

Ingeniería Electrónica - UTN - FRC  
Medidas Electrónicas II  
Reflectometría en el Dominio del Tiempo

Guía de Trabajos Prácticos

## 1. Introducción teórica

### 1.1. Líneas de transmisión - breve repaso

Las líneas de transmisión consisten en general en un sistema de conductores que puede emplearse para transmitir información, en la forma de energía eléctrica o electromagnética entre dos puntos. Según lo estudiado en Medios de Enlace, la teoría que aquí utilizaremos se considera cuando la longitud de la línea es apreciable respecto a  $1/4$  de la longitud de onda  $\lambda$ . Para longitudes de línea comparables o menores que  $\lambda/4$  el retardo de propagación es una fracción de ciclo, por lo que el sistema se analiza por la teoría de circuitos comúnmente utilizada en otras materias. Ejemplos de líneas de transmisión son el cable bifilar, el cable coaxial, y líneas planares tales como la stripline o la microstrip.

Las principales características de una línea de transmisión son:

**Z<sub>0</sub>:** impedancia característica, ésta depende de su geometría (características mecánicas).

$\alpha$ : atenuación de la línea. Toda línea presenta atenuación, expresada en dB/m o Np/m. La atenuación es en general función de la frecuencia.

**V<sub>p</sub>:** 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 del dieléctrico.

En general, una línea de transmisión se puede modelar mediante sus parámetros distribuidos  $R$ ,  $L$ ,  $G$ , y  $C$ , como se observa en la Fig. 1.

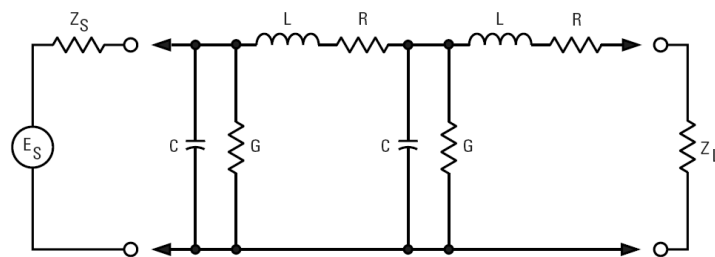


Figura 1: Modelo de una línea de transmisión

- La **inductancia distribuida** (expresada en henrios por unidad de longitud) debido al campo magnético alrededor del conductor, se representa como inductores en serie  $L$ . El parámetro  $L$  modela el proceso de almacenamiento energético en forma de campo magnético que se produce en la línea.
- El **comportamiento capacitivo distribuido** (expresado en faradios por unidad de longitud) debido al campo eléctrico existente en el dieléctrico entre los conductores de la línea, se representa por condensadores en paralelo  $C$ , colocados entre el conductor de ida y el conductor de retorno. El parámetro  $C$  modela el proceso de almacenamiento energético en forma de campo eléctrico que se produce en la línea.

- La **resistencia distribuida** en el conductor (expresada en ohms por unidad de longitud) se representa por resistores en serie  $R$ . Este parámetro modela la disipación de potencia debido a la no idealidad de los conductores (pérdidas óhmicas).
- La **conductancia distribuida** (expresada en mhos o siemens por unidad de longitud) se representa por una conductancia en paralelo  $G$ , colocada entre el conductor de ida y el conductor de retorno. El parámetro  $G$  modela la disipación de potencia que se produce por la no idealidad del medio dieléctrico (pérdidas dieléctricas).

Existen tres casos generales de análisis en líneas de transmisión:

- Líneas de longitud infinita. Las ecuaciones generales en este caso son:

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

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad \text{Constante de propagación}$$

Siendo:

$\alpha$  = Constante de atenuación, atenuación de la tensión por unidad de longitud [dB/long. unit]

$\beta$  = Constante de fase, desfasaje la tensión por unidad de longitud [rad/long. unit]

En base a esto:

$$V_p = \frac{w}{\beta} = \frac{V_c}{\sqrt{e_r}} \quad \text{Velocidad de propagación en el dieléctrico (expresada como \% de } V_c)$$

Siendo:

$V_c$  = velocidad de la luz  $\approx 3,10^8 m/s$

$e_r$  = constante dieléctrica de la línea

- Líneas de longitud finita con  $z_L = z_o$ : línea *adaptada*, valen las mismas ecuaciones.
- Líneas de longitud finita con  $z_L \neq z_o$ : línea *desadaptada*. Las ecuaciones son válidas **considerando que existe una segunda onda originada en la carga** que se desplaza en sentido opuesto a la onda generada. La relación entre ellas es el *coeficiente de reflexión*:

$$\rho = \frac{Er}{Ei} = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o} \quad 0 \geq \rho \leq 1$$

Esta segunda onda es energía *entretenida*, que sumada a la onda original forma una *onda estacionaria* a lo largo de la línea. También se puede definir una *relación de onda estacionaria (ROE)*:

$$\sigma = \frac{Er}{Ei} = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|} \quad 1 \geq \sigma \leq \infty$$

La ROE indica el estado *general* de la línea, pero no permite individualizar las *causas* de ese estado. Para ello surge el uso de la *reflectometría en el dominio del tiempo o TDR*, objeto de este práctico. Contando con la experiencia necesaria, esta técnica es de gran utilidad en los mas variados campos para *localizar y analizar rápidamente* problemas particulares de líneas de transmisión.

