

Compatibilidad Electromagnética 86.64.

Walter Gustavo Fano

Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires

gustavo.fano@ieee.org

November 24, 2020



Índice de la Presentación

- ▶ Revisión de Líneas de transmisión
- ▶ Acoplamiento capacitivo en líneas de transmisión
- ▶ Acoplamiento inductivo en líneas de transmisión
- ▶ Como reducir el acoplamiento. Ejemplos
- ▶ Inductancia mutua, ejemplos
- ▶ Apéndice dB y unidades

Propagación Electromagnética

Propagación de ondas electromagnéticas

- ▶ Propagación de ondas en el espacio.
- ▶ Propagación de ondas guiadas

Las ondas guiadas se clasifican en:

- ▶ Líneas de transmisión: estructuras de dos conductores, la propagación es transversal electromagnética (TEM) , donde E y H son perpendiculares a la dirección de propagación. Dieléctrico homogéneo en el interior.
- ▶ Guía de ondas: estructuras de un conductor, donde la propagación es transversal eléctrica o magnética (TE y TM)

Existen distintas estructuras líneas de transmisión

Líneas de transmisión

Guias de ondas

Guias de ondas flexibles comerciales Ref: Pasternak



Líneas de transmisión

Guias de ondas

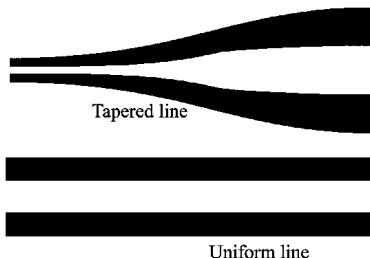
Guias de ondas rígidas comerciales Ref: Pasternak



Líneas de transmisión

Líneas uniformes y no uniformes

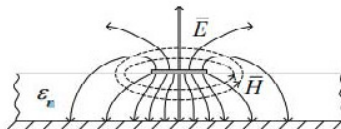
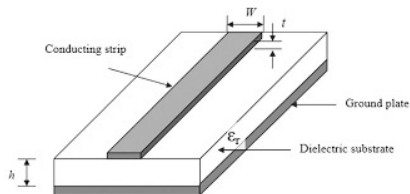
Línea de transmisión uniformes y no uniformes (ahusadas)



Ref: William F. Andress, IEEE Journal of Solid-State Circuits 2004

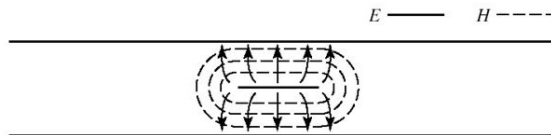
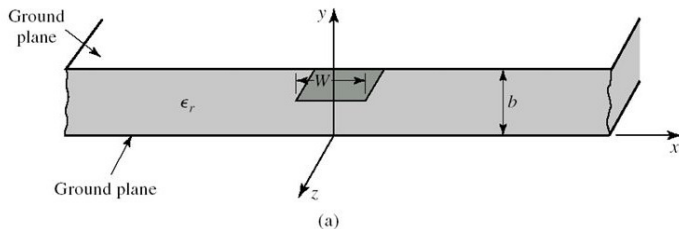
DOI:10.1109/VLSIC.2004.1346499

Microcintas (microstrips)



Modo de propagación: cuasi-TEM

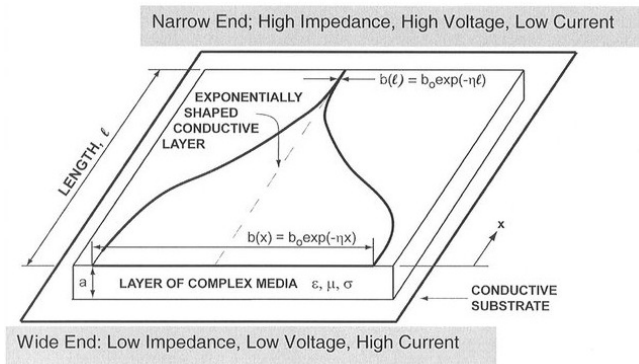
Lineas de cintas (striplines)



