EL3003 LABORATORIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Las líneas de transmisión se usan para transportar energía y ondas electromagnéticas (información) de un punto a otro sin que exista radiación y tratando de minimizar las pérdidas que se producen en el trayecto que recorre la información. Dichas pérdidas se deben a la presencia de materiales imperfectos: pérdidas en el dieléctrico de la línea, pérdidas en los conductores, etc. Estas pérdidas siempre son pequeñas y se relacionan con una cierta porción de energía que se pierde durante la transmisión de datos.

Una línea de transmisión consiste en dos o más conductores, por ejemplo, línea de 2 conductores blindada y línea coaxial. Las líneas de transmisión coaxial son las más utilizadas en la transmisión de información en la actualidad, sobre todo en estructuras como las redes de computadores, permitiendo una alta velocidad de transmisión.

Es necesario conocer las características de una línea coaxial para establecer los efectos de la línea en el generador de señal y en el transmisor. Al conocer estos parámetros podemos calcular la impedancia característica de la línea. Usando circuitos puente se puede determinar los parámetros del circuito equivalente de una línea coaxial.

La diferencia de impedancias entre carga, línea y generador significa desadaptación en el conjunto, cuyo efecto principal es la presencia de ondas reflejadas que provoca interferencias, pérdida de información y de potencia. Una terminación incorrecta en la línea causa reflexiones de la señal aplicada a la línea, es decir, ondas que viajan en sentido contrario. Cuando dos ondas de igual amplitud, longitud y velocidad se propagan en sentido contrario, se forman ondas estacionarias. Estas ondas son aquellas donde ciertos puntos de la onda llamados nodos, permanecen inmóviles. En este tipo de ondas, las posiciones donde la amplitud es máxima se conocen como antinodos, los cuales se forman en los puntos medios entre dos nodos.

La teoría de línea de transmisión se usa para explicar la propagación de la onda en estos dispositivos. En este texto, los efectos electromagnéticos se explicarán usando líneas de 2 alambres conocidas como Línea Lecher y serán demostrados con mediciones, mediante un voltaje sinusoidal de alta frecuencia que se genera desde una fuente de señales y se aplicará a la línea Lecher.

La relación temporal de este voltaje está dada por la siguiente expresión, que será asumida en todas las expresiones subsecuentes:

$$u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Líneas con campos electromagnéticos alternos

Si se aplica un voltaje alterno a lo largo de la línea infinita de dos alambres, entonces fluirá en la línea una corriente alterna. Este efecto es referido como propagación directa de la onda. Onda es el término usado para denotar un proceso no solamente dependiente del tiempo, sino también dependiente del lugar y de las condiciones ambientales.

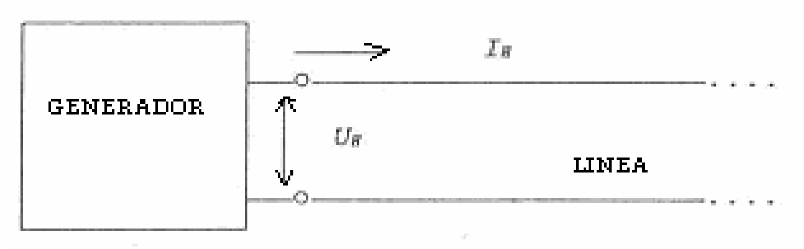


Figura 1 Variables voltaje y corriente en la línea

Cada dependencia de la condición local es exhibida por el voltaje alimentado en la línea o bien por la corriente asociada. Ambas variables se relacionan por la siguiente expresión, derivada de la ley de Ohm:

$$\frac{U_H}{I_H} = Z_L \Rightarrow U_H = Z_L \cdot I_H$$

La variable Z_L representa el factor de proporcionalidad, es decir la relación entre la corriente y el voltaje en una onda. Z_L se llama Impedancia Característica de la línea.

La expresión anterior es aplicable en cualquier parte de la línea e incluso a la entrada o punto de alimentación de ésta; la impedancia característica también representa la impedancia de entrada de una línea infinita.