## 1.2. Reflectometría en el dominio del tiempo

La reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) es una técnica muy utilizada para la comprobación de cualquier tipo de línea de transmisión, debido a su carácter eminentemente práctico. A diferencia de las técnicas por resolución de ecuaciones de Maxwell o evaluación de ROE a diferentes frecuencias, la TDR permite evaluación rápida en banda ancha. Su natural limitación es la precisión de las mediciones, lo cual en muchos casos no es un requerimiento estricto. Es por ello que en el presente práctico se pretende principalmente entrenar en la identificación de casos, realizando mediciones aproximadas.

En esta técnica, se aplica una señal de tensión a la entrada de la línea mediante un generador. Esta señal recorrerá la línea, donde se reflejará parcialmente según las discontinuidades que encuentre. Estas ondas reflejadas se *sumarán algebraicamente* a la onda incidente con un cierto retardo. Mediante un osciloscopio ubicado a distancia conveniente, se observan las formas de onda a fin de obtener información sobre las discontinuidades. En particular, observaremos el efecto de estas discontinuidades en el *extremo* de la línea, esto es, *variaciones de carga*.

Se utilizan las funciones *escalón* o *pulso* por ser de fácil visualización, y presentar muchas componentes en frecuencia en su flanco ascendente, lo que permite obtener el comportamiento del sistema en un gran ancho de banda.

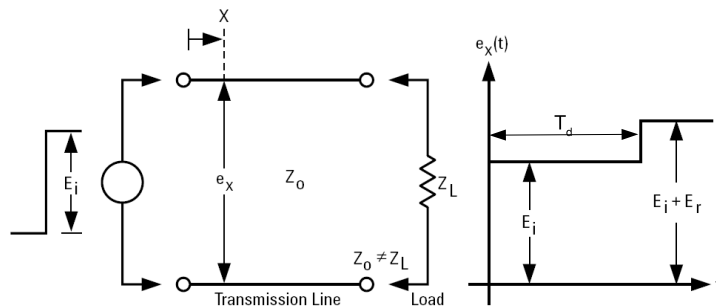


Figura 2: Caso típico de TDR

Este método permite evaluar discontinuidades en cualquier punto de la línea; nosotros nos concentraremos en el extremo de carga por ser el caso más simple. La TDR brinda dos tipos principales de información sobre la discontinuidad:

- **Distancia  $D$**  del punto de observación (la conexión del osciloscopio) al punto de desadaptación: esto se determina por el tiempo  $T_d$  entre el flanco ascendente del escalón aplicado y la aparición de la onda reflejada en este punto:

$$D = V_p \frac{T_d}{2}$$

*Observación:* ¿Por qué se considera *la mitad* de este tiempo?

- **Naturaleza** de la desadaptación: de acuerdo a la ecuación del *coeficiente de reflexión*, se plantean varios casos típicos a analizar, tanto con impedancias *reales* como *complejas*.

### 1.3. Ensayos de TDR

1. Ensayos con  $Z_L = R_L$  (carga resistiva) sin atenuación (caso ideal)

El montaje general, junto con los oscilogramas típicos para este caso se dan en la Fig. 3 (Agilent AN 1304-2). El coeficiente de reflexión será:

$$\rho = \frac{E_r}{E_i} = \frac{R_L - Z_0}{R_L + Z_0} \quad 0 \leq \rho \leq 1$$

Ya que  $E_i$  y  $E_r$  se miden en el osciloscopio, se puede determinar  $R_L$  en términos de  $Z_0$  y viceversa. Si asumimos que  $Z_0$  es real (lo que es cierto para la mayoría de los cables comerciales de buena calidad), se puede ver que desadaptaciones resistivas reflejan un voltaje de la misma forma que el incidente, con la magnitud y polaridad de  $E_r$  determinada por los valores relativos de  $R_L$  y  $Z_0$ .

2. Ensayos considerando atenuación

En general una línea de transmisión presenta atenuación, lo que afectará los valores obtenidos. En los ensayos de cortocircuito y de circuito abierto, en particular, la reflexión no será total. La señal que llega al extremo de la línea estará atenuada; a su vez la onda reflejada se atenuará nuevamente hasta llegar al punto de medición.

Para realizar la medición de la atenuación en una línea, se coloca una carga en corto circuito, que ya se sabe que tiene que reflejar todo, por lo que la diferencia de reflexión que haya será la atenuación.

Un voltaje  $E_i$  aplicado demorará un tiempo finito para propagarse por la línea y llegar al punto de observación. La fase del voltaje moviéndose a lo largo de la línea respecto al voltaje introducido será una cantidad  $\beta$  por unidad de longitud; además el voltaje será atenuado una cantidad  $\alpha$  por unidad de longitud por la resistencia  $R$  en serie y conductancia  $C$  en paralelo de la línea, todo esto está definido mediante la constante de propagación  $\gamma$  ya citada.