Modo de propagación: TEM

Líneas de transmisión

Línea de transmisión no uniformes (ahusadas)



Ref: Proceedings of the IEEE

92(7):1144-1165, DOI:10.1109/JPROC.2004.829006

Líneas de transmisión

Líneas de transmisión

Línea de transmisión coaxial Ref: Maser Communications

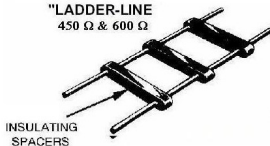


Líneas de transmisión

Varios tipos de líneas de transmisión

RF Transmission and Reception Feedline Types

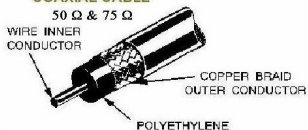
"LADDER-LINE"
450 Ω & 600 Ω



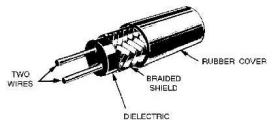
"TWIN LEAD"
300 Ω



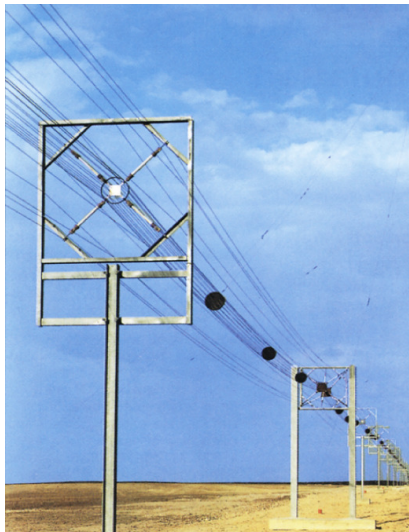
"COAXIAL CABLE"
50 Ω & 75 Ω



SHIELDED PAIR



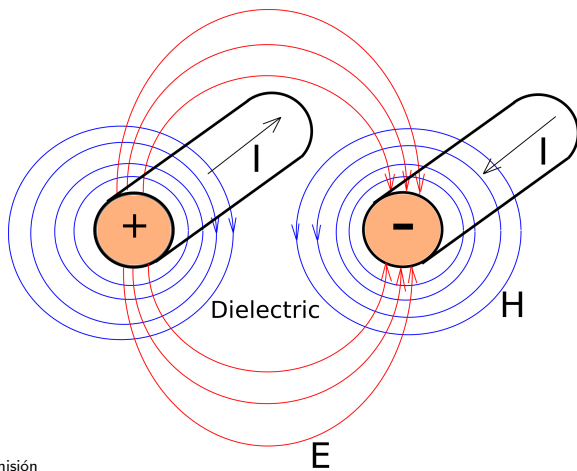
Línea de Transmisión cuasi-coaxial



Líneas de transmisión

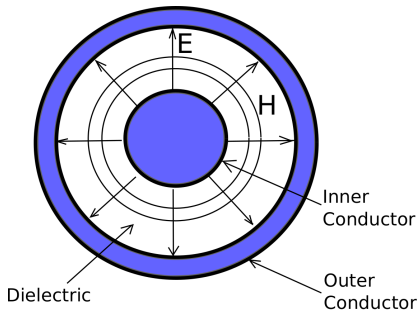
Distribución de campos E y H en una línea bifilar

Sección de una línea de transmisión de dos conductores con el campo eléctrico y magnético



Distribución de campos E y H en una línea coaxil

Sección de una línea de transmisión de coaxil con el campo eléctrico y magnético



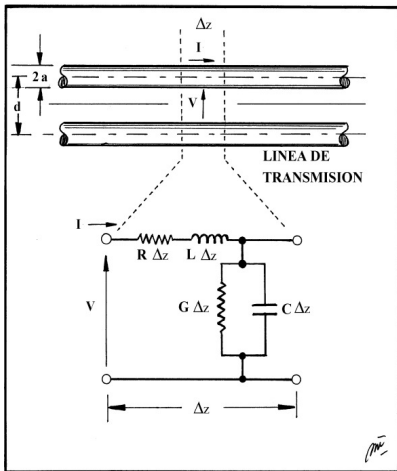
Electric and Magnetic Fields
Coaxial Transmission line

Fundamentos de líneas de transmisión

La separación entre los cilindros conductores que forman la línea de transmisión coaxial debe ser mucho más chica que la longitud de onda de la señal que se propaga: $s \ll \lambda$.

