

Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR)

Carlos A. Zerbini

Cátedra Medidas Electrónicas 2

Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Córdoba

Año lectivo 2020

Agenda

- ❑ Líneas de transmisión y la técnica de TDR
- ❑ Parámetros medidos
- ❑ Medición de cargas y desadaptaciones
 - ❑ Impedancias reales
 - ❑ Impedancias complejas
- ❑ Pérdidas en una línea: serie y paralelo
- ❑ Discontinuidades en una línea
 - ❑ Puntos de discontinuidad
 - ❑ Discontinuidades múltiples
- ❑ Limitaciones de la técnica TDR
 - ❑ Generador desadaptado
 - ❑ Resolución en espacio/tiempo y error de amplitud
- ❑ Escalón vs. pulso
- ❑ Casos de medición

Agenda

- ❑ Líneas de transmisión y la técnica de TDR
- ❑ Parámetros medidos
- ❑ Medición de cargas y desadaptaciones
 - ❑ Impedancias reales
 - ❑ Impedancias complejas
- ❑ Pérdidas en una línea: serie y paralelo
- ❑ Discontinuidades en una línea
 - ❑ Puntos de discontinuidad
 - ❑ Discontinuidades múltiples
- ❑ Limitaciones de la técnica TDR
 - ❑ Generador desadaptado
 - ❑ Resolución en espacio/tiempo y error de amplitud
- ❑ Escalón vs. pulso
- ❑ Casos de medición

Líneas de transmisión y la técnica de TDR

- **Línea de transmisión:** sistema de conductores empleado para transmitir información entre dos puntos en la forma de energía eléctrica o electromagnética
- La técnica TDR utiliza como **estímulo una señal con múltiples componentes en frecuencia**, y analiza la respuesta del sistema a esta señal **en el dominio del tiempo**. Es decir, TDR no discrimina la respuesta del sistema a cada una de las componentes en frecuencia, sino que brinda información precisa de la respuesta conjunta a todas ellas en el tiempo.
- La técnica es válida cuando **la longitud de línea es comparable a las longitudes de onda de las componentes de mayor frecuencia ($f_{\text{máx}}, \lambda_{\text{mín}}$) de la señal estímulo**. Si la línea es mucho más corta que $\lambda_{\text{mín}}$, la línea se comportará de acuerdo a las leyes de la teoría de circuitos.

Líneas de transmisión y la técnica de TDR

Características principales de una LdT

Z_o: impedancia característica, ésta depende de su geometría (características mecánicas).

α: constante de atenuación de la línea. Toda línea presenta atenuación, expresada en [dB/unid. longitud] o [Np/unid. longitud]. La atenuación es **en general función de la frecuencia**.

β: constante de fase de la línea. Indica el defasaje la tensión en la línea por unidad de longitud [rad/long. Unit]. Es **función de la frecuencia**.

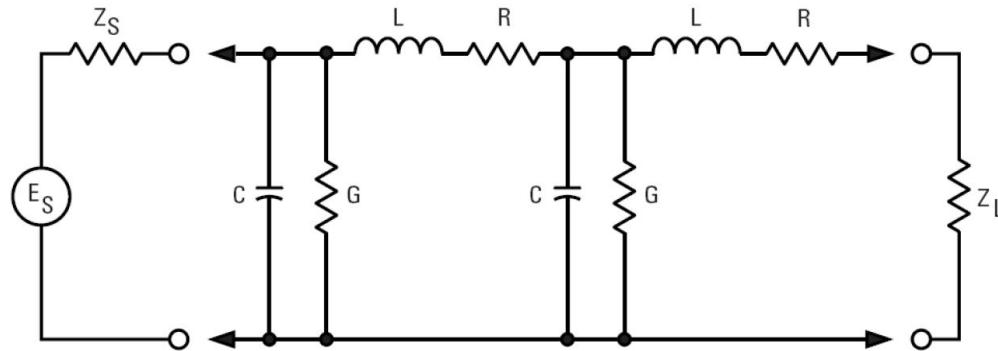
γ: constante de propagación de la línea. **Agrupa los efectos** de **α** y **β**, permitiendo saber:

- Cuánto **se atenúa** una señal de cierta frecuencia entre dos puntos de la línea
- Cuánto **se desfasa** una señal de cierta frecuencia entre dos puntos de la línea

V_p: velocidad de propagación. Como el medio que se está usando en una línea de transmisión es el dieléctrico, ya que la onda electromagnética se propaga por aquí, la velocidad de propagación depende de la permeabilidad eléctrica ϵ_r del dieléctrico.

Líneas de transmisión y la técnica de TDR

La propagación de una señal por la LdT se puede **modelar** mediante **constantes distribuidas L , C y R**



L: Inductancia serie distribuida [Hy/unid. long.], modela el proceso de almacenamiento energético en forma de campo magnético alrededor de los conductores.

C: capacitancia paralelo distribuida [Fd/unid. long.] modela el proceso de almacenamiento energético en forma de campo eléctrico entre los conductores de la línea.

R: resistencia distribuida [Ω /unid. long.] disipación de potencia debido a la no idealidad de los conductores (**pérdidas óhmicas**).

G: conductancia paralelo distribuida [mho o Siemens/unid. long], modela la disipación de potencia que se produce por la no idealidad del **medio dieléctrico (pérdidas dieléctricas)**.

Líneas de transmisión y la técnica de TDR

Los parámetros físicos y sus contrapartes en el modelo distribuido se pueden relacionar:

$$Z_{in} = Z_0 = \sqrt{\frac{R+jwL}{G+jwC}} \text{ Impedancia caracteristica}$$

$$\text{Para bajas perdidas } R \text{ y } G : Z_0 \approx \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + jwL)(G + jwC)} \text{ Constante de propagacion}$$

Siendo :

$$V_p = \frac{w}{\beta} = \frac{V_c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$V_c = \text{velocidad de la luz} \approx 3.10^8 \text{ m/s}$$

$$\epsilon_r = \text{constante dielectrica de la linea}$$

Para una onda progresiva de tensión E_{in} que se propaga por la línea, se cumple que:

$$E_x = E_{in} e^{-\gamma x}, I_x = I_{in} e^{-\gamma x} \text{ A distancia } x \text{ del generador}$$

$$Z_0 = \frac{E_{in} e^{-\gamma x}}{I_{in} e^{-\gamma x}} = \frac{E_{in}}{I_{in}} = Z_{in}$$

Líneas de transmisión y la técnica de TDR

Para una onda de tensión E_{in} que se propaga por la línea, se pueden dar **dos casos principales**:

1. Líneas de longitud infinita (teóricas), o líneas con carga adaptada ($Z_L = Z_0$):

$$E_x = E_{in} e^{-\gamma x}, \quad I_x = I_{in} e^{-\gamma x} \quad A \text{ distancia } x \text{ del generador}$$

$$Z_0 = \frac{E_{in} e^{-\gamma x}}{I_{in} e^{-\gamma x}} = \frac{E_{in}}{I_{in}} = Z_{in}$$

2. Líneas con carga desadaptada ($Z_L \neq Z_0$): se produce una **segunda onda**, proveniente de la carga y que también se atenúa y se desfasa según lo dicta el parámetro γ . La **suma de ambas ondas determina los valores de E_x y Z_x** . Z_x **NO SERÁ AHORA CONSTANTE, sino que dependerá del punto de la línea que se considere**. Se introducen dos nuevos parámetros:

$$\rho = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \leq 1 \quad \text{Coef de reflexion (VECTORIAL)}$$

$$VSWR = \sigma = \frac{1+|\rho|}{1-|\rho|} \geq 1 \quad \text{Relacion de onda estacionaria de tension (ESCALAR)}$$

Líneas de transmisión y la técnica de TDR

LA VSWR o ROE mide la calidad *del sistema en conjunto*. NO indica detalles tales como:

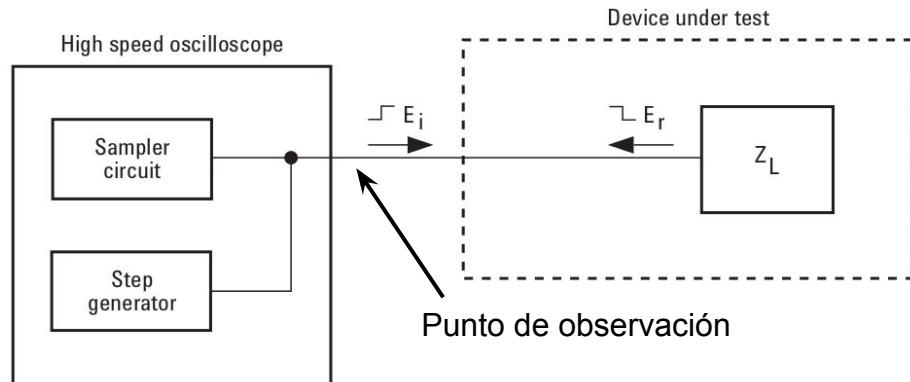
- **CUAL de los componentes del sistema ocasiona las reflexiones**
- **Si puede haber reflexiones que se CANCELEN ENTRE SÍ**
- **EN QUÉ LUGARES DE LA LÍNEA se producen las desadaptaciones**

Esta información es brindada por las técnicas TDR, en una medición que no diferencia componentes en frecuencia (como lo hace por ej el VNA), sino que evalúa la RESPUESTA TEMPORAL Y ESPACIAL del sistema.

Agenda

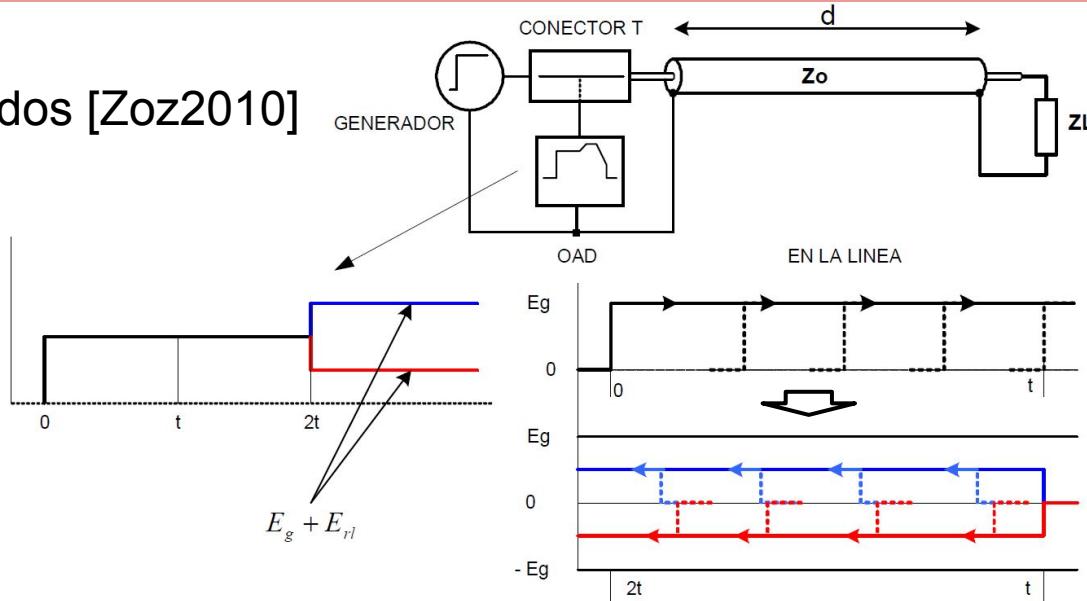
- ❑ Líneas de transmisión y la técnica de TDR
- ❑ Parámetros medidos
- ❑ Medición de cargas y desadaptaciones
 - ❑ Impedancias reales
 - ❑ Impedancias complejas
- ❑ Pérdidas en una línea: serie y paralelo
- ❑ Discontinuidades en una línea
 - ❑ Puntos de discontinuidad
 - ❑ Discontinuidades múltiples
- ❑ Limitaciones de la técnica TDR
 - ❑ Generador desadaptado
 - ❑ Resolución en espacio/tiempo y error de amplitud
- ❑ Escalón vs. pulso
- ❑ Casos de medición