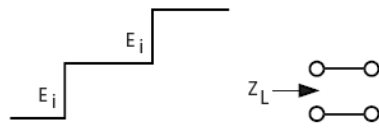
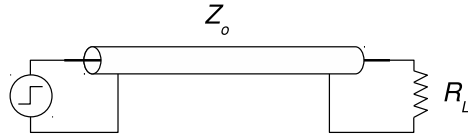
### 3. Ensayos con cargas complejas

Para el análisis de impedancias complejas, recordando el procedimiento aplicado en Teoría de los Circuitos, interesa evaluar valores *en el límite* y la *constante de tiempo*, como se muestra en la Fig.4. A diferencia del método de Laplace, esto es conveniente para nuestros fines prácticos en el dominio del tiempo.

Mediante TDR es posible determinar el *tipo* (inductivo, capacitivo) de carga, y a través de la teoría de circuitos se puede obtener el valor del elemento que almacena energía. En las formas de ondas producidas por impedancias de carga complejas, su análisis se realiza considerando el voltaje reflejado en  $t = 0$  y  $t = \infty$ , asumiendo que la transición entre esos dos valores es exponencial ( $t = 0$  cuando la onda reflejada arriba al punto de monitoreo).

### 4. Ensayos de discontinuidades múltiples

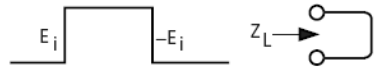
Este tipo de ensayos permite evaluar, mediante aplicación combinada de los casos anteriores, no solo el carácter de la carga aplicada en el extremo de la línea y su longitud total; sino también el carácter y ubicación de *discontinuidades* a lo largo de ella. Esta técnica es ampliamente utilizada, por ejemplo, para diagnóstico de fallas en líneas de difícil acceso, permitiendo identificar previamente la ubicación y tipo del problema a corregir.



(A) Open Circuit Termination ( $Z_L = \infty$ )

$$(A) E_r = E_i$$

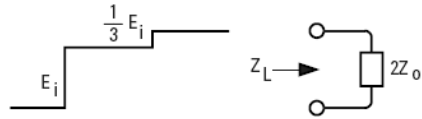
Therefore  $\frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = +1$   
Which is true as  $Z_L \rightarrow \infty$   
 $\therefore Z = \text{Open Circuit}$



(B) Short Circuit Termination ( $Z_L = 0$ )

$$(B) E_r = E_i$$

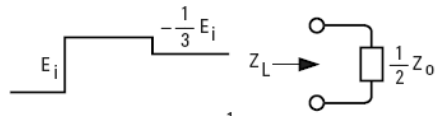
Therefore  $\frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = -1$   
Which is only true for finite  $Z$   
When  $Z_L = 0$   
 $\therefore Z = \text{Short Circuit}$



(C) Line Terminated in  $Z_L = 2Z_0$

$$(C) E_r = +\frac{1}{3} E_i$$

Therefore  $\frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = +\frac{1}{3}$   
and  $Z_L = 2Z_0$



(D) Line Terminated in  $Z_L = \frac{1}{2} Z_0$

$$(D) E_r = -\frac{1}{3} E_i$$

Therefore  $\frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = -\frac{1}{3}$   
and  $Z_L = \frac{1}{2} Z_0$