Así no se verá afectada por los modos de propagación de orden superior como el TE_{11}

Elementos distribuidos en una Línea de Transmisión



donde:

R : es la resistencia serie $[\Omega/m]$.

L : es la inductancia serie $[H/m]$.

C : es la capacidad paralelo $[F/m]$.

G : es la conductancia en paralelo $[S/m]$.

Ref: Ingeniería electromagnética
V.Trainotti y W.G.Fano.

Ed. Nueva librería, 2006

Elementos distribuidos en una Línea de Transmisión

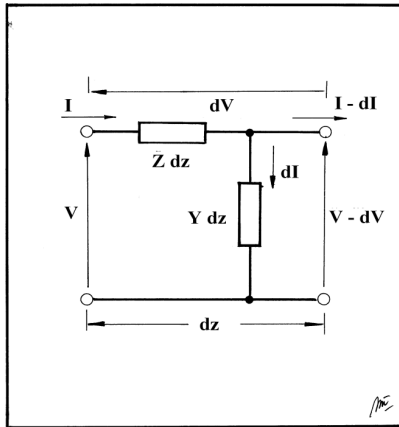


Figure:

Modelo circuital equivalente de una Línea de Transmisión

Impedancia serie y Admitancia Paralelo:

$$Z = R + j\omega L \quad (1)$$

$$Y = G + j\omega C \quad (2)$$

$$dV = IZdz \quad (3)$$

$$dI = VYdz \quad (4)$$

$$\frac{dV}{dz} = IZ \quad (5)$$

$$\frac{dI}{dz} = VY \quad (6)$$

Modelo circuital equivalente. Ondas de V e I

$$\frac{d^2 V}{dz^2} = \frac{dI}{dz} Z + I \frac{dZ}{dz} \quad (7)$$

$$\frac{d^2 I}{dz^2} = \frac{dV}{dz} Y + V \frac{dY}{dz} \quad (8)$$

Reemplazando las derivadas y asumiendo líneas uniformes ($dZ/dz = 0$ y $dY/dz = 0$):

$$\frac{d^2 V}{dz^2} = VYZ \quad (9)$$

$$\frac{d^2 I}{dz^2} = IZY \quad (10)$$

$$V = C_1 e^{z\sqrt{ZY}} + C_2 e^{-z\sqrt{ZY}} \quad (11)$$

$$I = D_1 e^{z\sqrt{ZY}} + D_2 e^{-z\sqrt{ZY}} \quad (12)$$

Línea de Transmisión genérica

Constante de Propagación:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{ZY} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (13)$$

Impedancia Característica:

$$Z_0 = \frac{V_{inc}}{I_{inc}} = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (14)$$

Impedancia en la línea

$$Z(z) = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 Th(\gamma z)}{Z_0 + Z_L Th(\gamma z)} \quad (15)$$

Velocidad de propagación:

$$v = \frac{\omega}{\beta} \quad (16)$$

Línea de Transmisión sin pérdidas

Línea de transmisión sin pérdidas: Constante de Propagación ($\alpha = 0$):

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\beta = j\omega\sqrt{LC} \quad (17)$$

Impedancia Característica:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (18)$$

Impedancia en la línea

$$Z(z) = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 j \operatorname{tg}(\beta z)}{Z_0 + Z_L j \operatorname{tg}(\beta z)} \quad (19)$$

Velocidad de propagación:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (20)$$

Propagación de ondas guiadas

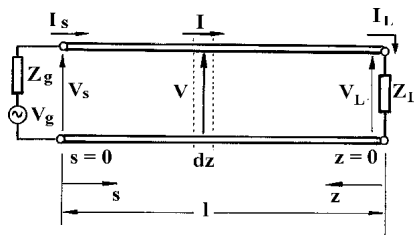


Figure:

Propagación en una Línea de Transmisión

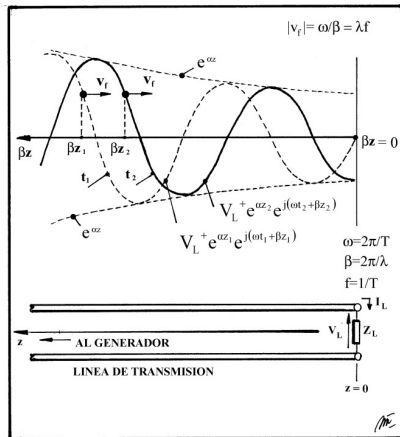


Figure: Línea de Transmisión con pérdidas

Línea de Transmisión con reflexiones

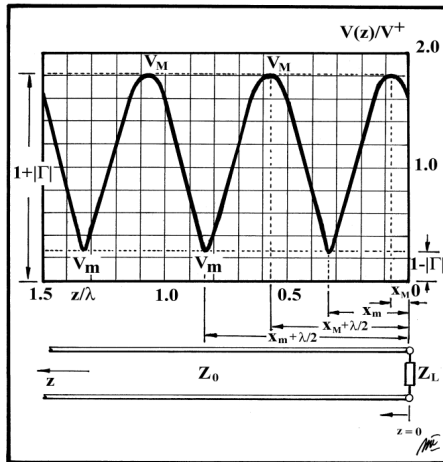


Figure: Onda estacionaria

Línea de Transmisión con reflexiones

Coeficiente de Reflexión :

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (21)$$

Relación de ondas estacionarias:

$$ROE = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (22)$$

Acoplamiento capacitivo en Líneas de Transmisión

Recordando en que la corriente que circula será proporcional a la capacidad y a la variación de tensión en función del tiempo:

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \quad (23)$$

El nivel de interferencia dependerá de las variaciones de tensión respecto al tiempo y del valor de la capacidad de acople entre la fuente y la víctima.

$$I(\omega) = j\omega CV(\omega) \quad (24)$$

Acoplamiento capacitivo en Líneas de Transmisión

La capacidad de acople aumentará con:

- ▶ La frecuencia
- ▶ La proximidad de la fuente a la víctima y la longitud de los cables paralelos
- ▶ La altura de los cables con respecto al plano de referencia de tierra
- ▶ La impedancia de entrada del circuito de la víctima (circuitos con alta impedancia de entrada son mas vulnerables).
- ▶ La aislación del cable de la víctima (permitividad eléctrica del cable de aislación), particularmente en pares acoplados.

Acoplamiento capacitivo en Líneas de Transmisión

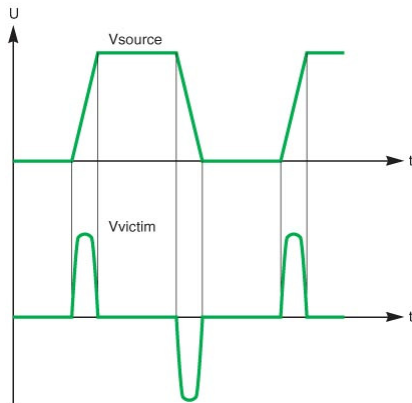


Figure: Fuente: Coupling mechanisms and counter-measures, Author: Electrical Installation Guide contributors

Acoplamiento capacitivo en Líneas de Transmisión. Ejemplos

- ▶ Cercanía de otros cables sujetos a una rápida variación de (dv/dt).
- ▶ Arranque de tubos Fluorescentes o lámparas de bajo consumo.
- ▶ Fuentes de alimentación de switching de alta tensión (fotocopiadoras, etc).
- ▶ Acoplamiento capacitivo entre el primario y secundario de transformadores.
- ▶ Cross talk entre cables.