Parámetros medidos



- Casos
- a) $Z_L = Z_0 \rightarrow E_r = 0 \rightarrow$ en el osciloscopio se observa el escalón (o pulso, según se verá) E_i a medida que pasa por el punto de observación.
 - b) $Z_L \neq Z_0 \rightarrow E_r \neq 0 \rightarrow$ se produce una **onda reflejada que se suma algebraicamente a la onda incidente luego de un tiempo de propagación**
- Mediciones
- a) **TIEMPO de arribo de la reflexión T_d → Localización espacial de la carga o discontinuidad $D = (V_p \cdot T_d) / 2$**
 - b) **FORMA de la onda reflejada → NATURALEZA Y MAGNITUD de la desadaptación/carga → $\rho = E_r / E_i = (Z_L - Z_0) / (Z_L + Z_0)$**

Parámetros medidos [Zoz2010]

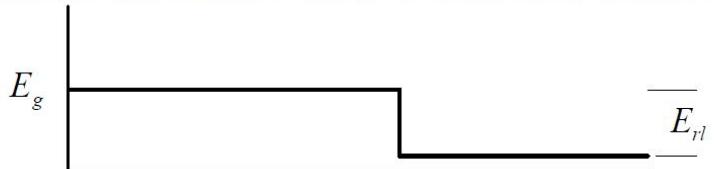


Mediciones:

Conociendo

- E_g y Z_o es posible determinar el valor de la carga
- V_p y t se puede determinar la distancia a la carga usando $d = \frac{V_p}{t}$
- d y t la velocidad de propagación $V_p = \frac{d}{t}$
- La atenuación α colocando un corto circuito en el extremo de la línea el valor final de E_{rl} es comparado con E_g

$$\alpha = 10 \log \frac{E_{rl}}{E_g}$$



$$\begin{aligned} E_{total} &= E_g + E_r \\ &= (1 + \rho) E_g \end{aligned}$$

(SUMA ALGEBRAICA)

$$t = \frac{V_p}{d}$$

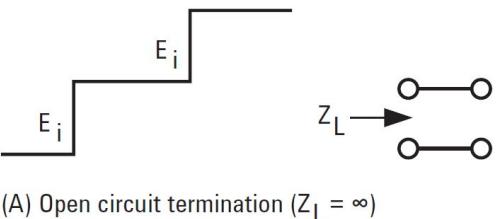
$$E_{rl} = \rho E_g \quad \begin{cases} + para Z_L \triangleright Z_o \\ - para Z_L \triangleleft Z_o \end{cases}$$

Agenda

- ❑ Líneas de transmisión y la técnica de TDR
- ❑ Parámetros medidos
- ❑ Medición de cargas y desadaptaciones
 - ❑ Impedancias reales
 - ❑ Impedancias complejas
- ❑ Pérdidas en una línea: serie y paralelo
- ❑ Discontinuidades en una línea
 - ❑ Puntos de discontinuidad
 - ❑ Discontinuidades múltiples
- ❑ Limitaciones de la técnica TDR
 - ❑ Generador desadaptado
 - ❑ Resolución en espacio/tiempo y error de amplitud
- ❑ Escalón vs. pulso
- ❑ Casos de medición

Medición de cargas/desadaptaciones [HPAN62]

a) Impedancias reales

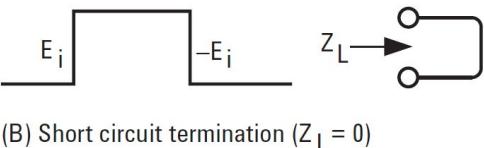


$$E_r = E_i \text{ (abierto)}$$

$$\text{Therefore } \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = +1$$

Which is true as $Z_L \rightarrow \infty$

$$\therefore Z = \text{Open circuit}$$



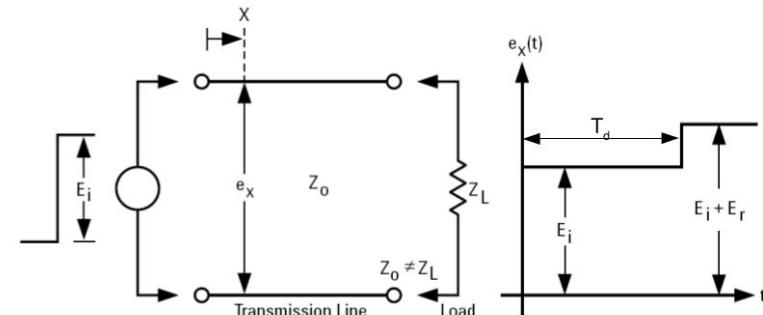
$$E_r = -E_i \text{ (corto)}$$

$$\text{Therefore } \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = -1$$

Which is only true for finite Z_0

$$\text{When } Z_L = 0$$

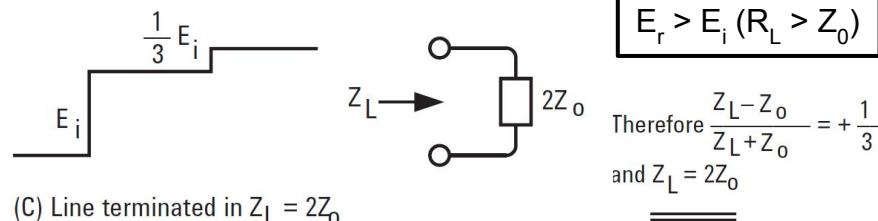
$$\therefore Z = \text{Short circuit}$$



$$E_r > E_i \text{ (R}_L > Z_0\text{)}$$

$$\text{Therefore } \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = +\frac{1}{3}$$

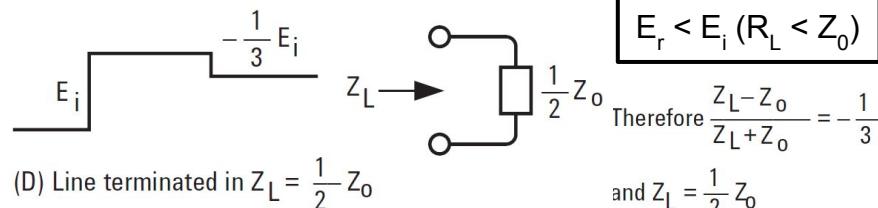
and $Z_L = 2Z_0$



$$E_r < E_i \text{ (R}_L < Z_0\text{)}$$

$$\text{Therefore } \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = -\frac{1}{3}$$

and $Z_L = \frac{1}{2} Z_0$

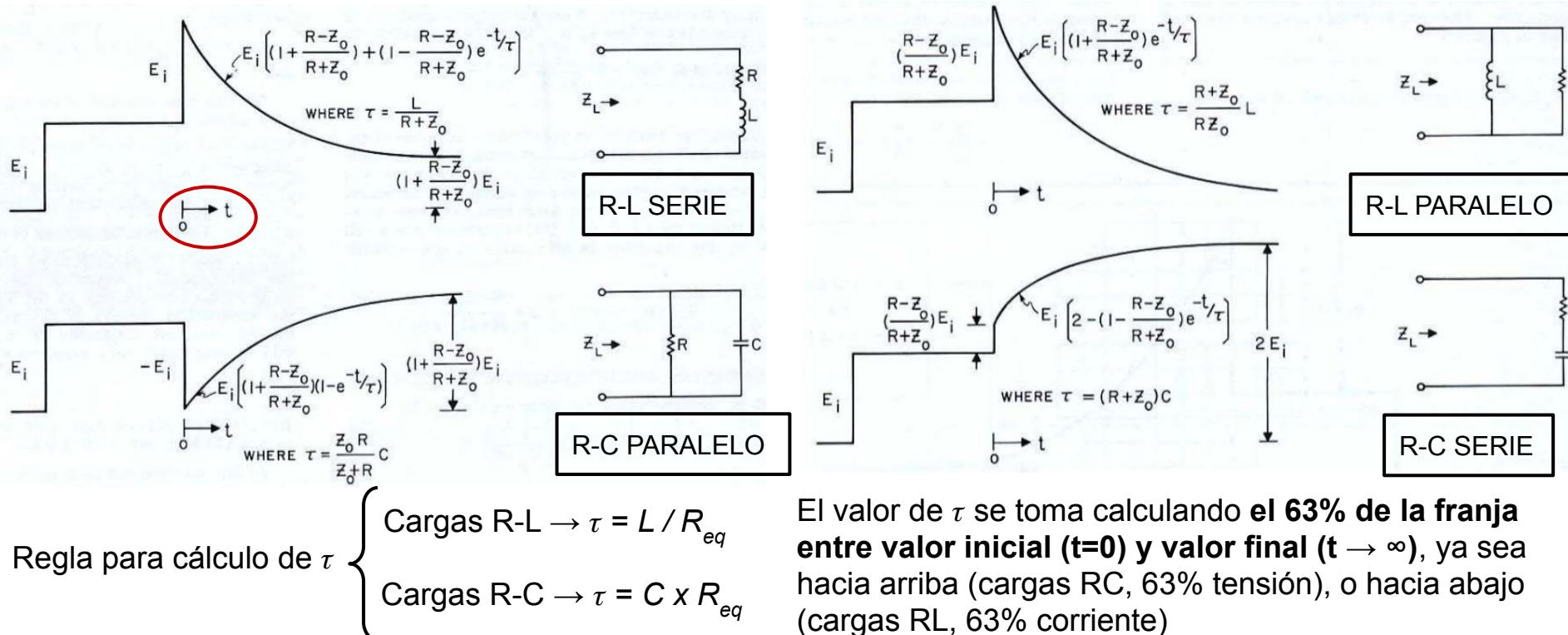


Agenda

- ❑ Líneas de transmisión y la técnica de TDR
- ❑ Parámetros medidos
- ❑ Medición de cargas y desadaptaciones
 - ❑ Impedancias reales
 - ❑ Impedancias complejas**
- ❑ Pérdidas en una línea: serie y paralelo
- ❑ Discontinuidades en una línea
 - ❑ Puntos de discontinuidad
 - ❑ Discontinuidades múltiples
- ❑ Limitaciones de la técnica TDR
 - ❑ Generador desadaptado
 - ❑ Resolución en espacio/tiempo y error de amplitud
- ❑ Escalón vs. pulso
- ❑ Casos de medición

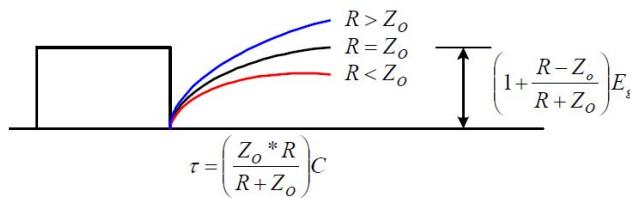
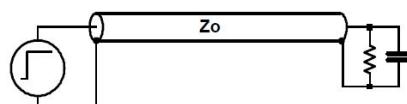
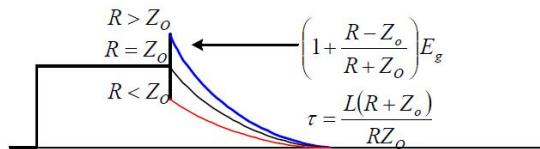
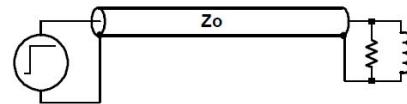
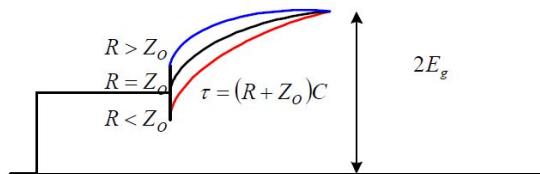
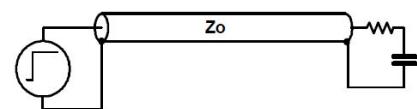
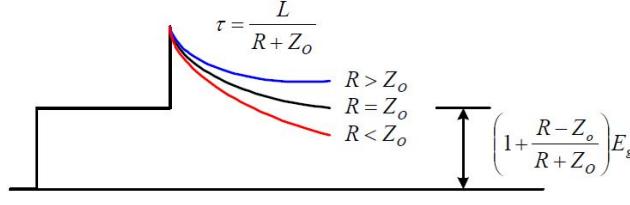
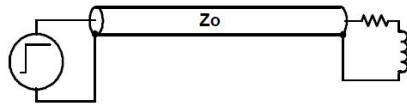
Medición de cargas/desadaptaciones [HPAN62]

b) Impedancias complejas: a diferencia del análisis con VNA, que arrojaba un número complejo, en este caso nos interesan los **valores inicial/final**, y la **constante de decaimiento τ**