Figura 3: Casos de cargas reales

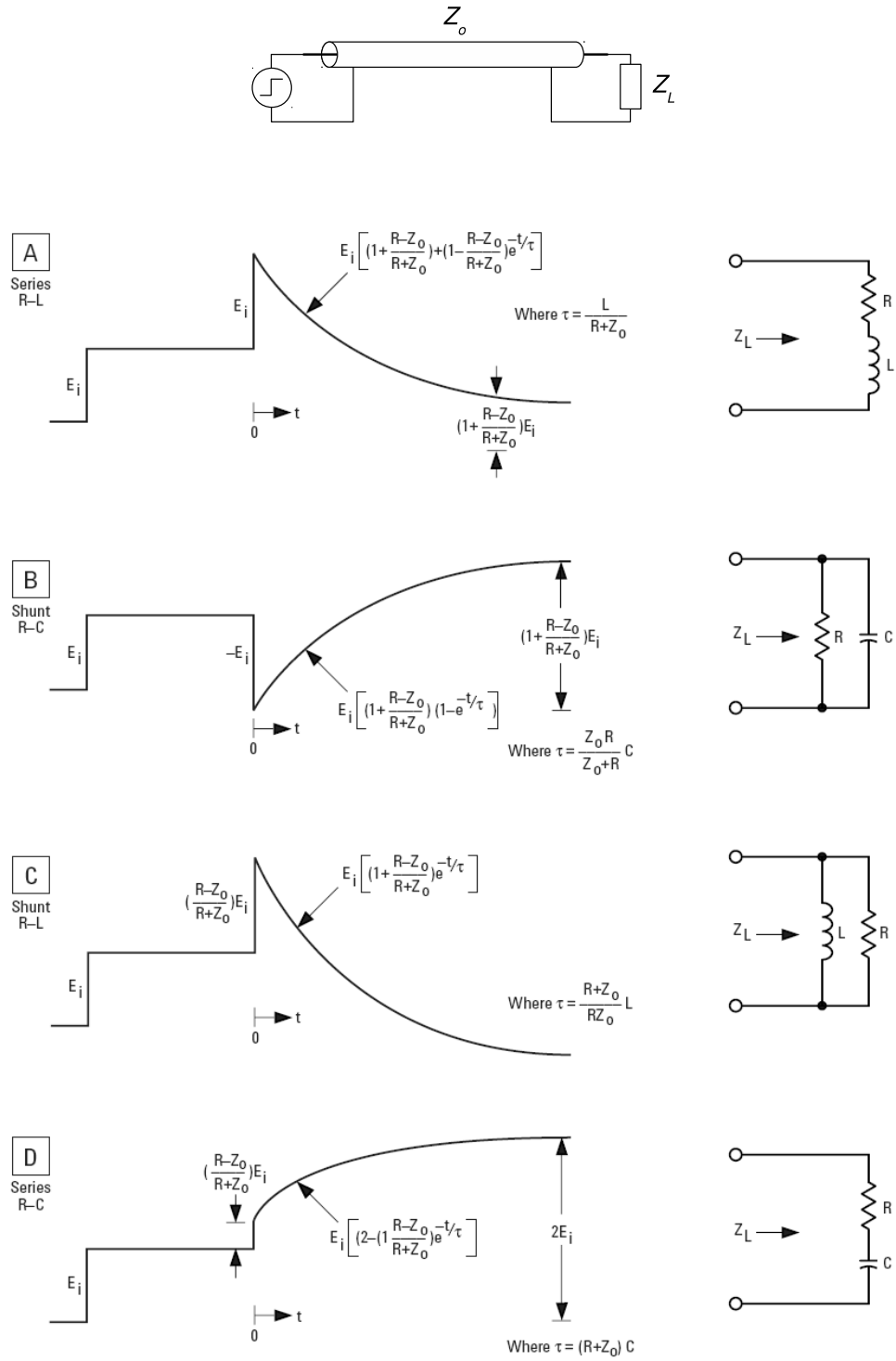


Figura 4: Casos de cargas complejas

## 2. Ejercicios Prácticos

Para la realización de los ejercicios se recomienda la utilización del software Quite Universal Circuit Simulator (QUCS) ya que es libre, funciona en todos los sistemas operativos. Para este caso permite realizar las modificaciones del circuito pertinentes para poner a prueba todos los conceptos teóricos. Si el estudiante se siente más cómodo realizando estos ejercicios con otro software lo puede hacer.

A continuación se desarrollarán consignas y preguntas para ir resolviendo, las mismas se evaluarán por aula virtual en una fecha a convenir.

El circuito a implementar es el de la figura 5, con las modificaciones que se van a ir nombrando. La fuente se encuentra en "sources" con el nombre de **Pulso de tensión**. La línea de transmisión se encuentra en "transmission lines". Se utiliza **Simulación Transitoria** que se encuentra en "simulations". Además, las puntas de tensión se sacan de "probes", por último el resto de los componentes se saca de "lumped components". Todos estos de la versión en inglés de QUCS.

En todos los casos se debe analizar la tensión que se ve entre el generador (Pulso de tensión y resistencia del generador que en el caso de la imagen es  $R2$ ) y la línea. Y la tensión que se observa en el punto de la carga.

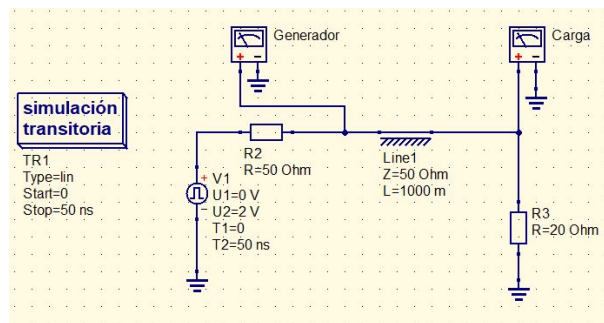


Figura 5: Circuito para realizar las simulaciones

1. Lo primero a probar es cuando la carga es puramente resistiva, modificaremos el valor de la misma para 3 valores: uno igual a la impedancia característica de la línea, uno menor y uno mayor.

En cada uno de los casos calcular el valor del *Coficiente de reflexión*  $\rho$

2. Ahora se comprobará que sucederá en los casos de que la carga sea un cortocircuito o un circuito abierto. ¿Que valores de  $\rho$  se consiguen?
3. Si se han respetado los tiempos de la fuente, las mediciones se han realizado con una onda cuadrada como la de la figura 6. Ahora comprobaremos los 5 casos de cargas anteriores con un pulso a la entrada, esto se consigue modificando el valor de  $T2$  a por un valor entre  $1ns$  y  $5ns$  como se ve en la figura 7. Se puede ver que la señal es la misma, pero el efecto que se observa es distinto, cuando las líneas son muy largas una señal cuadrada se puede observar como si fuera un pulso.