Acoplamiento capacitivo en Líneas de Transmisión

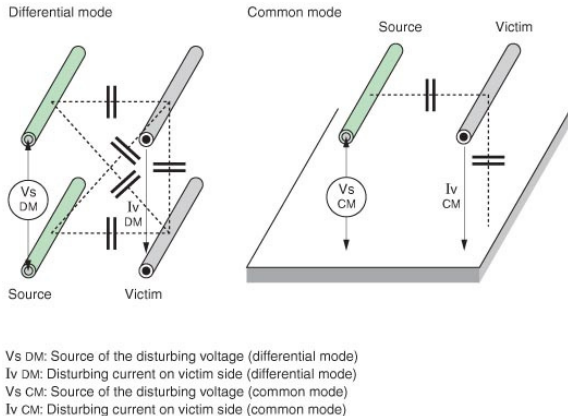


Figure: Fuente: Coupling mechanisms and counter-measures, Author: Electrical Installation Guide contributors

Acoplamiento capacitivo en Líneas de Transmisión. Contramedidas.

- ▶ Limitar la longitud de cables paralelos entre los generadores y victimas.
- ▶ Aumentar la distancia entre la línea que provoca el ruido y la víctima.
- ▶ Para dos cables, colocarlos tan próximos como sea posible.
- ▶ colocar un PEC entre el generador y víctimas.
- ▶ Emplear dos o cuatro cables en lugar de conductores individuales.
- ▶ Usar sistemas de transmisión simétricos.
- ▶ Blindar el que ocasiona el ruido, la víctima o ambos.
- ▶ Reducir el dv/dt del que ocasiona el ruido aumentando el rise time cuando sea posible.

Acoplamiento capacitivo en Líneas de Transmisión. Contramedidas.

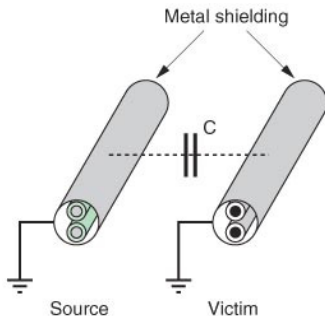


Figure: Cables blindados con perforaciones reducen el acoplamiento capacitivo. Fuente: Coupling mechanisms and counter-measures, Author: Electrical Installation Guide contributors

Acoplamiento inductivo en Líneas de Transmisión.

Recordando en que la tensión será proporcional a la inductancia y a la variación de corriente en función del tiempo:

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (25)$$

En el dominio de la frecuencia se tiene:

$$V(\omega) = j\omega LI(\omega) \quad (26)$$

Acoplamiento inductivo en Líneas de Transmisión.

La línea origen y la víctima están acopladas por medio de campos magnéticos. El nivel de ruido depende de las variaciones de corrientes (di/dt) y de la inductancia mutua. El acoplamiento inductivo aumenta con:

- ▶ La frecuencia.
- ▶ La proximidad de la fuente de ruido a la víctima y la longitud de los cables paralelos
- ▶ La altura de los cables respecto al plano de referencia de tierra.
- ▶ La impedancia de carga del circuito origen del ruido.

Acoplamiento inductivo en Líneas de Transmisión.

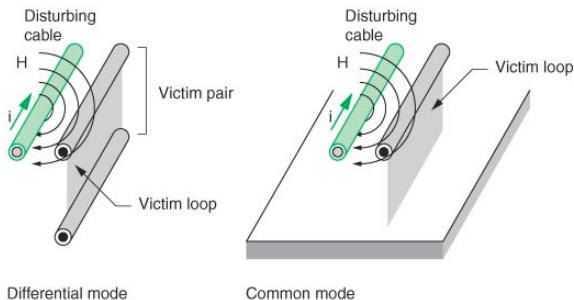


Figure: Fuente: Coupling mechanisms and counter-measures, Author: Electrical Installation Guide contributors

Acoplamiento inductivo en Líneas de Transmisión. Contramedidas.