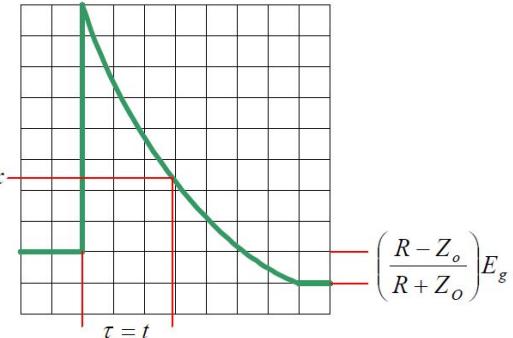


Medición de cargas/desadaptaciones [Zoz2010]

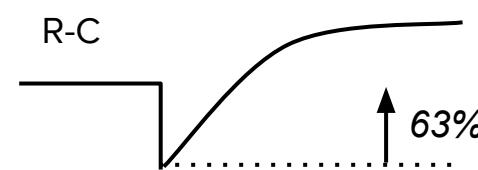
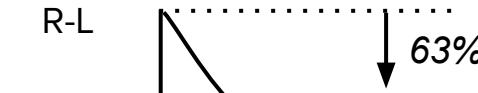
b) Impedancias complejas



Pregunta: ¿Cómo es la respuesta para cargas C o L PURAS?



$$\tau = \frac{L}{R + Z_o}$$

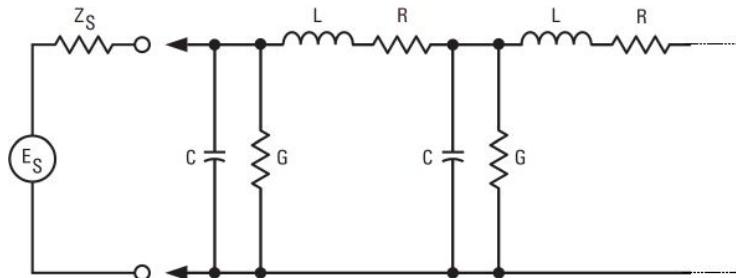


Agenda

- ❑ Líneas de transmisión y la técnica de TDR
- ❑ Parámetros medidos
- ❑ Medición de cargas y desadaptaciones
 - ❑ Impedancias reales
 - ❑ Impedancias complejas
- ❑ Pérdidas en una línea: serie y paralelo
- ❑ Discontinuidades en una línea
 - ❑ Puntos de discontinuidad
 - ❑ Discontinuidades múltiples
- ❑ Limitaciones de la técnica TDR
 - ❑ Generador desadaptado
 - ❑ Resolución en espacio/tiempo y error de amplitud
- ❑ Escalón vs. pulso
- ❑ Casos de medición

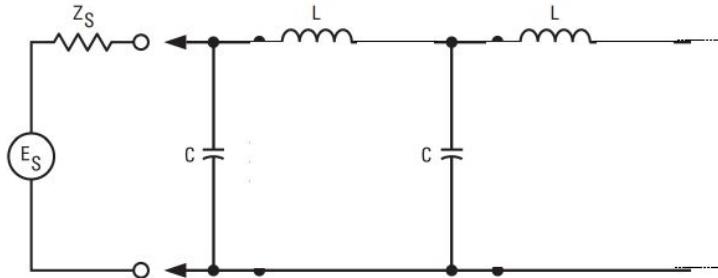
Pérdidas en una línea

Se estudia el efecto que tienen las pérdidas de la línea **sobre la forma del escalón incidente ($t=0^+$)**

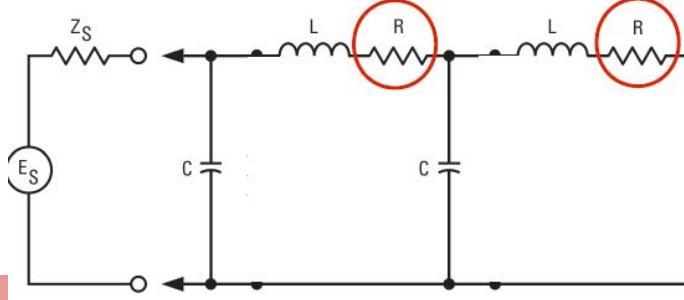


Línea con pérdidas en serie y en paralelo

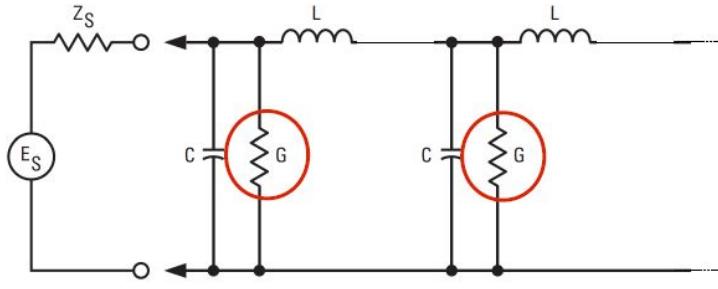
$$Z_0 = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} \quad \text{Impedancia compleja}$$



Línea sin pérdidas



Línea con pérdidas en serie



Línea con pérdidas en paralelo

Pérdidas en una línea: pérdidas en serie

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} \quad \text{Consideramos IMPEDANCIA!}$$

$$Z_{in} \approx \sqrt{\frac{R+j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \left(1 + \frac{R}{j\omega L}\right)^{1/2}$$

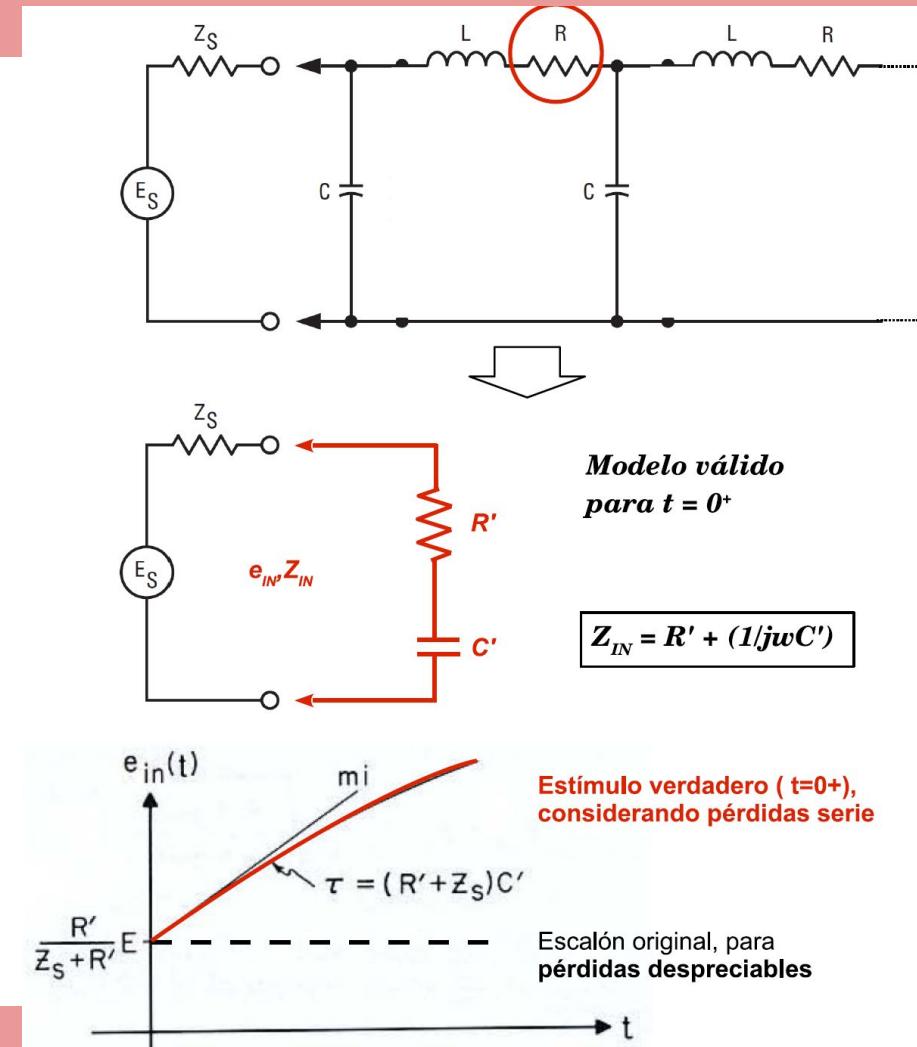
En el flanco ascendente ($t=0^+$), ω es muy grande y $R \ll \omega L$, entonces podemos aplicar:

$$(1+x)^a|_{x<<1} \approx 1+ax$$

$$Z_{in}|_{t=0^+} \approx \sqrt{\frac{L}{C}} \left(1 + \frac{R}{j2\omega L}\right)$$

Esta ecuación sigue la forma de un circuito equivalente R-C serie, donde:

$$R' = \sqrt{\frac{L}{C}}; \quad C' = \frac{2L}{R} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}$$



Pérdidas en una línea: pérdidas en paralelo

$$Y_{in} = \frac{1}{Z_{in}} = \sqrt{\frac{G+j\omega C}{R+j\omega L}}$$

Consideramos ADMITANCIA!

$$Y_{in} \approx \sqrt{\frac{G+j\omega C}{j\omega L}} = \sqrt{\frac{C}{L}} \left(1 + \frac{G}{j\omega C}\right)^{1/2}$$

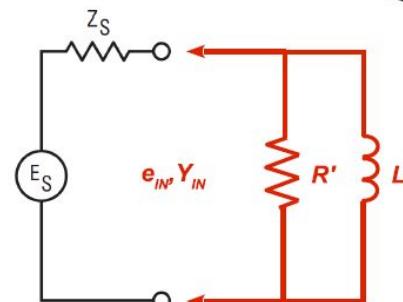
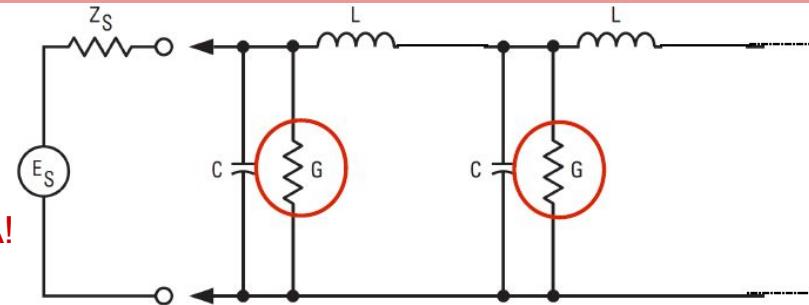
En el flanco ascendente ($t=0^+$), ω es muy grande y $G \ll \omega C$, entonces podemos aplicar:

$$(1+x)^a|_{x<<1} \approx 1 + ax$$

$$Y_{in}|_{t=0^+} \approx \sqrt{\frac{C}{L}} \left(1 + \frac{G}{j2\omega C}\right)$$

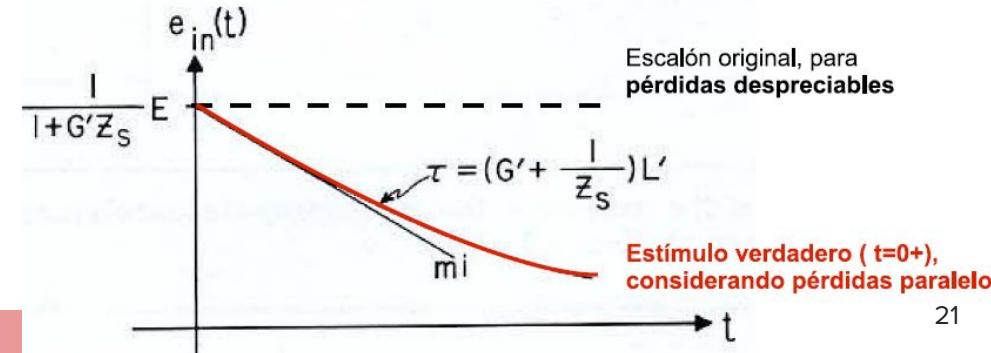
Esta ecuación sigue la forma de un circuito equivalente R-L paralelo, donde:

$$G' = \sqrt{\frac{C}{L}}; L' = \frac{2C}{G} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$$