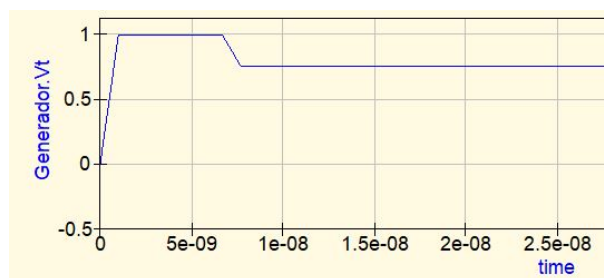


Figura 6: Medición para el caso de que  $Z_L = 20\Omega$  y la señal del generador es cuadrada

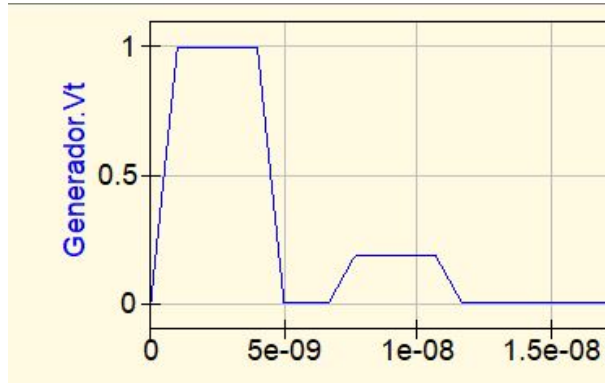


Figura 7: Medición para el caso de que  $Z_L = 100\Omega$  y la señal del generador es un pulso

4. Volviendo a una señal cuadrada y con un caso conocido de carga, se modificará la atenuación de la línea (esto se consigue haciendo doble clic sobre la línea y modificando el valor de **Alpha**). Observar y calcular para 3 casos de atenuación distintos. Tener en cuenta que el valor de la atenuación tiene que ser positivo para que se considere una pérdida en la línea.
5. Luego se comprobará el tiempo que demora la señal en llegar a la carga  $T_d$ . Comprobando que la señal vista en el generador se observa es igual a  $2T_d$ . Modificar la longitud de la línea para ver si se mantiene dicha relación. Esta se modifica haciendo doble clic en la línea y modificando el valor de  $L$ .
6. Ahora se medirán los cuatro casos de cargas complejas. Tener en cuenta que conviene medir con valores de capacitores cercanos a  $0, 1nF$  y valores de inductores cercanos a  $0, 1uH$  para que se puedan observar los cambios. También prestar atención a que las formas de las señales son similares a las vistas en el teórico, pero como estas últimas son ideales las puntas se ven "perfectas", en cambio en las simulaciones no será así.

Calcular el  $\tau$  para cada caso. Además comprobar que cuando se modifica el valor de la resistencia se observan las modificaciones en los valores final o inicial dependiendo el caso.

Practique obtener el valor de la capacitancia/inductancia/resistencia a partir del valor de  $\tau$  y de uno de los valores de la carga.

Otro detalle a comprobar es calcular el valor de la parte real de la impedancia de carga, observando el valor inicial (casos RL paralelo y RC serie) o el valor final (casos RL serie y RC paralelo).

### 3. Discontinuidades Múltiples en líneas de transmisión

Una de las virtudes de la Reflectometría en el Dominio del tiempo (TDR) es la posibilidad de analizar más de una discontinuidad con el mismo circuito de prueba o con el mismo instrumento. Para analizar esto, podemos observar el circuito de la Fig. 8.

Como se puede ver las líneas de transmisión tienen distintas impedancias características, la primera desadaptación que se observa es en la conexión entre  $Z_O$  y  $Z'_O$ , por lo que se produce  $\rho_1$ . Luego la señal se encuentra con la desadaptación entre  $Z'_O$  y  $Z_L$ , donde el resultado es  $\rho_2$ . Si la relación entre las impedancias es  $Z_L > Z_O > Z'_O$ , en la pantalla del osciloscopio podríamos observar una imagen similar al del diagrama de la Fig. 9 en la que se ven las primeras 2 reflexiones.

Como hemos podido observar en las clases teóricas, cada una de las discontinuidades se puede analizar por separado. Tendremos el escalón emitido por el generador  $E_i$ , que cuando arribe a la primer discontinuidad generará la señal reflejada  $E_{r1}$  donde

$$E_{r1} = \rho E_i = \frac{Z'_O - Z_O}{Z'_O + Z_O} E_i$$



De forma similar cuando el escalon llegue a la segunda desadaptación, se generará el Coeficiente de Onda Estacionaria

$$\rho_2 = \frac{Z_L - Z'_O}{Z_L + Z'_O}$$

Solo que ahora se tendrán en consideración 2 cosas, primero que la señal que llegue a la carga del circuito será  $(\rho_1 + 1)E_i$ , segundo la reflexión en la carga es  $[\rho_2(1 + \rho_1)E_i] = E_r L$ , que no es igual a la onda reflejada  $E_r 2$  ya que para poder aproximarnos a este resultado debemos tener en cuenta la onda que refleja de regreso entre  $Z'_O$  y  $Z_O$ , esta generará  $-\rho_1$ .