En una línea sin pérdidas, los valores de Z_L dependen de los valores característicos de la línea tales como Inductancia L´, Capacitancia C´, como se puede apreciar en el circuito equivalente de la línea de la figura siguiente, que nos da la siguiente expresión:

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

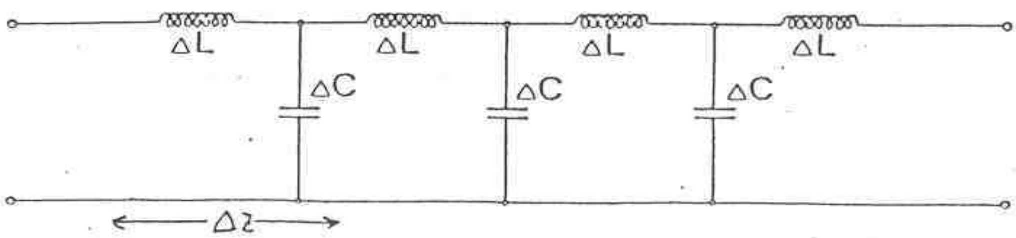


Figura 2 Circuito equivalente de una línea de transmisión sin pérdidas

La expresión anterior es válida para líneas libre de pérdidas ; cuando las pérdidas longitudinales R y las pérdidas laterales G están presentes, entonces el circuito equivalente de la figura 2, debe ser extendido a la figura 3

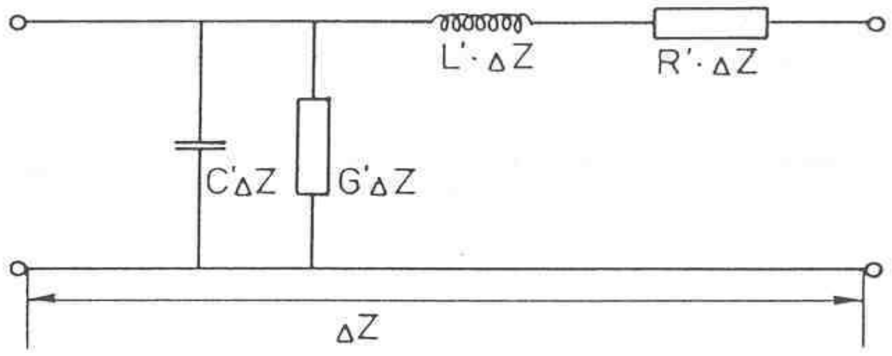


Figura 3 : Circuito equivalente de una línea con pérdidas

$$Z_L = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$$

Cada línea contiene una resistencia R, una Conductancia G, una Inductancia L y una Capacitancia C tal como se muestra en el circuito de la figura 3. Estas cuatro variables están distribuidas continuamente a lo largo de la línea. En la práctica sin embargo se refieren a una longitud definida de la línea para alta y muy altas frecuencias; la medida de referencia para las líneas de comunicación es de 1 Km. Las variables se expresan como cantidades por unidad de largo de la línea.

Para líneas sin pérdidas (por ejemplo longitudes cortas donde las pérdidas pueden ser despreciadas), la impedancia característica es independiente de la frecuencia. Realmente en líneas de longitudes largas y de baja calidad, la impedancia característica dependerá de la frecuencia y será algo más complicado calcular sus respuesta.

Las características inductancia L´ y capacitancia C´ de la línea y la impedancia característica Z_L, se pueden calcular fácilmente para líneas de dos alambres por medio de sus dimensiones geométricas.

$$Z_L = 120 \cdot \log \frac{2D}{d} \quad \Omega$$

donde $D/d \geq 2{,}5$

El valor de 120 Ω está dado para este tipo de línea de dimensiones estándar y $2D/d = e = 2{,}7182$