Modelo válido para $t = 0^+$

$$Y_{IN} = G' + \left(\frac{1}{j\omega L'}\right)$$

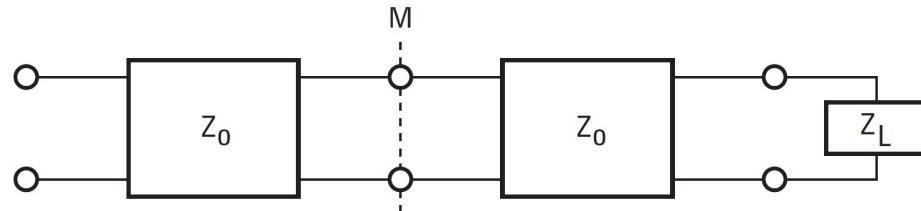


Agenda

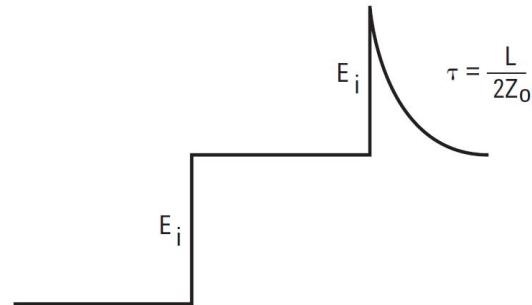
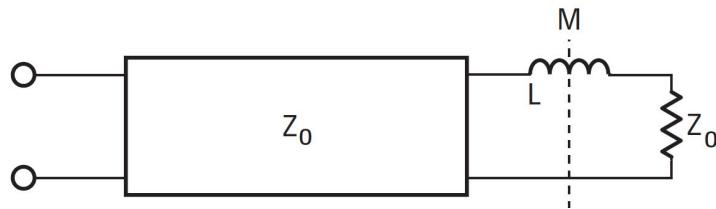
- ❑ Líneas de transmisión y la técnica de TDR
- ❑ Parámetros medidos
- ❑ Medición de cargas y desadaptaciones
 - ❑ Impedancias reales
 - ❑ Impedancias complejas
- ❑ Pérdidas en una línea: serie y paralelo
- ❑ Discontinuidades en una línea
 - ❑ Puntos de discontinuidad
 - ❑ Discontinuidades múltiples
- ❑ Limitaciones de la técnica TDR
 - ❑ Generador desadaptado
 - ❑ Resolución en espacio/tiempo y error de amplitud
- ❑ Escalón vs. pulso
- ❑ Casos de medición

Puntos de discontinuidad

- Nos interesa en este caso el efecto de una **discontinuidad puntual en una línea**
- Por ejemplo, un **conector** puede introducir una **inductancia o un capacitor en serie**
- Ya que el cable es el mismo a ambos lados del conector, **la forma de onda es equivalente a la de un circuito R-L serie. El tiempo de la reflexión indica la posición del conector.**



Suponiendo $Z_L = Z_0$



Agenda

- ❑ Líneas de transmisión y la técnica de TDR
- ❑ Parámetros medidos
- ❑ Medición de cargas y desadaptaciones
 - ❑ Impedancias reales
 - ❑ Impedancias complejas
- ❑ Pérdidas en una línea: serie y paralelo
- ❑ **Discontinuidades en una línea**
 - ❑ Puntos de discontinuidad
 - ❑ **Discontinuidades múltiples**
- ❑ Limitaciones de la técnica TDR
 - ❑ Generador desadaptado
 - ❑ Resolución en espacio/tiempo y error de amplitud
- ❑ Escalón vs. pulso
- ❑ Casos de medición

Discontinuidades múltiples

La interpretación analítica es practicable hasta la segunda reflexión. Luego la continuaremos gráficamente para obtener mayor información.

Interesan tres características principales:

- **Primera reflexión → desadaptación $Z_0 - Z'_0$**
- **Valor final → desadaptación $Z_0 - Z_L$**
- Cantidad de reflexiones intermedias → desadaptación $Z_0 - Z'_0$

$$E_{r1} = \rho_1 E_i = \frac{Z'_0 - Z_0}{Z'_0 + Z_0} E_i$$

$$E_{t1} = E_i + E_{r1} = (1 + \rho_1) E_i$$

$$E_{rL} = \rho_2 E_{t1} = \rho_2 (1 + \rho_1) E_i$$

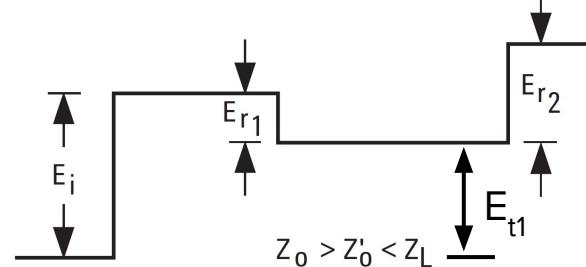
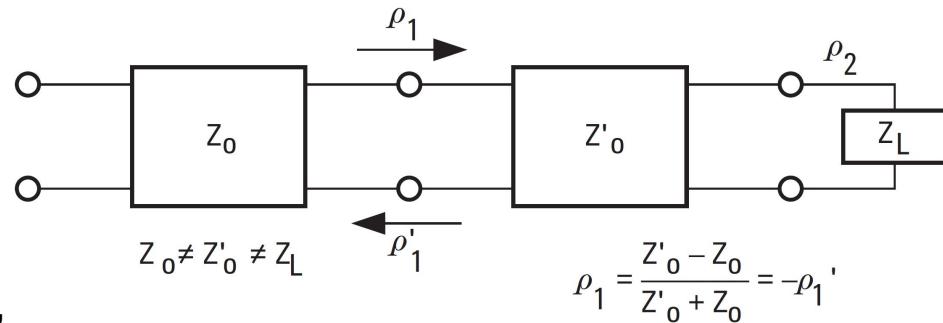
$$E_{r2} = (1 + \rho'_1) E_{rL} = (1 + \rho'_1) [\rho_2 (1 + \rho_1) E_i]$$

Pero como $\rho_1 = -\rho'_1$:

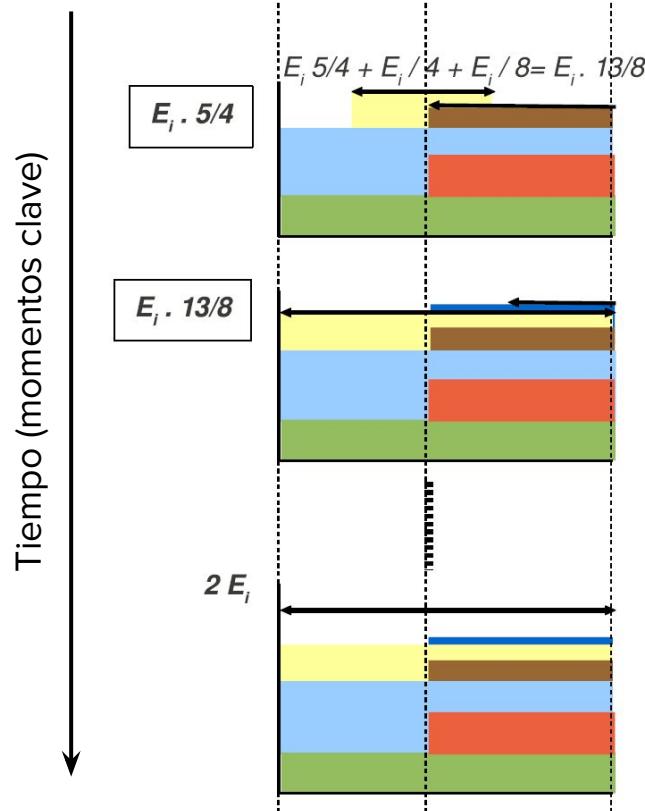
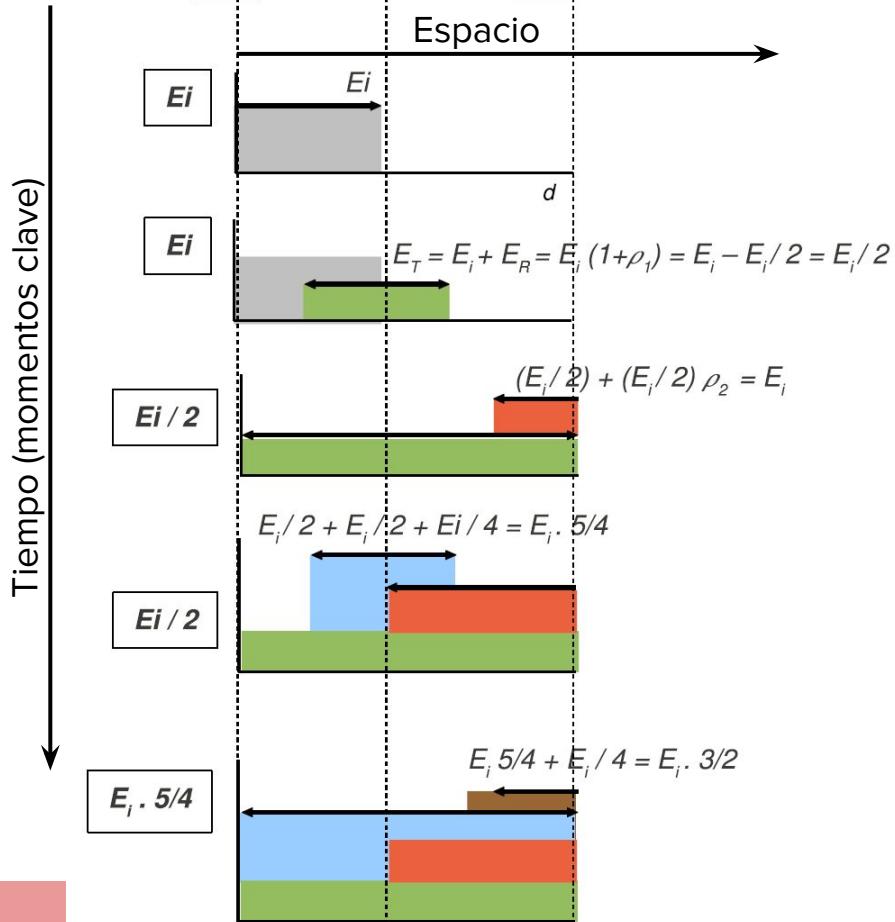
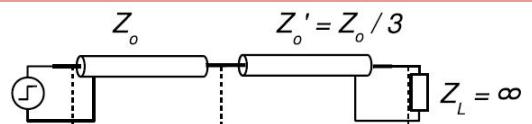
$$E_{r2} = \rho_2 [(1 - \rho_1^2) E_i]$$

$$E_{t2} = E_i + E_{r1} + E_{r2} = (1 + \rho_1) E_i + \rho_2 [(1 - \rho_1^2) E_i]$$

(...)