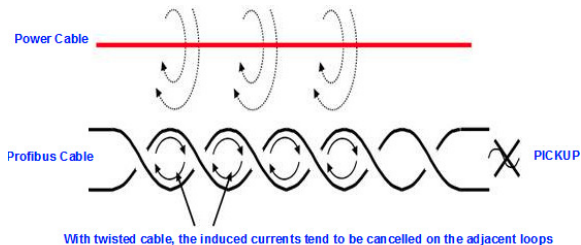
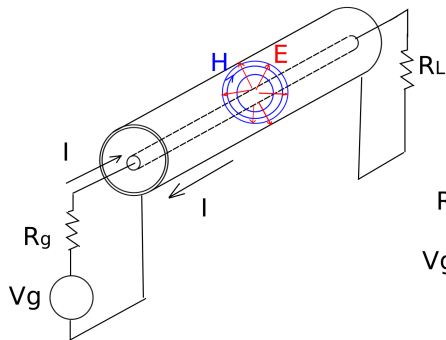


Figure: Fuente: <http://www.smar.com/en/index>

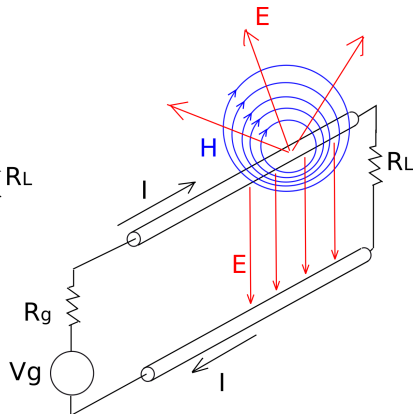
Blindaje de Cables. Fundamentos

- ▶ El blindaje reduce el acoplamiento de la Interferencia Electromagnética externa con el cable
- ▶ El blindaje reduce las emisiones de Interferencia Electromagnética hacia el exterior del cable.
- ▶ En el caso del Cable coaxil el blindaje da un camino de retorno de la señal.

Línea de Transmisión con y sin blindaje



Linea Coaxial

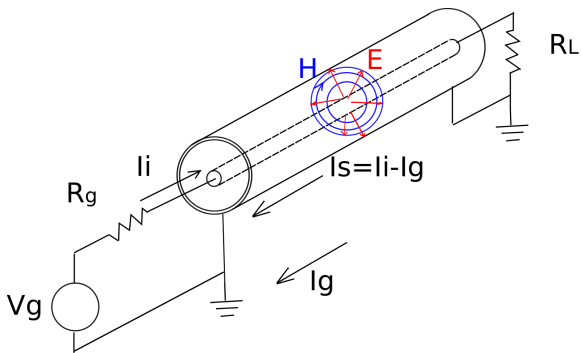


Linea Bifilar

Ejemplo Coaxil y Línea Bifilar

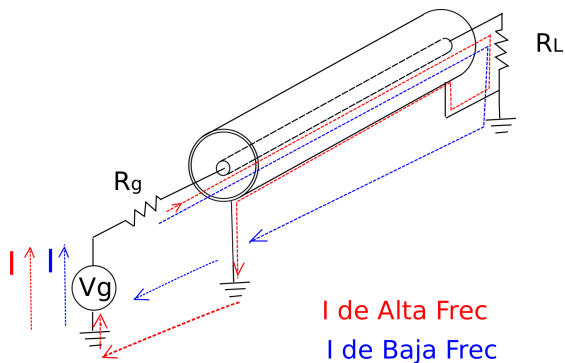
- ▶ En la línea de transmisión Coaxial el blindaje mantiene confinados los campos E y H que genera el conductor central.
- ▶ En la línea de transmisión Bifilar los campos E y H los campos E y H generados por los conductores no están confinados y se distribuyen en el espacio.

Caso de Coaxil a Tierra



Linea Coaxial

Caso de Coaxil a Tierra



Línea Coaxial a tierra en las terminaciones

Crosstalk.

Definición: Se refiere al acoplamiento entre las líneas de transmisión, o entre las líneas y el PCB. Ejemplo: Las computadoras actualmente trabajan a frecuencias de microondas. Por lo tanto el crosstalk entre conductores y pistas del circuito impreso se hacen importantes. Para estudiar como funciona el crosstalk se debe tener una línea de transmisión de 3 o más conductores.

Crosstalk.