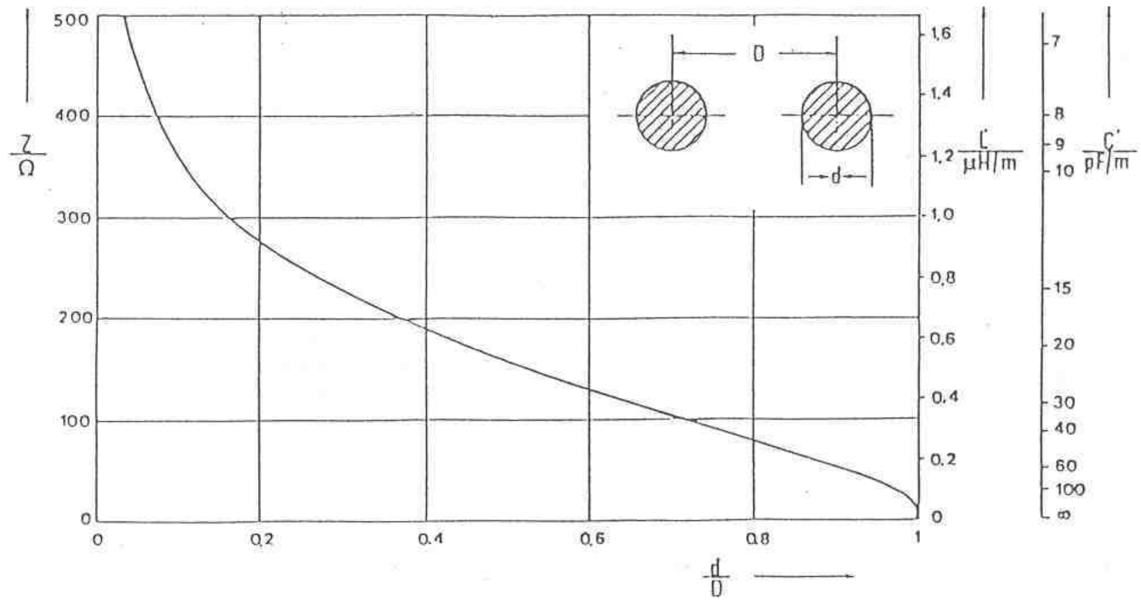


Figura 4 Determinación de la impedancia de la línea en forma geométrica

Ondas en cables coaxiales

Los cables coaxiales se utilizan para aplicaciones que requieren más exactitud y transmisiones con frecuencias muy altas (10 – 1000MHz). Los valores L`,C` y Z_L para una línea coaxial pueden ser calculados a partir de las dimensiones del cable y de la constante dieléctrica ε_r del material utilizado en el cable:

$$Z_L = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \cdot \log \frac{D}{d} \qquad \Omega$$

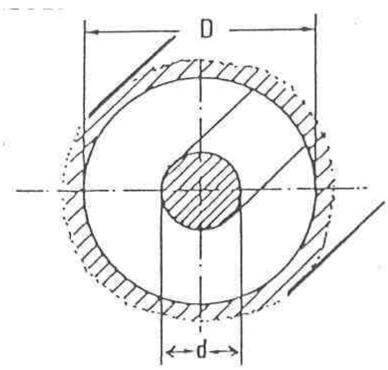


Figura 5 Línea coaxial

Otras características de la línea coaxial son:

Atenuación Voltaje y Corriente
Potencia Radiada
Capacidad de la línea

Estas cantidades dependen del diámetro (D/d) el cual puede ser optimizado

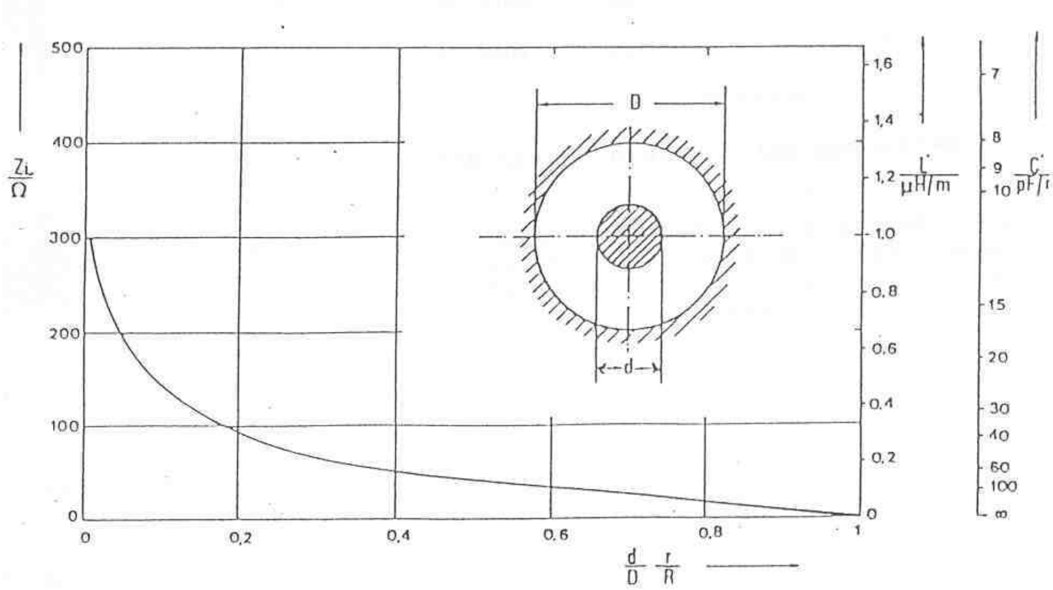


Figura 6 Determinación de Z_L

Como resultado de estas características, las dimensiones de los cables coaxiales utilizados en radio comunicaciones son estandarizados para los dieléctricos tales como polietileno $\varepsilon_r = 2,4$ y teflón $\varepsilon_r = 2,1$ La impedancia característica también será estandarizada.

Cables coaxiales

Razón D/d	**Z_L Ω**	
3,6	77	Mín. atenuación
2,718	60	Máx estabilidad de voltaje
1,65	30	Máx. grado de Potencia
12,12	150	Mín. Capacidad de línea

El cable coaxial comúnmente utilizado tiene un valor de $Z_L = 50\Omega$ debido a que tiene una atenuación baja y buena dirección de potencia para alimentación de grandes antenas como por ejemplo Receptores de T.V. En rangos VHF y UHF, la impedancia estándar es $Z_L = 75\Omega$ debido a la baja atenuación.

Propagación

El voltaje y la corriente, relacionados con la Impedancia característica, están sujetos a continuos cambios de fase durante su propagación a lo largo de la línea, comparados con la fase de entrada. Para una línea infinita sin pérdidas, matemáticamente esto puede ser representado vectorialmente con las siguientes expresiones:

$$U(z) = U_1 \cdot e^{-j \cdot \beta \cdot z} \qquad I(z) = I_1 \cdot e^{-j \cdot \beta \cdot z}$$

Los cambios de fase son producidos por elementos inductivos y capacitivos de la línea los cuales fueron vistos en el circuito equivalente.

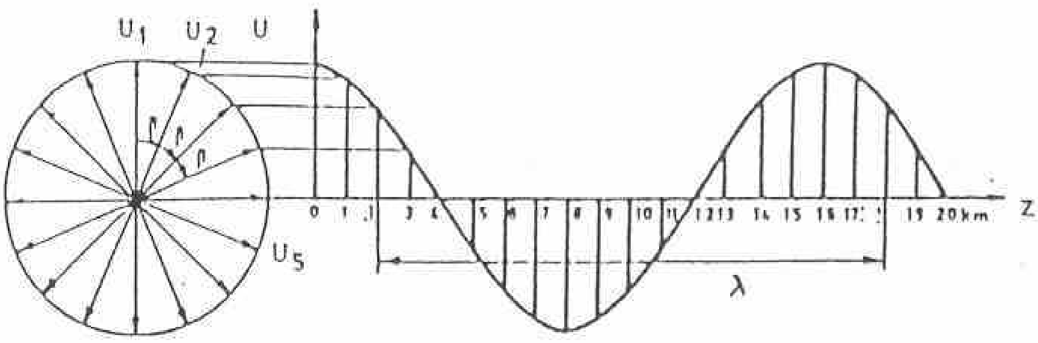


Figura 7:Cambio de fase y de voltaje a lo largo de la línea

El coeficientes de fase corresponde a :