(" E_{tx} " = tensión total en el punto x)



Agenda

- ❑ Líneas de transmisión y la técnica de TDR
- ❑ Parámetros medidos
- ❑ Medición de cargas y desadaptaciones
 - ❑ Impedancias reales
 - ❑ Impedancias complejas
- ❑ Pérdidas en una línea: serie y paralelo
- ❑ Discontinuidades en una línea
 - ❑ Puntos de discontinuidad
 - ❑ Discontinuidades múltiples
- ❑ Limitaciones de la técnica TDR
 - ❑ Generador desadaptado
 - ❑ Resolución en espacio/tiempo y error de amplitud
- ❑ Escalón vs. pulso
- ❑ Casos de medición

Generador desadaptado [HPAN75, Zoz2010]

- Si $Z_g \neq Z_0$, la onda incidente en la línea será distinta al valor normal de $E_g / 2$
- Aún peor, cuando las ondas reflejadas llegan al generador, **éste no las absorberá completamente, generando nuevas reflexiones hacia la línea y la carga**

En la entrada :

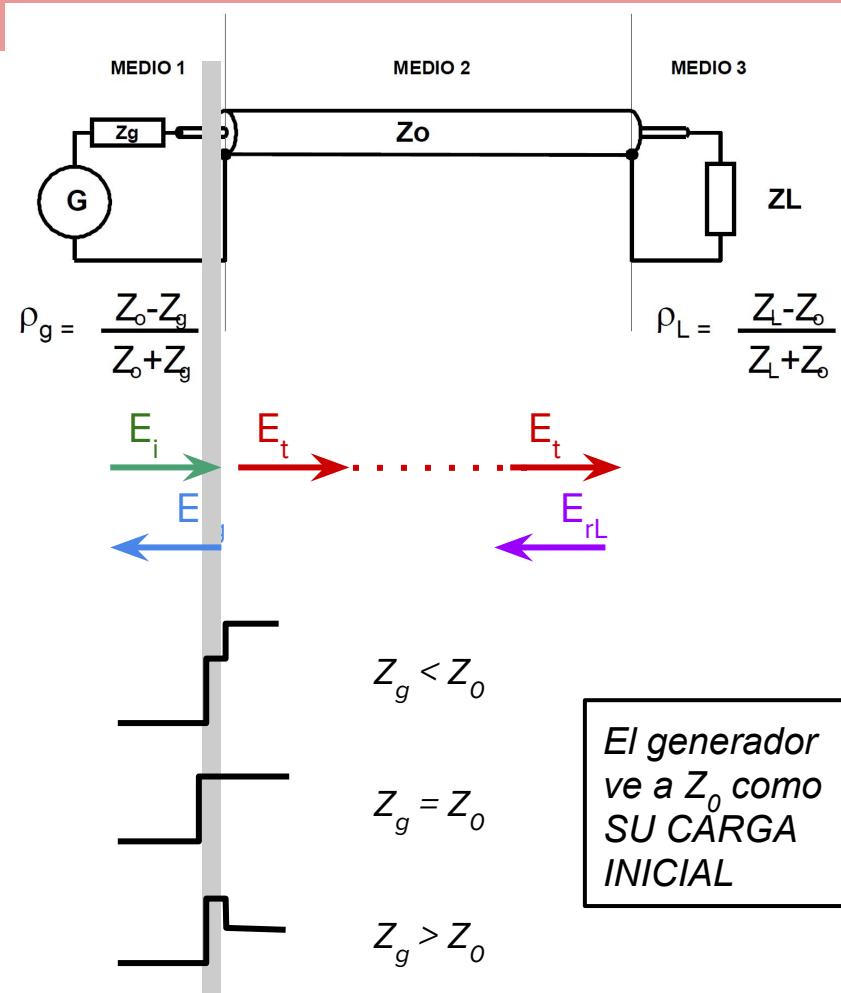
$$\frac{E_{rg}}{E_i} = \frac{Z_0 - Z_g}{Z_0 + Z_g} = \rho_g$$

$$E_t = (1 + \rho_g) E_i = (1 + \frac{Z_0 - Z_g}{Z_0 + Z_g}) E_i = \frac{2Z_0}{Z_0 + Z_g} E_i$$

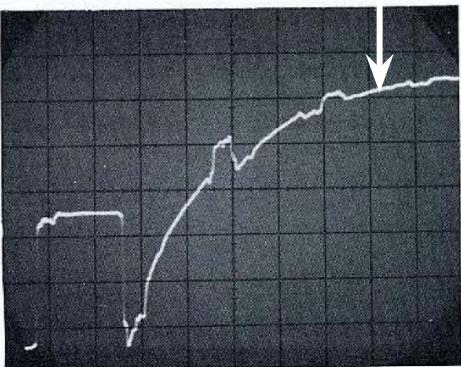
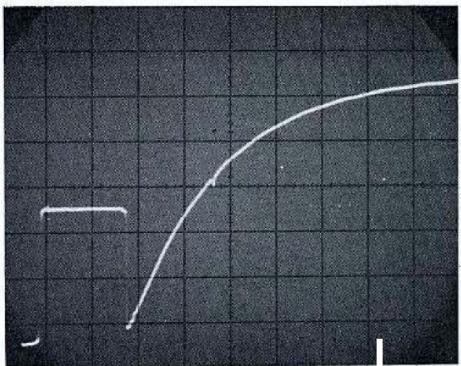
En la carga :

$$\rho_L = \frac{E_{rL}}{E_i} = \frac{E_{rL}}{E_t} \cdot \frac{E_t}{E_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \cdot \frac{2Z_0}{Z_g + Z_0}$$

$$* Si Z_g = Z_0 : \frac{E_{rL}}{E_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \text{ (caso deseable)}$$

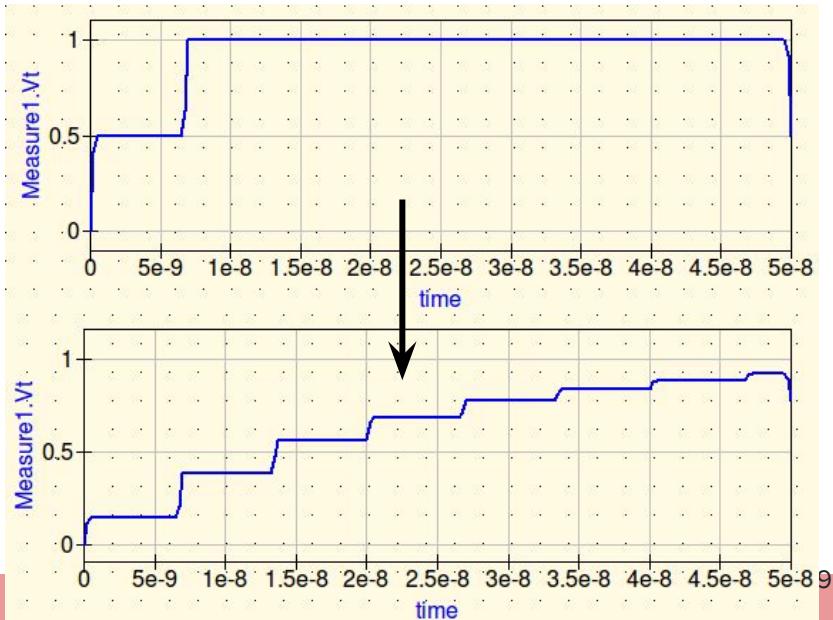
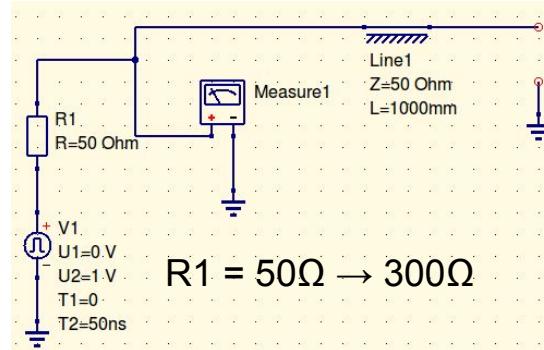


Generador desadaptado [HPAN75, Zoz2010]



Medición carga RC // - efecto de agregar un tramo de línea de 75 Ω

Carga abierta: efecto de desadaptar el generador



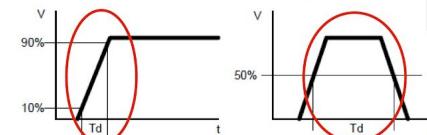
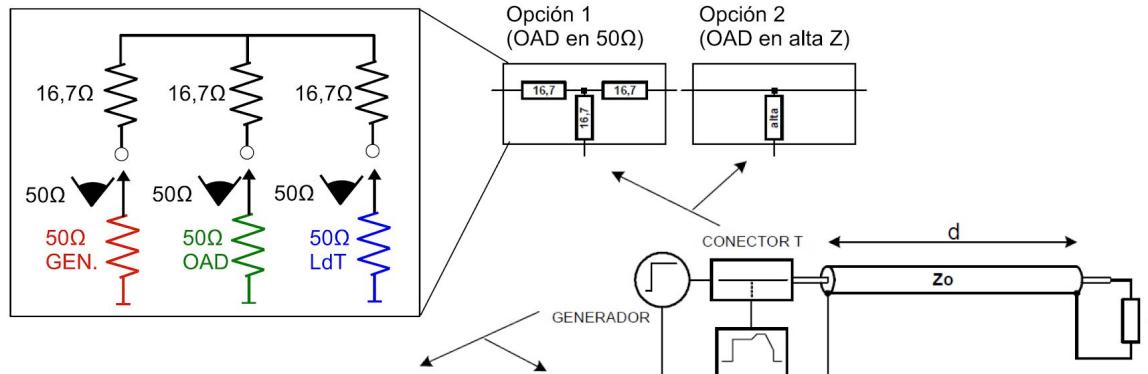
Agenda

- ❑ Líneas de transmisión y la técnica de TDR
- ❑ Parámetros medidos
- ❑ Medición de cargas y desadaptaciones
 - ❑ Impedancias reales
 - ❑ Impedancias complejas
- ❑ Pérdidas en una línea: serie y paralelo
- ❑ Discontinuidades en una línea
 - ❑ Puntos de discontinuidad
 - ❑ Discontinuidades múltiples
- ❑ Limitaciones de la técnica TDR
 - ❑ Generador desadaptado
 - ❑ **Resolución en espacio/tiempo y error de amplitud**
- ❑ Escalón vs. pulso
- ❑ Casos de medición

Resolución temporal/espacial [HPAN75]

- La resolución temporal es el **mínimo tiempo entre discontinuidades** que el TDR es capaz de apreciar. Depende de los **tiempos de subida del generador, del osciloscopio y del sistema, y de la velocidad de propagación de la línea**.
- La resolución temporal implica una **resolución espacial**, que es la **mínima distancia entre discontinuidades que el TDR puede apreciar**.
- La resolución temporal también limita en **mínimo tiempo de subida τ , y con él las mínimas componentes reactivas (L o C) medibles**.

Resolución temporal/espacial [HPAN75 pp.4-5, Zoz2010]



RESOLUCIÓN TEMPORAL/ESPACIAL

$$X_{\min} = 0,5 \cdot V_p \cdot T_{r,\text{total}} \\ = 0,5 \cdot (C/\sqrt{\epsilon_r}) \cdot T_{r,\text{total}}$$

EJEMPLOS

Para $\epsilon_r = 1$ y $T_r = 50\text{pS}$ $X_{\min} = 0,0075 \text{ mts}$

Para $\epsilon_r = 2$ y $T_r = 50\text{pS}$ $X_{\min} = 0,0053 \text{ mts}$

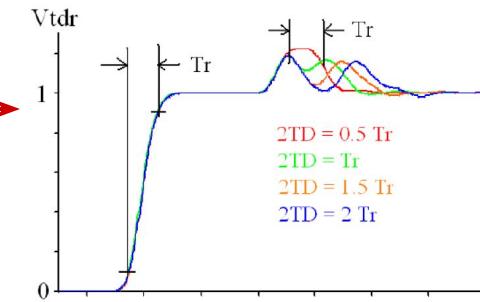
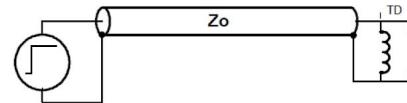
CONTENIDO ESPECTRAL DEL GENERADOR ES APROXIMADAMENTE:

$$\text{ContenidoEspectral} \approx 0,75 \frac{1}{T_r}, 0,75 \frac{1}{T_d}$$

EL TIEMPO TOTAL DE SUBIDA ES

$$T_{r,\text{total}} = \sqrt{T_{r,\text{gen}}^2 + T_{r,\text{osc}}^2 + T_{r,\text{sist}}^2}$$

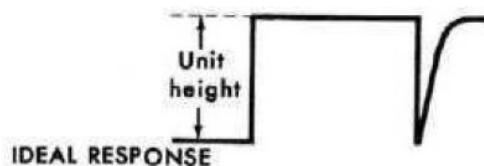
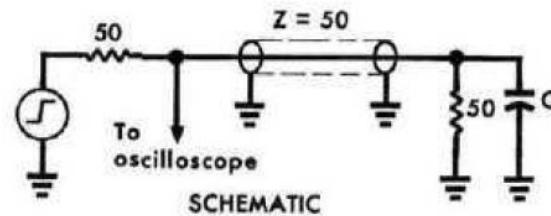
Si $X_{\text{medido}} < X_{\min}$, ambos aparecen como una sola discontinuidad!