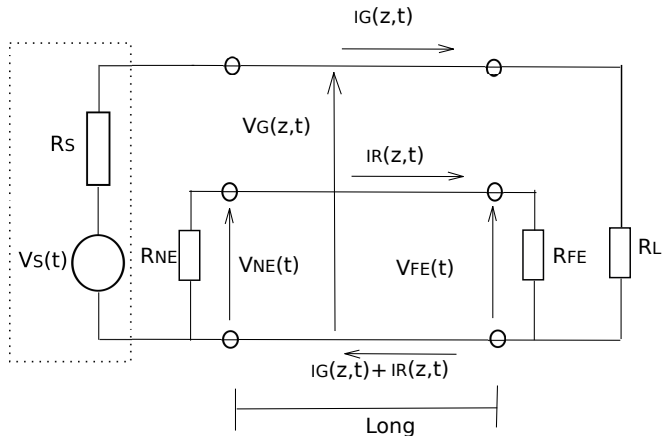


Figure: Línea de transmisión de dos conductores con el agregado de un tercer conductor para estudiar crosstalk

Líneas de transmisión

Crosstalk. Componentes del circuito anterior

RNE y RFE son resistencias para ilustrar el problema, pero en un caso mas general se pueden incluir Capacidades e inductancias
IR y VR estaran generadas por las tensiones y corrientes del
circuito generador.

IR corriente inducida.

VR tensión inducida.

VNE tensión near end

VFE tensión far end

Crosstalk.

El objetivo del crosstalk es determinar $VNE(t)$ y $VFE(t)$, dadas las dimensiones de las líneas, y las terminaciones VS , RS , RL , RNE y RFE .

Hay dos tipos de análisis

- a) Análisis en el dominio del tiempo Se busca $VNE(t)$ y $VFE(t)$ para una excitación general $Vs(t)$.
- b) Análisis en el dominio de la frecuencia Se busca $VNE(\omega)$ y $VFE(\omega)$ para una excitación $Vs(t) = Vscos(\omega t + \phi)$

Apéndice. Decibels y Unidades

Se define el decibel como:

$$P(dB) = 10 \log \frac{P_1}{P_0} \quad (27)$$

Si la relación es en tensión o corriente:

$$P(dB) = 10 \log \frac{V_1^2/Z}{V_0^2/Z} = 20 \log \frac{V_1}{V_0} \quad (28)$$

$$P(dB) = 10 \log \frac{I_1^2 Z}{I_0^2 Z} = 20 \log \frac{I_1}{I_0} \quad (29)$$

Apéndice. Decibels y Unidades

Si la referencia es $1V$, $1mV$, $1\mu V$:

$$X(dBV) = 20\log \frac{V_1}{1V} \quad (30)$$

$$X(dBmV) = 20\log \frac{V_1}{1mV} \quad (31)$$

$$X(dB\mu V) = 20\log \frac{V_1}{1\mu V} \quad (32)$$

Apéndice. Decibels y Unidades

Si la referencia es $1A$, $1mA$, $1\mu A$:

$$X(dBA) = 20\log \frac{I_1}{1A} \quad (33)$$

$$X(dBmA) = 20\log \frac{I_1}{1mA} \quad (34)$$

$$X(dB\mu A) = 20\log \frac{I_1}{1\mu A} \quad (35)$$

Apéndice. Decibeles y Unidades

Si la referencia es $1W$, $1mW$, $1\mu W$:

$$X(dBW) = 20\log \frac{W_1}{1W} \quad (36)$$

$$X(dBmW) = 20\log \frac{W_1}{1mW} \quad (37)$$

$$X(dB\mu W) = 20\log \frac{W_1}{1\mu W} \quad (38)$$

Bibliografía

- ▶ Henry W. Ott, Electromagnetic Compatibility Engineering. Wiley, 2009.
- ▶ Clayton Paul, Introduction to EMC 2nd Edition. Wiles Interscience, 2006.
- ▶ D.K.Cheng: *Fundamentos de Electromagnetismo para Ingeniería*. Addison Wesley, Mexico, 1998.
- ▶ Valentino Trainotti, Walter Gustavo Fano y Luis Antonio Dorado: *Ingeniería electromagnética*, Tomo II., Editorial Nueva Libreria, Argentina, 2005.