De esta manera podemos plantear la siguiente ecuación:

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

Como  $\rho'_1$  es igual a  $-\rho_1$ , la relación entre  $E_{r2}$  y  $E_i$  puede ser reescrita de la siguiente forma:

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

El proceso de reflexiones se realiza indefinidamente, pero con el detalle que las ondas reflejadas van tendiendo a cero.

Este ejemplo se puede extrapolar para cualquier caso de discontinuidades múltiples, a continuación veremos el caso en que  $Z'_O = \frac{1}{3}Z_O$

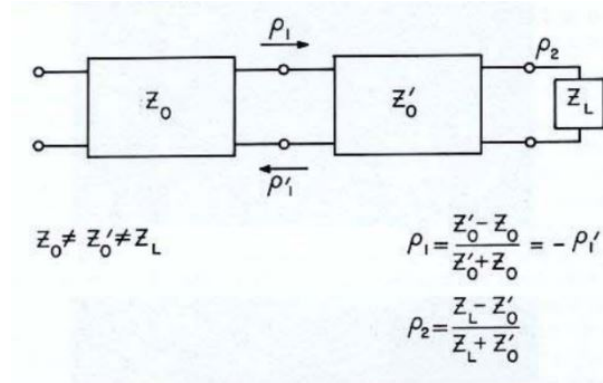


Figura 8: Circuito Discontinuidad Múltiple

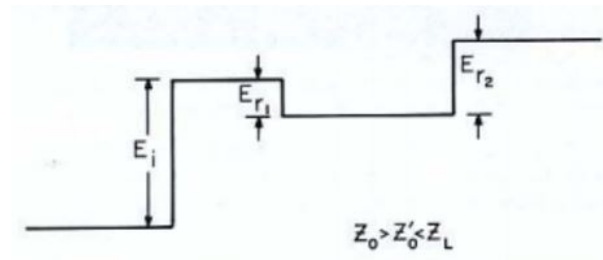


Figura 9: Pantalla de osciloscopio

### 3.1. Transiciones múltiples cuando $Z'_O = \frac{1}{3}Z_O$

Ahora veremos un caso, en el que la impedancia de la segunda línea de transmisión se relacione de la siguiente forma:

$$Z'_O = \frac{1}{3}Z_O$$

Como hemos podido observar previamente, con esta relación de impedancias el coeficiente de reflexión nos queda  $\rho = -0,5$

Por simplicidad, suponemos que ambos tramos de línea son de igual longitud. Llamaremos en todo momento  $E_t$  a la tensión total en la línea, es decir la sumatoria de las ondas incidente y reflejada:  $E_t = E_i + E_r = E_i \cdot (1 + \rho)$  ( $\rho$  puede ser positivo o negativo).

1) La onda incidente  $E_i$  ingresa al cable y llega hasta el primer punto de desadaptación.

2) En el punto de desadaptación se genera una onda reflejada  $E_{r1} = \rho_1 \cdot E_i$ . La suma de esta onda y  $E_i$ ,  $E_t = E_i + E_r$ , se propaga hacia ambos lados de la desadaptación. Esta primera onda total depende **sólo de la primera desadaptación**.

3)  $E_{t1} = E_i/2$  llega al punto de monitoreo (izquierda). En el mismo momento,  $E_t$  llega a la carga, donde se encuentra con un circuito abierto  $\rho_2 = 1$ . Como resultado, una segunda onda total  $E_{t2} = E_i/2 + \rho_2 \cdot E_i/2 = E_i$  regresa hacia el punto medio.

4) En el punto medio,  $E_{t2}$  se encuentra nuevamente con la desadaptación intermedia, pero en este caso el coeficiente de reflexión es  $\rho'_1 = -\rho_1 = +0,5$ . **Para calcular la nueva onda reflejada  $E_{r3}$ , se debe tomar como onda incidente sólo el incremento de tensión respecto al nivel que ya había, es decir  $E_i/2$ , representada en el diagrama por el escalón rojo.** De este modo, la nueva onda total será  $E_i/2$  (ya existente de antes) +  $E_i/2$  (nueva incidente) +  $E_i/4$  (reflejada), quedando  $E_{t3} = E_i \cdot 5/4$ . Esta nueva onda total se propaga hacia ambos lados de la discontinuidad intermedia.