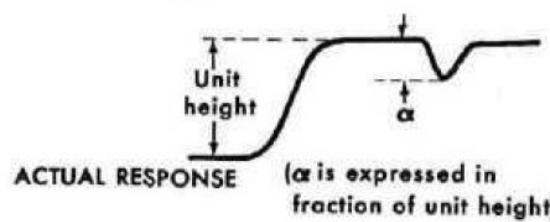
Resolución temporal/espacial [HPAN75 pp.4-5, Zoz2010]

Efecto en la medición de componentes reactivas

El tiempo de subida T_r impone también un límite en los mínimos valores medibles de inductancia o capacidad. Esto aplica no sólo a cargas, sino también a discontinuidades puntuales (conectores, deformaciones del cable, etc.)



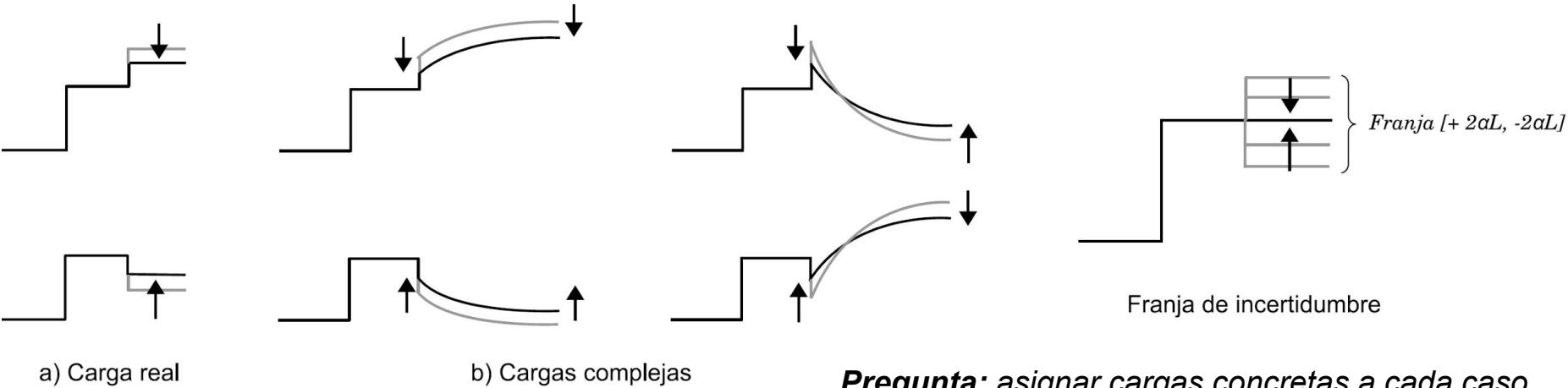
IDEAL RESPONSE



Error en amplitud (error por atenuación y mínima reflexión detectable) [AN75]

- La resolución en amplitud está principalmente limitada por la atenuación de la línea. La atenuación se puede medir aplicando una CARGA CONOCIDA, por lo general un CORTOCIRCUITO.
- Si la atenuación y la longitud del cable son conocidos, puede CORREGIRSE el error producido.
- Sin embargo, por debajo de cierto valor mínimo de E_r , éste queda totalmente ELIMINADO por la atenuación produciendo una zona “ciega” o de incertidumbre.

La atenuación siempre disminuye el módulo de la onda reflejada en un valor $2\alpha L$, produciendo un valor aparente de ρ MENOR EN MÓDULO al que realmente se produce.



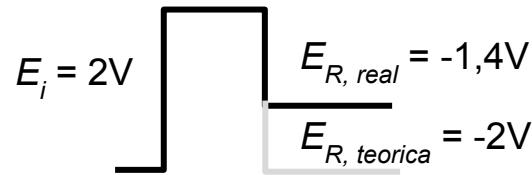
Pregunta: asignar cargas concretas a cada caso

Medición de la atenuación

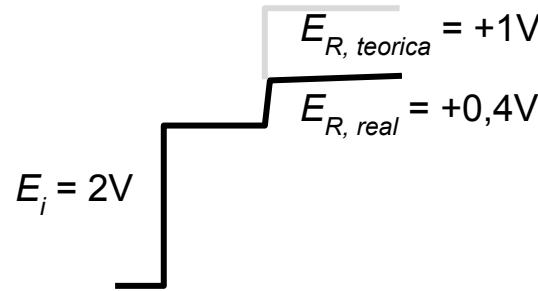
- La atenuación se puede medir a partir de **cualquier carga perfectamente conocida**. Sin embargo, se mide aplicando un cortocircuito ya que en ese caso se conoce con exactitud en el valor “teórico” de la carga.
- La ecuación general es** $\alpha = \frac{20 \log(E_{R,real} / E_{R,teorica})}{2L} = \frac{10 \log(E_{R,real} / E_{R,teorica})}{L}$, donde $E_{R,teorica}$ es el valor de la reflexión teórica para esa carga, y $E_{R,real}$ es al valor medido. Algunos ejemplos:

a) Cortocircuito

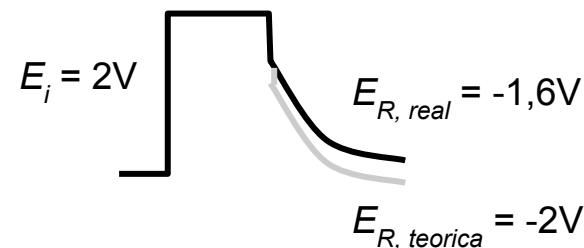
$$T_d = 1 \text{ us}, V_p = 0.66 \text{ C}$$



b) Carga real, $R_L = Z_0 / 3$



c) Carga R-L paralelo



$$L = T_d \times V_p = 1 \cdot 10^{-6} \times 0.66 \times 3 \cdot 10^8$$

$$L = 198 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{-10 \log(-1.4)/(-2)}{198} \approx 8 \cdot 10^{-3} \text{ dB/m}$$

$$L = 198 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{-10 \log(+0.4)/(+1)}{198} \approx 0,02 \text{ dB/m}$$

$$L = T_d \times V_p = 1 \cdot 10^{-6} \times 0.66 \times 3 \cdot 10^8$$

$$L = 198 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{-10 \log(-1.6)/(-2)}{198} \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ dB/m}$$

Errores y degradaciones en la medición TDR [Zoz2010]

FUENTE	PARAMETRO	ERROR O DEGRADACION
GENERADOR DE PULSOS	TIEMPO DE SUBIDA	Perdida de apreciación de pequeñas transiciones Perdida de apreciación temporal espacial
	RINGING Y OVERSHOT	Errores de medición debido a mal interpretación de estos fenómenos como reflexiones del sistema bajo ensayo
SISTEMA DE MUESTREO (CONECTOR T)	ATENUACION	Perdida de resolución en la amplitud y rango dinámico en la señal reflejada
	DESADAPTACION DE IMPEDANCIAS	Errores de medición debido a mal interpretación de estos fenómenos como reflexiones del sistema bajo ensayo
CABLES Y SISTEMA DE INTERCONEXION	ATENUACION y PERDIDAS	Aumento del tiempo de subida del sistema, perdida de resolución
	DESADAPTACION DE IMPEDANCIAS	Errores de medición debido a mal interpretación de estos fenómenos como reflexiones del sistema bajo ensayo
SISTEMA DE MEDICION	ANCHO DE BANDA NO COMPATIBLE	Aumento del tiempo de subida del sistema, perdida de resolución
	BAJA RESOLUCION VERTICAL	Perdida de resolución en la amplitud y rango dinámico en la señal reflejada

Estimación general de los aportes de error provenientes de cada componente del sistema

Agenda

- ❑ Líneas de transmisión y la técnica de TDR
- ❑ Parámetros medidos
- ❑ Medición de cargas y desadaptaciones
 - ❑ Impedancias reales
 - ❑ Impedancias complejas
- ❑ Pérdidas en una línea: serie y paralelo
- ❑ Discontinuidades en una línea
 - ❑ Puntos de discontinuidad
 - ❑ Discontinuidades múltiples
- ❑ Limitaciones de la técnica TDR
 - ❑ Generador desadaptado
 - ❑ Resolución en espacio/tiempo y error de amplitud
- ❑ Escalón vs. pulso**
- ❑ Casos de medición

Escalón vs. pulso [Lac2009]

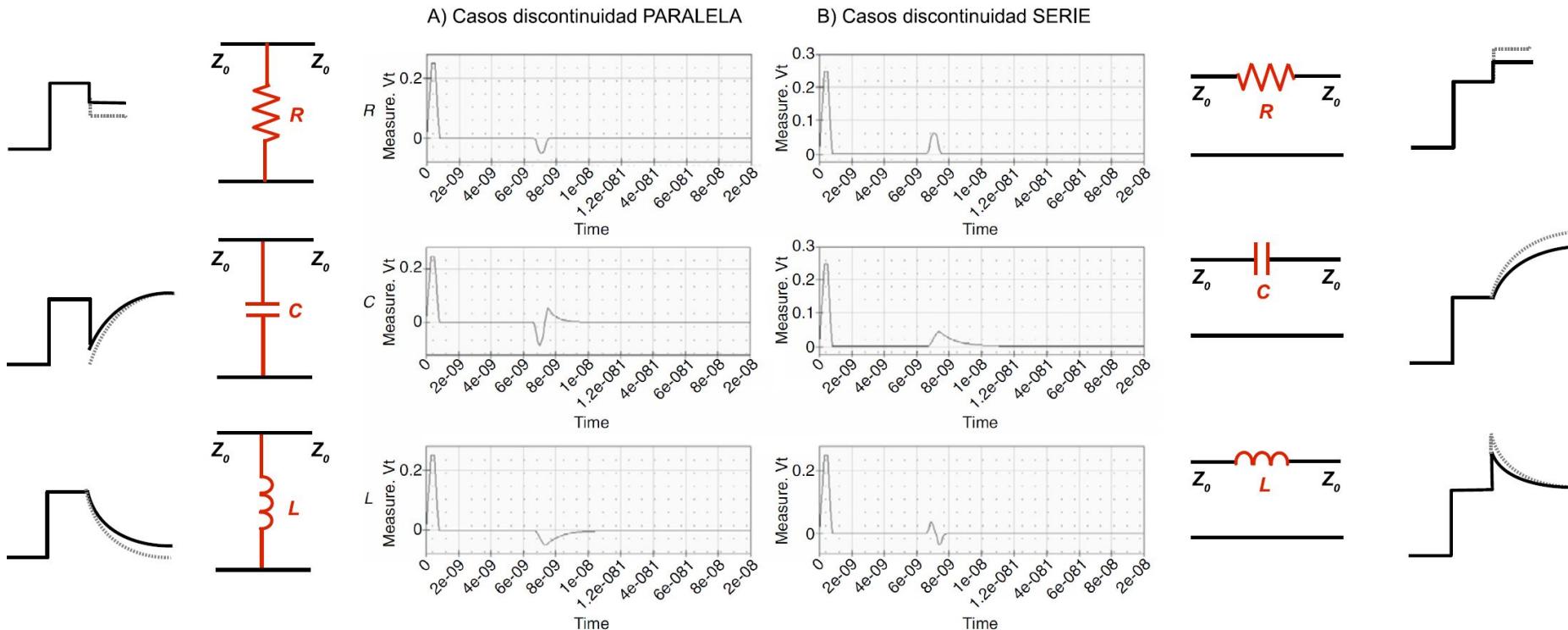
Escalón

- Es capaz de **observar mientras genera**. Como contraparte, la interpretación es más compleja ya que incidente y reflejada siempre se presentan sumándose en una onda total E_T
- La máxima distancia medible es función de la **energía (V.I)** inyectada y de la **atenuación del cable**

