

## Laboratorio N°1

### Medios Guiados

#### Marco teórico:

Las líneas de transmisión son utilizadas para transmitir energía eléctrica y señales desde un punto a otro. Por ejemplo, la conexión entre un transmisor y una antena, las conexiones entre las computadoras de una red o entre una central hidroeléctrica y una subestación a cientos de kilómetros o incluso, entre dos dispositivos en un circuito impreso diseñado para operar a altas frecuencias.

En los métodos de análisis básicos de circuitos se supone que las distancias de las conexiones entre elementos son despreciables. Sin embargo, cuando estas distancias se encuentran en el orden de una longitud de onda o más, aparecen *efectos de retardo de tiempo* considerables. Es decir, en distintos puntos de la línea de transmisión hay diferencias de fase en el voltaje medido, a estos efectos se los denomina *fenómenos ondulatorios*.

A diferencia de los elementos básicos de un circuito llamados *concentrados* debido a que el retardo de tiempo en atravesarlos es despreciable, las líneas de transmisión lo suficientemente grandes se las considera como elementos *distribuidos*. Esto significa que sus características resistivas, capacitivas e inductivas deben evaluarse en función de su distancia unitaria. Por lo tanto, se convierten en elementos a considerar en el diseño.

#### Línea sin pérdidas:

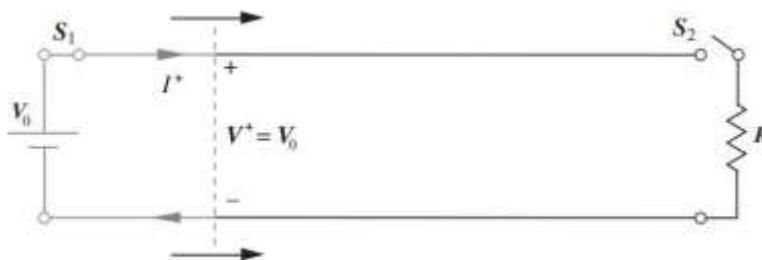


Figura 1. Circuito equivalente línea sin pérdidas.

Para entender cómo se propagan las ondas electromagnéticas en un medio guiado, nos basamos en un modelo denominado *línea sin pérdidas*, ya que se considera que la potencia entregada a la entrada llegará completamente al extremo de salida. En la figura 1, se ilustra el caso de una fuente de tensión constante  $V_0$  conectada a un interruptor  $S_1$  que se cierra en el tiempo  $t=0$ . En este momento, el voltaje  $V^+$  se vuelve  $V_0$  en el punto indicado y comienza a viajar a través de la línea. El proceso no se realiza instantáneamente, sino que el frente de onda se encuentra indicado con la línea de trazos y se desplaza a una velocidad  $v$ . La corriente  $I^+$  también se desplaza con el frente de onda, es decir que delante del frente de onda todavía no existe corriente eléctrica ni tensión. Una vez llegado al extremo de la carga, una fracción o todo el voltaje y corriente de la onda se reflejará, en función de donde esté conectada la línea.

La velocidad de propagación puede cuantificarse considerando que la línea de transmisión tiene capacitancia e inductancias expresadas en términos de unidades de longitud como se muestra en la figura 2. En este caso, todos los valores de capacitancia e inductancia son iguales.

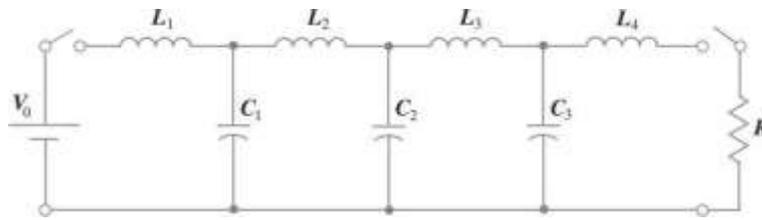


Figura 2. Modelo de elementos distribuidos de una línea de transmisión.

