distribuida = 24,3 pf por pie

Inductancia distribuida = 0,061 uHy por pie

Resistencia distribuida del conductor exterior = 1,52 Ω cada 1000 pies.

Resistencia distribuida del conductor interior = 1,29 Ω cada 1000 pies.

2do caso $Z_L \neq Z_0$

Partiendo de la ecuaciones (9) se pueden plantear las siguientes ecuaciones de onda:

$$e = e_{1(x,t)} + e_{2(x,t)}$$

$$i = \frac{e_{1(x,t)}}{Z_0} - \frac{e_{2(x,t)}}{Z_0}$$

En este caso se demuestra que hay una onda incidente y una onda reflejada. Pudiéndose definir el coeficiente de reflexión como:

$$\Gamma = \text{onda reflejada} / \text{onda incidente}$$

Y las relaciones con la impedancia de carga (Z_L) y la impedancia característica (Z_0).

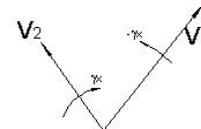
$$\Gamma = \frac{e_{2L}}{e_{1L}}$$

$$Z_L = Z_0 \cdot \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}$$

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

En la ecuación anteriores se puede apreciar dos ondas viajeras a lo largo de la línea (una incidente y una reflejada), si representamos las mismas mediante fasores tendríamos el siguiente esquema.

Donde se puede apreciar que a lo largo de la línea se verá una señal periódica con sus correspondientes mínimos y máximos. A la relación entre el valor máximo y mínimo se la denomina relación de onda estacionaria ROE (o VSWR en inglés).



$$ROE = \frac{|V_1| + |V_2|}{|V_1| - |V_2|} = \frac{1 + \frac{|V_2|}{|V_1|}}{1 - \frac{|V_2|}{|V_1|}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

Implicancias de tener una línea de transmisión en un circuito

Hasta aquí se han visto las ecuaciones de las ondas de tensión y corriente a lo largo de una línea y se han definido los parámetros de la misma (Z_0 , α , β , v) y otros parámetros que además dependen de la señal que viaja por ella y de la carga existente al final de ella (λ , Γ y ROE o VSWR).

¿Pero que significa introducir una línea en nuestros circuitos?

Supongamos tener una línea de impedancia característica Z_0 , de longitud "L", y al final de la línea la carga Z_L . Se puede deducir que:

$$Z_e = Z_0 \cdot \frac{Z_L + Z_0 \cdot \text{Tanh}(g \cdot L)}{Z_0 + Z_L \cdot \text{Tanh}(g \cdot L)}$$

Donde se puede apreciar que la impedancia de entrada que ve el circuito al cual conectamos la línea no sólo depende de la impedancia al final de la línea sino también de los parámetros de la línea (Z_0 , α , β) y de la relación entre el largo de la misma y la frecuencia de la señal que viaja por ella (ya que $\beta = 2\pi / \lambda$)

Se analizará a continuación que ocurre para diversas combinaciones entre L (longitud de la línea) y λ (longitud de onda de la señal) así como también para distintas impedancias de carga, con el objetivo de ver cual es la impedancia de entrada que ve el circuito al cual conectamos la línea.

1er Caso) Líneas de longitud $\lambda/2$ o múltiplos enteros de $\lambda/2$

$$Z_e = Z_0 \cdot \frac{Z_L + j \cdot Z_0 \cdot \tan\left(\frac{2 \cdot p}{l} \cdot \frac{l}{2}\right)}{Z_0 + j \cdot Z_L \cdot \tan\left(\frac{2 \cdot p}{l} \cdot \frac{l}{2}\right)} = Z_0 \cdot \frac{Z_L + j \cdot 0}{Z_0 + j \cdot 0} = Z_L$$

ATENCIÓN: Pareciera que nos independizamos de las características de la línea, pero estas están implícitas en λ (longitud de onda de la señal)

2do Caso) Líneas de longitud $\lambda/4$ o múltiplos impares de $\lambda/4$

$$Z_e = Z_0 \cdot \frac{Z_L + j \cdot Z_0 \cdot \tan\left(\frac{2 \cdot p}{l} \cdot \frac{l}{4}\right)}{Z_0 + j \cdot Z_L \cdot \tan\left(\frac{2 \cdot p}{l} \cdot \frac{l}{4}\right)} = Z_0 \cdot \frac{Z_L + j \cdot Z_0 \cdot \infty}{Z_0 + j \cdot Z_L \cdot \infty} = \frac{Z_0^2}{Z_L}$$

NOTA: Por supuesto que si la línea termina en $Z_L = Z_0$ (línea adaptada) $Z_e = Z_0$

Ver que si $Z_L = 0$ (un cortocircuito), entonces $Z_e = \infty$ o sea a la entrada se ve un circuito abierto. Esto se utiliza para los llamados FILTROS DE CUARTO DE ONDA, y que se puede encontrar a la entrada de un receptor ya que se diseña para que la señal esperada vea un circuito abierto (∞) y todas las demás vean un corto.

En cambio si $Z_L = \infty$ (circuito abierto) a la entrada se ve un cortocircuito $Z_e = 0$. O sea pueden no estar cargando el generador y sin embargo él ve un corto.

RESUMEN: Cuando decimos que una línea está desadaptada o sea que no termina con una $Z_L = Z_0$, o que el coeficiente de reflexión es distinto de cero, o que ROE es distinto de uno, estamos tratando de explicar de distintas maneras el mismo hecho físico.

APRECIACIÓN: Una onda que viaja del generador a la carga, lo que va viendo es Z_0 , y es lo que presupone encontrar al final de la línea, si la línea está desadaptada cuando la onda llega encuentra una impedancia distinta, entonces por ley de Ohm solo puede cambiar V o I , como I no puede cambiar porque es un circuito serie, entonces debe aparecer una V que se suma o que se resta, esa es la V reflejada que viaja hacia el generador.

UNA EXPLICACIÓN SOBRE ESOS CAPACITORES QUE AGREGAMOS EN NUESTROS CIRCUITOS SIN APARENTE RAZÓN:

Supongamos que tenemos una fuente regulada estabilizada que alimenta un circuito digital el cual el mayor consumo lo tiene en la conmutación. Esta fuente usualmente tiene un elemento que es una impedancia variable que regula la tensión dependiendo de la carga que tiene en ese momento. Pero también tiene un cable que une la fuente y la carga, que es una línea de transmisión, cuando la carga pide más corriente esa información viaja por la línea para informarle a la lógica de la fuente que debe cambiar esa impedancia variable. Si la conmutación del circuito digital es tan rápida que termina antes de que la información de demanda de corriente llegue a la fuente, esta no se entera, y se producen variaciones indeseables de la tensión sobre la carga, esta es la razón que muchas veces debemos colocar capacitores en paralelo con la alimentación cercano al circuito, así este entrega la energía en el momento que esta es demandada.

(CONTINUARA)