Pulso

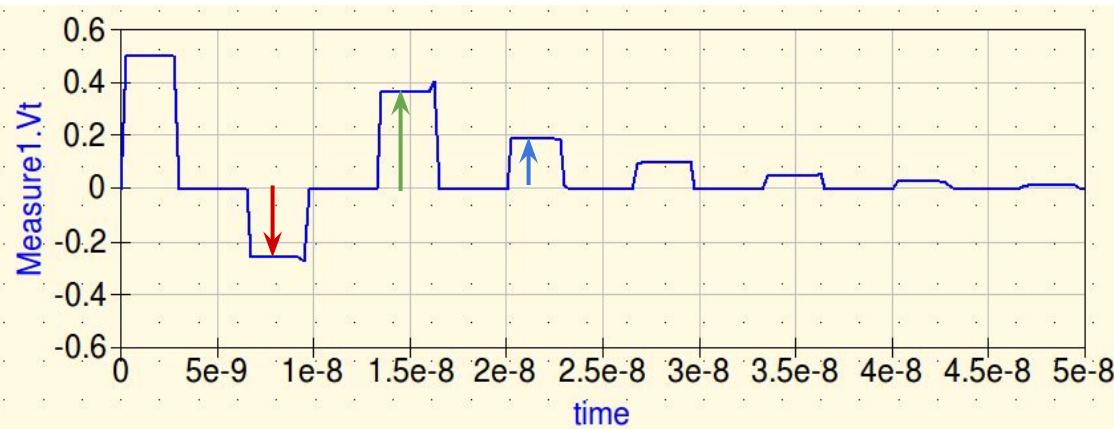
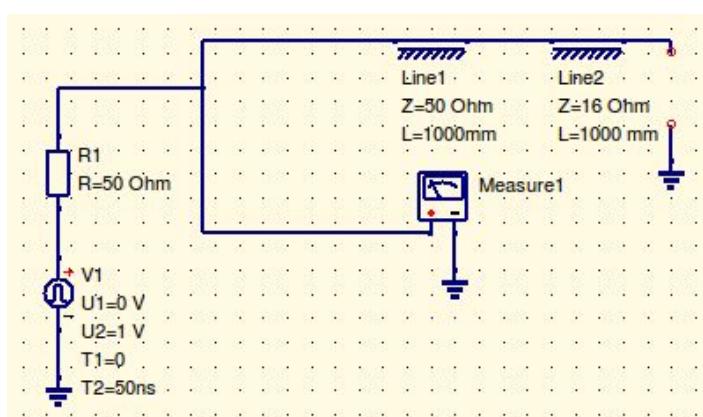
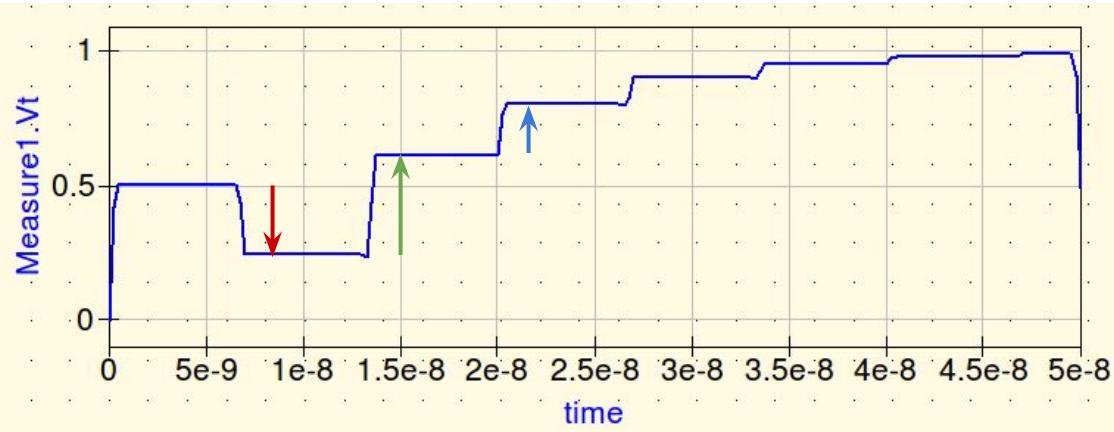
- **Primero genera, luego vuelve a cero y observa retornos**. La interpretación es más simple ya que incidente y reflejada son **independientes**
- La máxima distancia medible es función de la **energía inyectada (V.I.t)**, la **tasa de repetición de pulsos**, y la **atenuación del cable**
- Existe un **tiempo (o distancia) muerto o ciego (“blind zone”)**, igual a la **duración del pulso**, que fija la **distancia mínima (en lugar de T_r del escalón)**

Escalón vs. pulso [Lac2009]



Efectos de cargas / discontinuidades sobre una línea de impedancia Z_0 , aplicando escalón vs. pulso

Escalón vs. pulso [Lac2009]



Comparación para discontinuidades
Multiples: $Z_0 = 50\Omega$, $Z'_0 = Z_0 / 3$, $Z_L = \infty$

- a) Utilizando escalón
- b) Utilizando pulsos

Agenda

- ❑ Líneas de transmisión y la técnica de TDR
- ❑ Parámetros medidos
- ❑ Medición de cargas y desadaptaciones
 - ❑ Impedancias reales
 - ❑ Impedancias complejas
- ❑ Pérdidas en una línea: serie y paralelo
- ❑ Discontinuidades en una línea
 - ❑ Puntos de discontinuidad
 - ❑ Discontinuidades múltiples
- ❑ Limitaciones de la técnica TDR
 - ❑ Generador desadaptado
 - ❑ Resolución en espacio/tiempo y error de amplitud
- ❑ Escalón vs. pulso
- ❑ Casos de medición

Casos de medición

Variables

- Tiempo de propagación $T_d = 2L / V_p$
- Velocidad de propagación $V_p = 2L / T_d$
- Longitud de la línea o distancia a la discontinuidad $L = T_d \cdot V_p / 2$
- Atenuación por metro $\alpha = \frac{20 \log(E_{R,real} / E_{R,teorica})}{2L} = \frac{10 \log(E_{R,real} / E_{R,teorica})}{L}$
(generalmente se mide con un corto => $E_{R, teorica} = -E_i$)
- Tipo de carga: evaluación **cualitativa y cuantitativa**, como ya se vio en las anteriores slides.

Casos de medición

TDRs are used in all phases of a cabling system's life, from construction and maintenance, to fault finding and restoration.

- Locate opens, shorts, and partials in the cable
- Find in-line components
- Locate bad splices
- Locate bridged taps
- Locate water in the cable
- Locate load coils
- Find splits and re-splits
- Clear lines for ISDN, HDSL, ADSL
- Locate crushed, pinched or kinked cables



- Measure dBRL (decibels of return loss) of the fault
- Aid in measuring and verifying new or partial cable reels
- Locate problems caused by other construction companies
- Document or map cable networks and condition
- Locate problems causing excessive loss of either AC or RF
- Verify cable installations prior to acceptance
- Detect cable theft
- ...and a variety of other cabling problems.



Casos de medición: reglas generales (pulso)

- *Read the operator's manual*
- *Know your TDR*
- ***Get as close to the fault as possible***
- *Make a good connection*
- ***Use the correct Velocity of propagation***
- ***Begin in the shortest pulse width***
- ***Test from both ends***
- *Determine cable path and depth*
- *Retest after repair*
- *Use common sense*

Casos de medición: reglas generales (pulso)

1. Whenever possible, always obtain the manufacturer's specifications for the cable being tested before departing the shop for the test site. Accurate information is essential to accurate distance measurements. Cable conductor gauge and VOP are available from the manufacturer and can often be found on cable spools. Refer to local documentation for cable length so that the far end bump isn't mistaken for a fault.
2. Determine the velocity of propagation (VOP) as accurately as possible before performing the CABLE CHARACTERISTICS setup. If the VOP is not known, test a known length of an identical cable type. Experiment with the VOP setting and perform TDR measurements on the sample cable until the test result matches the known length of the cable, then use the VOP setting on the actual cable being tested.
3. Temperature of the cable being tested affects the VOP. During the CABLE CHARACTERISTICS setup, be sure to include as accurate a temperature value as is practical to improve measurement accuracy.
4. Always break the cable into individual sections wherever possible and test each section separately. Measurements on short sections are often more accurate than measurements made on long sections.
5. Regardless of the length of each section, always start testing with the shortest range setting to improve detection of small faults close to the testing point. The shorter pulse widths have the shortest blind zone and allow detection of close-in faults that may be missed at a higher range setting. When the short range tests indicate no potential problems, increase the range settings one at a time.

6. Whenever possible, test each section from both ends. Potential faults close to the far end may not have been detected due to signal losses, or may be inaccurately measured because of decreased resolution due to long pulse length. By moving to the far end and repeating the tests, those faults may show up more clearly since shorter range setting may be used. Testing from both ends may compensate for an incorrect VOP setting. A single fault that is detected from both ends of the cable may appear to be at two different locations on the line. In this event, compute the midpoint between the two measurements and inspect that position on the cable for the fault.

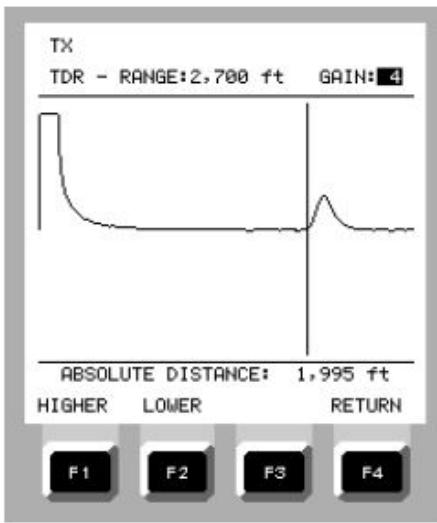
7. After locating and repairing a fault, always retest the section. The first fault may have masked a smaller fault farther down the line.

8. When a bump or dip is detected, position the cursor to the leading edge, then use the zoom feature to center the cursor. Increase the display gain to sharpen the leading edge, and reposition the cursor for a more accurate measurement.

9. Very minor faults at shorter ranges may be more detectable with longer pulse widths. If a 2,500 foot cable appears normal with the tester set to the 2,700 foot range, retest the cable at the higher range settings to generate a stronger reflection.

10. If a fault is suspected within the 40 foot blind zone at the 750 foot range setting, and is not accessible for visual inspection, attach a good section of the same type cable using a good quality connection, and retest the cable. The added section of cable will occupy the blind spot and effectively move the fault onto the usable portion of the trace.

11. Use your technical experience and common sense to recognize discrepancies between test results and your knowledge of the cable being tested. If the displayed distance to a fault is 1000 feet and maintenance has recently been performed at 950 feet, the location of the fault and the location of the maintenance may be the same.

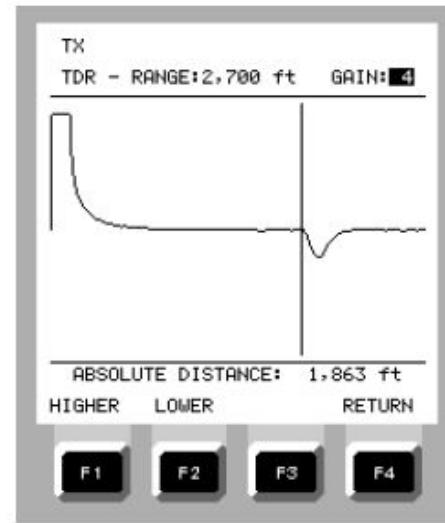


-- NORMAL LINE

The trace for a normal line begins with the initial plateau shape of the blind zone, followed by the drop as the pulse charges the line. The remainder of the trace is flat until the open end of the cable generates the characteristic bump. The sharpness of the bump can be increased by increasing the range setting and gain of the display. It is decreased by longer distances, shorter range setting, lower gain, and by the presence of faults between the test set and cable end.