Si consideramos la conexión de la fuente en este modelo, el proceso de propagación de la onda se realiza en etapas, progresivamente aumenta la corriente en cada bobina cargando a su vez el capacitor adyacente y así sucesivamente hasta llegar a la carga. La velocidad de propagación depende de qué tan rápido cada inductancia alcanza su estado de carga total y, simultáneamente, de qué tan rápido se carga el máximo voltaje del capacitor. La onda es más rápida si los valores de \$C\_i\$ y \$L\_i\$ son menores. En una línea de transmisión sin pérdidas la velocidad de onda está dada por

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

donde \$L\$ y \$C\$ están expresados en unidad de longitud.

### Impedancia característica:

La impedancia característica puede definirse como el coeficiente entre la tensión aplicada y la intensidad absorbida por el cable coaxial en el caso ideal de que este tuviera longitud infinita. En otras palabras, es la impedancia que mediríamos en un extremo de la línea en el caso de que esta fuera infinita. Este valor no depende de la frecuencia ni de la longitud del cable.

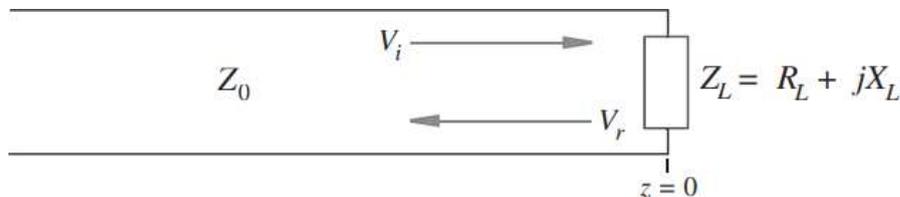
Para que un sistema de comunicación se produzca la máxima transferencia de energía, las impedancias del transmisor, el medio físico y el receptor (y de todos los elementos intervinientes) deben ser iguales, como se demostrará en ensiguenda.

La impedancia característica tiene relación con la velocidad de propagación mediante:

$$Z_0 = Lv = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

### Reflexión de la onda:

La necesidad de incorporar una onda reflejada al modelo tiene su origen en satisfacer las condiciones de frontera de voltaje y de corriente en los extremos de la línea de transmisión, así como también en los puntos donde dos líneas diferentes se conectan entre sí. Las consecuencias de las ondas reflejadas usualmente son indeseables, en el sentido de que parte de la potencia que se pretende transmitir a una carga, por ejemplo, se refleja y se propaga de regreso hacia la fuente. Por lo tanto, es importante comprender las condiciones para lograr que no se reflejen las ondas transmitidas.



**Figura 3. Reflexión de onda de voltaje producida por una impedancia.**

Consideremos el siguiente problema de transmisión, se vio que  $Z_0$  es la impedancia característica de la línea y será compleja si esta tiene pérdidas. El fasor de voltaje medido en la carga  $V_L$  será la suma del fasor de voltaje incidente  $V_i$  más el fasor de voltaje reflejado  $V_r$

$$V_L = V_{0i} + V_{0r}$$

Además, la corriente en la carga es la suma de las corrientes incidentes y reflejada:

$$I_L = I_{0i} + I_{0r} = \frac{1}{Z_0} [V_{0i} - V_{0r}] = \frac{V_L}{Z_L} = \frac{1}{Z_L} [V_{0i} + V_{0r}]$$

De aquí podemos despejar la relación entre el voltaje de la onda reflejada y la onda incidente obteniendo así el coeficiente de reflexión

$$\Gamma \equiv \frac{V_{0r}}{V_{0i}} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = |\Gamma| e^{j\theta_r}$$

El valor ideal es que la onda reflejada sea nula y, en consecuencia, que toda la potencia sea entregada a la carga. Para que esto suceda, la impedancia de la carga tiene que ser igual a la impedancia característica de la línea. Endicho caso, se dice que la carga está *acoplada* a la línea. En teoría,  $\Gamma$  puede tomar valores entre -1 (reflexión completa negativa) y +1 (reflexión completa positiva). Si se analiza el voltaje que recibe la carga se tiene que

$$V_L = V_{0i} + \Gamma V_{0i}$$

El voltaje de la carga puede ser mayor que el incidente debido al desfase de las ondas. Sin embargo, no presenta un problema porque la corriente será menor y la potencia promedio entregada a la carga siempre es menor o igual a la de la onda incidente.