5) La onda total  $E_{t3}$  llega a ambos extremos de la línea. En el punto de observación (osciloscopio) veremos un escalón a nivel  $E_i \cdot 5/4$ . Por otro lado, en la carga se produce una reflejada que, como ya comentamos en 4) depende sólo del **incremental** de tensión respecto a lo que ya había en ese punto, es decir  $E_{r4} = E_{r3} \cdot \rho_2 = +E_i/4$ . Esto produce una  $E_{t4} = E_i \cdot 6/4 = E_i \cdot 3/2$ .

6) El proceso anterior se repite, sumándose escalones cada vez menores hasta llegar al valor final  $E_{tfinal} = 2 \cdot E_i$  que es el que se produciría si la carga estuviera directamente conectada al primer tramo de línea. Qué tanto demore este proceso dependerá de qué tan desadaptados se encuentren los dos tramos de línea, y en consecuencia qué tanto regrese a la carga de cada onda reflejada desde ella.

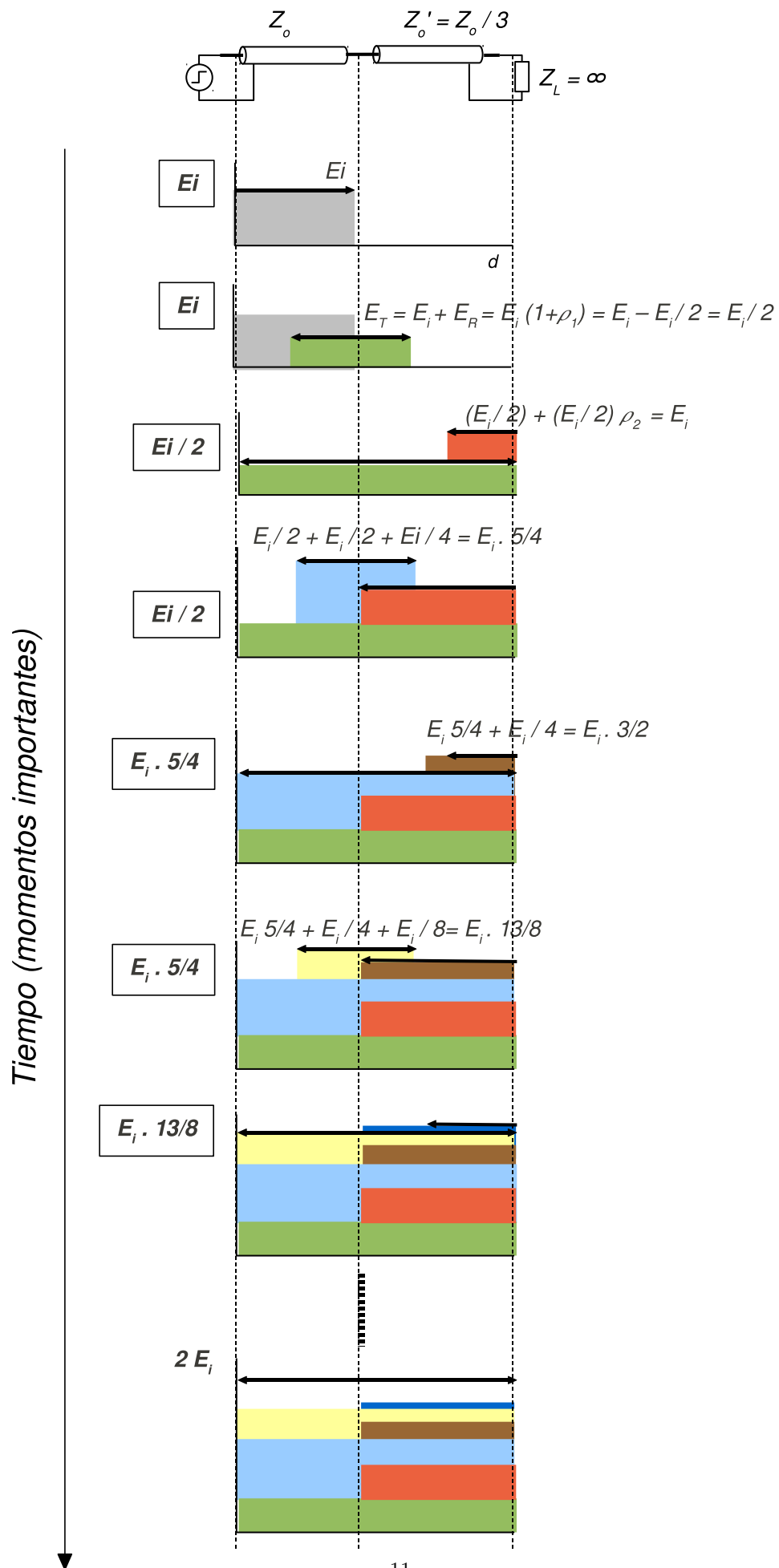


Figura 10: Pasos de reflexion

Analizaremos el diagrama que se observa en la fig 10

### 3.2. Casos de análisis

En esta subsección incluiremos algunos casos ejemplos para poder observar las distintas posibilidades de discontinuidades múltiples con 3 líneas de transmisión,  $Z_O$ ,  $Z'_O$  y  $Z_L$ . En cada uno de los ejemplos se puede observar en línea azul gruesa la medición desde el generador, la línea roja fina el punto intermedio y la línea rosa el punto de medición en la carga.