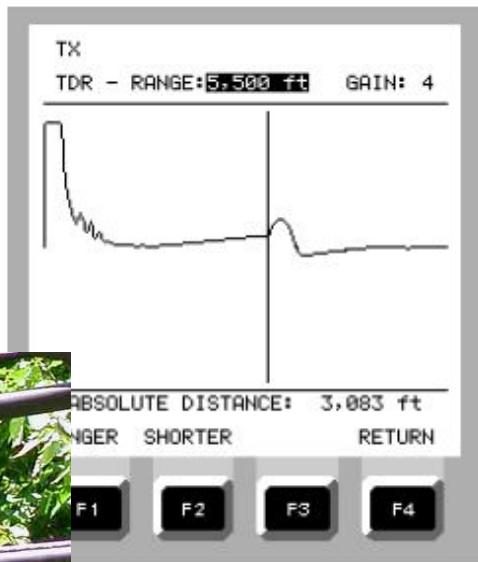
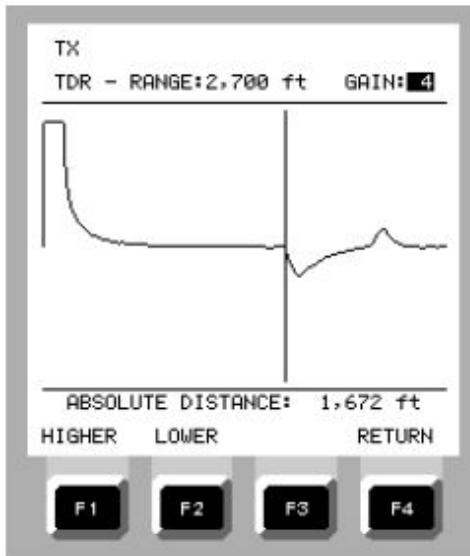
SHORTED LINE --

A shorted line is displayed as a sharp dip in the trace. In this case, circuit documentation indicates the line is supposed to be 2,000 feet long. Circuit is inoperative and the TDR shows a possible short at 1,863 feet. The short prevents the test set from seeing the open end of the cable. The sharpness of the dip is affected by the same factors that affect the normal line display. Dead shorts are sharpest. Lower resistance shorts may be less distinct.



LOAD COILS --

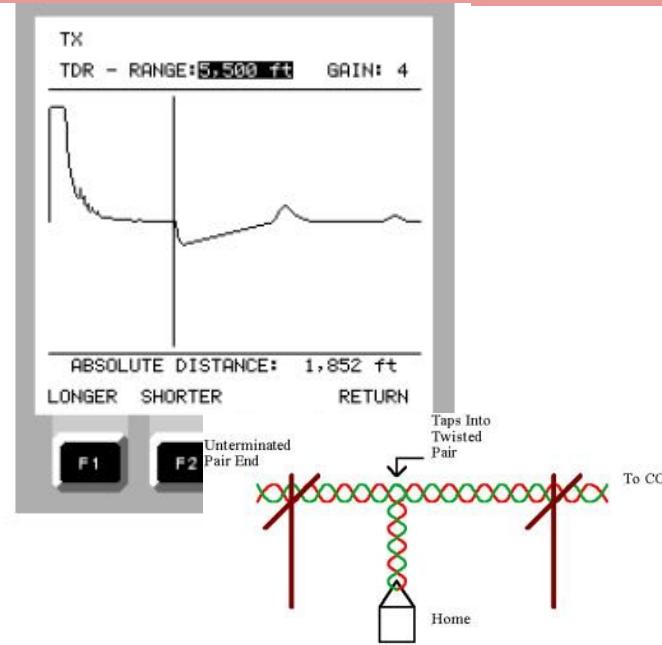
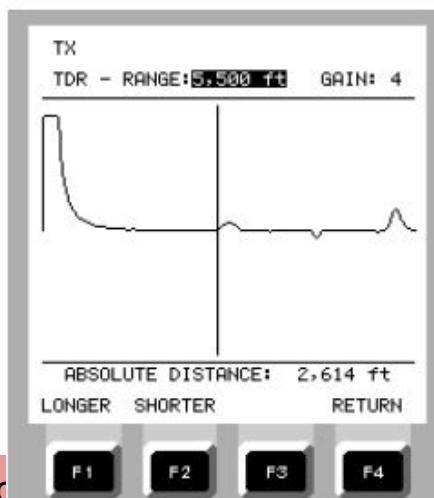
Load coils are devices that are used to compensate for higher frequency losses in voice-grade lines over 18,000 feet in length. The first load coil is placed 3000 feet from the central office, and then every 6,000 feet toward the subscriber. The trace resembles that of an open circuit, except that the trace slopes upward toward the peak, the bump is more rounded, and the trailing edge of the bump is lower than the leading edge. A measured distance of about 3,000 feet is also a clue.

**-- WATER INTRUSION INTO CABLE JACKET**

A cable suffering water intrusion at a splice can be recognized by a distinctive dip corresponding to the location where the cable enters the water, a curved upward slope toward the normal level of the trace, and a bump where the cable departs the water. Since water absorbs energy very quickly, it's possible that the trace may not show the ending bump or any other changes farther down the line.

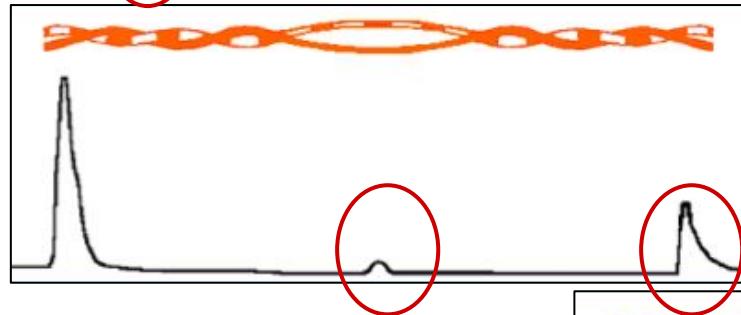
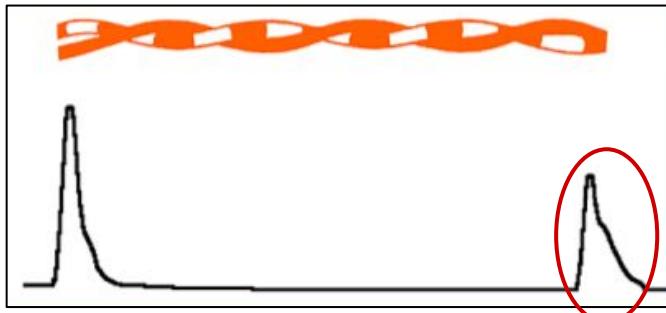
BRIDGE TAPS --

Bridge taps are branches in the line that are usually the result of having a second telephone attached to the original line. The bridged connection changes the line impedance at the connection point and is easily detected by the TDR. A bridge tap closely resembles water intrusion at a splice except that the upward slope is a straight line. Some circuits can tolerate a limited quantity of bridge taps, but it is necessary to know the combined length of the taps. The test set can perform a "delta" (difference) measurement to determine the length of each tap by using the cursor to mark the beginning and end of the dip and displaying the distance between both points.

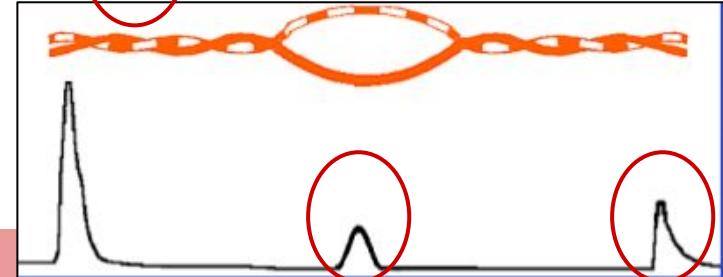
**-- SPLITS AND RESPLITS**

Splits are wiring errors where a wire from one pair is accidentally connected to a wire of a different pair. Resplits are corrections made farther down the line to correctly match the pairs again. They do not affect POTS lines but will cause problems for digital services. The split and resplit generate a bump / dip pair.
The split causes the bump and the resplit causes the dip.

Casos de medición



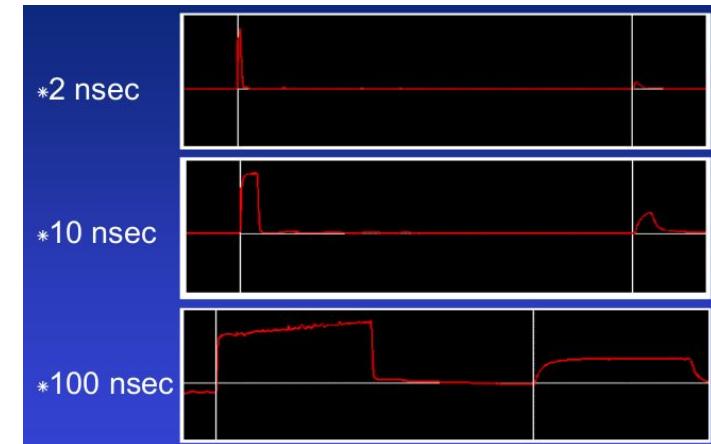
Detección de separación
o aplastamiento de líneas



TDRs have varying pulse width settings - the larger the pulse width, the more energy and therefore, the further the signal will travel



- Pulses spread and reduce in amplitude as they travel down cables
- Cables that transmit higher frequencies, (eg coax), cause less spreading
- Wider pulses locate faults at greater distances



A wide pulse is less accurate than a narrow pulse

- * This is not true
 - A TDR uses the rising edge of the transmit pulse to locate faults
 - The measurement is done from the rising edge of the transmit pulse to the leading edge of the reflected feature
 - The subsequent information / shape gives additional information about the fault and not its distance

Pulse width and dead zone

- * Narrower pulses will allow you to see consecutive faults more easily but don't travel as far as wider ones
- * Fix the first fault before looking for other ones.

- * DEAD ZONE
 - Dead zone is the area under the transmit pulse OR under the reflected pulse
- * Pulses are attenuated by the first fault, so additional faults are difficult to see
- * The first fault is repaired, then the cable is tested for any other faults
- * Dead zone is generally not important

Short Pulse

Displayed Waveform



Long Pulse

Reflection from Fault 1



Reflection from Fault 2



Resulting Displayed Waveform



Dead zone affects fault location ability

- * This is not true
- * Dead zone under transmit pulse can be accommodated by :
 - Extra length of cable
 - Use of balance control
 - Use a narrow pulse
 - Use of difference mode
- * Dead zone under reflection can be accommodated by:
 - Fixing the first fault and then look again
 - Use a narrower pulse

Pulse width / dead zone...

<u>Pulse Width</u>	<u>Dead Zone</u>
* sub-nSec	0m
* 5 nSec	2m
* 500 nSec	90m
* 2uSec	350m
* 10 uSec	1500m
* 330 uSec	7 km

Pulse width / Fundamental Frequency...

<u>Pulse Width</u>	<u>Frequency</u>
* sub-nSec	600 MHz
* 2 nSec	250 MHz
* 10 nSec	50 MHz
* 100 nSec	5 MHz
* 1 uSec	500 kHz
* 2 uSec	250 kHz
* 4 uSec	125 kHz
* 6 uSec	83 kHz
* 330 uSec	1.5 kHz (voice band !)

Pulse Amplitude & Distance

TDRs have varying pulse amplitude settings - the larger the pulse and the wider the pulse, the more energy and therefore, the further the signal will travel



Bibliografía

[HPAN62] *Time domain reflectometry theory*, HP AN62 / Keysight AN 5966-4855E, 2013

[HPAN75] *Selected articles on time domain reflectometry applications*, Hewlett-Packard AN 75

[Zoz2010] Apuntes de clase Ing. Jorge Zozaya

[Lac2009] R.Lacoste, *Robert Lacoste's the darker side - Practical Applications for Electronic Design Concepts from Circuit Cellar*, Newnes, 2009

[Elec2001] *Practical tips for using metalic time domain reflectometers*, Electrodata AN TTS3-0901, 2001

[Rad] *Understanding TDRs*, Radiodetection seminar

Enlaces adicionales

https://www.neetrac.gatech.edu/publications/CDFI/5-TDR_17_with-Copyright.pdf