### Relación de onda estacionaria:

La relación de onda estacionaria ROE, o *Voltage Standing Wave Ratio* en inglés VSWR, es una medida de la adaptación que existe entre la impedancia característica de la línea con la impedancia de la carga. La ROE está definida como la relación entre la máxima amplitud de onda registrada a lo largo de la línea sobre la mínima amplitud registrada. Guarda relación directa con la magnitud del coeficiente de reflexión.

En algunos puntos, la onda reflejada interfiere constructivamente con la onda incidente resultando una amplitud de tensión máxima:

$$|V_{max}| = |V_f| + |V_r|$$

$$|V_{max}| = |V_f| + |rV_f|$$

En otros puntos, las ondas interfieren con una fase de 180° entre sí cancelándose parcialmente:

$$|V_{min}| = |V_f| - |V_r|$$

$$|V_{min}| = |V_f| - |rV_f|$$

Por lo que la relación resulta:

$$ROE = \frac{|V_{max}|}{|V_{min}|} = \frac{1 + |r|}{1 - |r|}$$

## ACTIVIDAD 1: Línea de Transmisión Coaxial

### Objetivo

Analizar los efectos de las líneas de transmisión con adaptación incorrecta de impedancia.

### Materiales

- 1 generador de funciones
- 1 osciloscopio
- 1 multímetro
- 12m cable coaxial
- 1 potenciómetro de 100 o 500
- Varios otros elementos.

### Procedimiento

1. Armar el ensayo siguiendo la Figura 1.

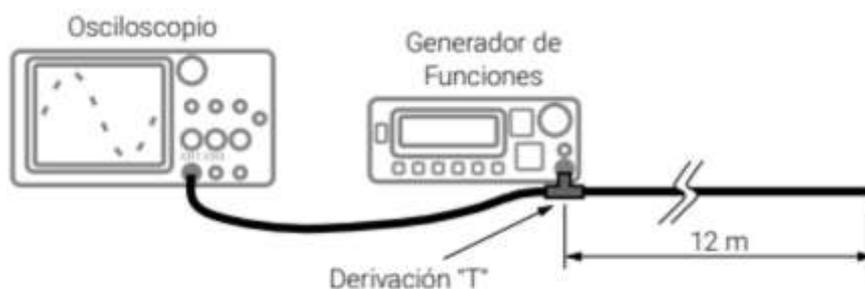


Figura 1. esquema de conexión

2. Configurar el generador de funciones de manera de producir una señal con:
  - Tipo de señal: Pulso
  - Frecuencia: 1 MHz
  - Amplitud: 7,5 Vpp.
  - Ciclo útil (*duty cycle*): 2 %
3. Con el extremo distante del cable coaxial no conectado observar la forma de onda en el osciloscopio e identificar la onda reflejada.
4. Conectar un potenciómetro, en configuración reóstato, en el extremo distante del cable coaxial. Ajustar el potenciómetro de manera que la onda reflejada desaparezca.
5. Desconectar el potenciómetro y medir su valor. El valor obtenido será equivalente a la impedancia característica del cable coaxial.
6. Conectar una derivación entre el extremo lejano y el potenciómetro. Observar el efecto de una derivación no adaptada (*bridge tap*).



7. Desconectar el potenciómetro y la derivación en el extremo lejano. Calcular la velocidad de propagación de la onda electromagnética en el cable coaxial utilizando los datos de longitud del cable y tiempo entre onda transmitida y onda reflejada.

### Questionario

1. ¿La impedancia de adaptación/terminación depende de la longitud del cable?
2. ¿Por qué se utiliza una impedancia resistiva para la adaptación?
3. ¿Qué sucede si la impedancia de terminación es menor que la impedancia característica del cable?