$$\beta = \omega\sqrt{L`\cdot C`} = 2\cdot\pi\cdot f\cdot\sqrt{L`\cdot C`}$$

Este cambio de fase es la típica propagación de onda.

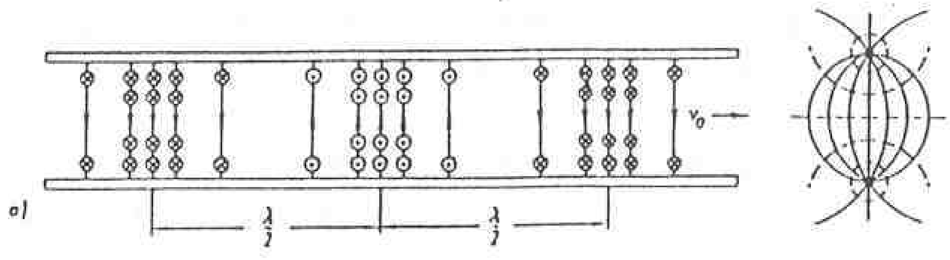
Si se consideran las variaciones de la fase del voltaje y de la corriente, o el campo electromagnético producido por U e I según lo mostrado en la figura 8, entonces puede verse que los valores en fase están repetidos a cada longitud de onda, es decir, $\lambda = 2\cdot\pi$.

Extendida para frecuencias

$$\beta\cdot\lambda\cdot f = 2\cdot\pi\cdot f = \omega$$

$$\lambda\cdot f = \frac{2\cdot\pi\cdot f}{\beta} = \frac{\omega}{\beta} = V_\phi$$

En esta expresión , V_ϕ denota la velocidad de fase con la cual la onda se propaga a lo largo de la línea.



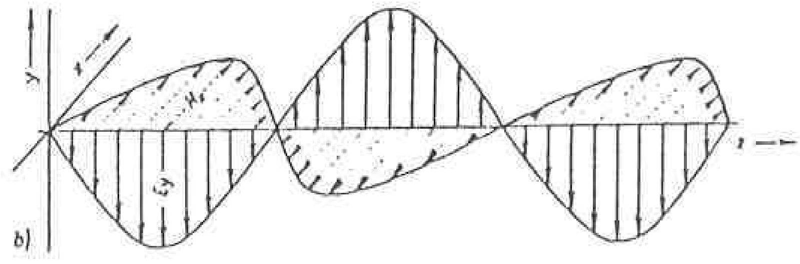


Figura 8 Líneas de campo eléctrico y magnético longitudinal y horizontal a lo largo de la línea de dos alambres

En el caso sin pérdidas, para 2 alambres o línea coaxial, la longitud de onda puede calcularse a partir de la frecuencia y la velocidad de la luz.

$$\lambda_o = \frac{c_o}{f}$$

C_0 = rapidez de la luz   f = frecuencia

Si el cable coaxial está lleno con un dieléctrico, entonces se reduce la velocidad de propagación y la longitud de onda llega a ser más pequeña

$$\lambda_\varepsilon = \frac{V\phi,\varepsilon}{f} = \frac{Co/\sqrt{\varepsilon_r}}{f}$$

Dependiendo del material usado como dieléctrico, el valor de $V_{\phi,\varepsilon}$ puede ser aproximadamente 0,6 o 0,9 veces Co.

También, el material dieléctrico entre los alambres de una línea de dos hilos puede reducir la velocidad de la propagación alrededor del 15%. Además, la velocidad de propagación se reduce en todas las frecuencias por pérdidas grandes en la línea.