## ACTIVIDAD 2: Caracterización de Líneas de Transmisión

### Objetivo:

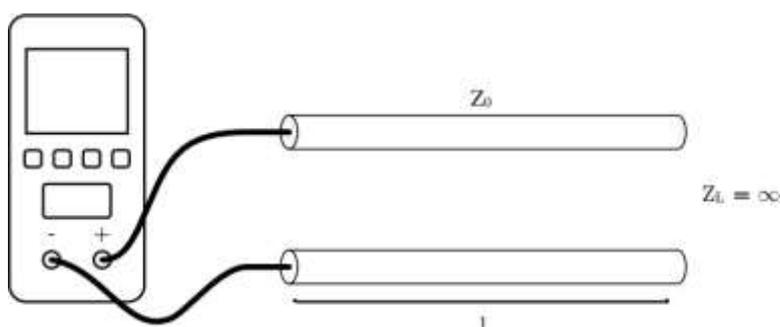
Obtener experimentalmente la impedancia característica de líneas de transmisión

### Materiales

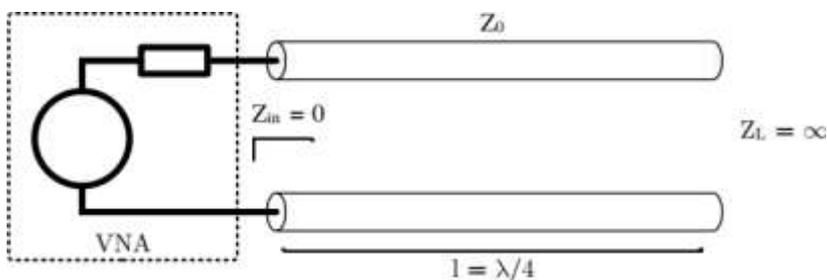
- Medidor LCR
- Analizador vectorial de redes (VNA)
- Líneas de transmisión varias. Se dispone de coaxiales y par trenzado.

### Procedimiento

1. Medir la longitud  $l$  de la línea de transmisión.
2. Con el puente LCR, medir la capacidad  $C$  de la línea de transmisión.



3. Conectar la línea al VNA y visualizar la impedancia de entrada vista por el instrumento. En baja frecuencia debería mostrar un circuito abierto. Conforme la frecuencia aumenta, la impedancia se vuelve reactiva y luego adquiere un carácter resistivo. Tomar nota de la frecuencia  $f$  más baja para la cual el instrumento indica un corto.



## Cálculos

La capacidad por unidad de longitud es la razón entre la capacidad y la longitud medida:

$$C' = \frac{C}{l}$$

Cuando el VNA acusa un cortocircuito siendo que la línea está terminada en circuito abierto, la línea se convierte en un transformador de cuarto de longitud de onda para esta frecuencia.

$$l = \frac{\lambda}{4}$$

Por lo tanto:

Sabiendo que la velocidad de onda se relaciona con su frecuencia y longitud, es posible calcularla con los parámetros medidos hasta ahora:

$$v_p = f\lambda = 4fl$$

Por otra parte, se sabe que la velocidad de onda depende de las características de la línea de transmisión. Si se desprecian las pérdidas en la misma:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{L'C'}}$$

Por lo tanto:

$$\sqrt{L'} = \frac{1}{v_p \sqrt{C'}}$$

La impedancia característica de una línea sin pérdidas también depende solo de su capacidad e inductancia distribuidas:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

Reemplazando la inductancia en la expresión anterior:

$$Z_0 = \frac{1}{v_p C'}$$

Se puede calcular la impedancia característica con los datos medidos en el ensayo. Calcule este valor y compare con lo esperado, ya sea con cálculos teóricos o datos provistos por el fabricante.

## Cuestionario:

¿Por qué la línea parece invertir la impedancia de carga cuando su longitud coincide con  $\lambda/4$ ?

¿Qué pasa con la impedancia de entrada si la longitud de la línea es  $\lambda/2$ ?

¿Qué pasa con la impedancia de entrada si la resistencia de carga tiene un valor igual a la impedancia característica de la línea?