Probar todos estos casos y calcular las reflexiones para poder entender el tema.

1. Cuando

$$Z_O = 50\Omega; Z'_O = 150\Omega; Z_L = 50\Omega$$

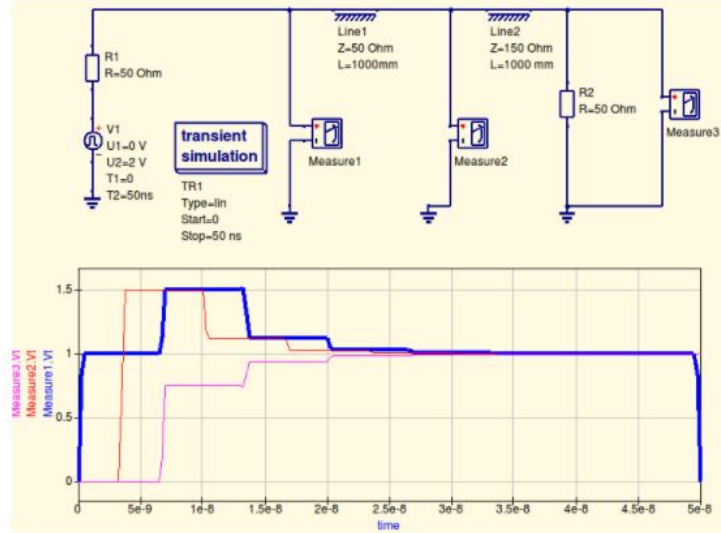


Figura 11:  $Z_O = 50\Omega; Z'_O = 150\Omega; Z_L = 50\Omega$

2. Cuando

$$Z_O = 50\Omega; Z'_O = 150\Omega; Z_L = 300\Omega$$

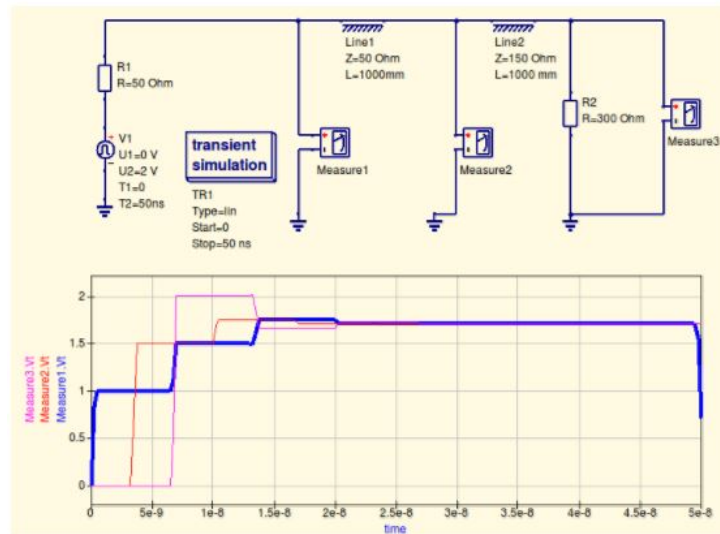


Figura 12:  $Z_O = 50\Omega; Z'_O = 150\Omega; Z_L = 300\Omega$

3. Cuando

$$Z_O = 50\Omega; Z'_O = 300\Omega; Z_L = 150\Omega$$

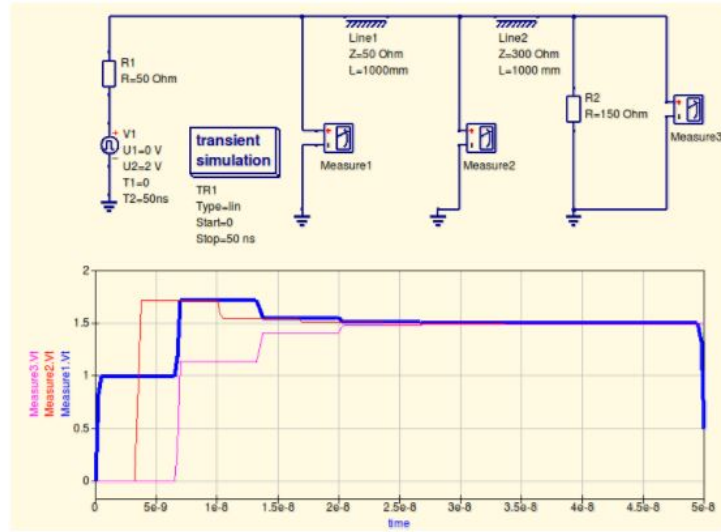


Figura 13:  $Z_O = 50\Omega; Z'_O = 300\Omega; Z_L = 150\Omega$

4. Cuando

$$Z_O = 150\Omega; Z'_O = 50\Omega; Z_L = 150\Omega$$

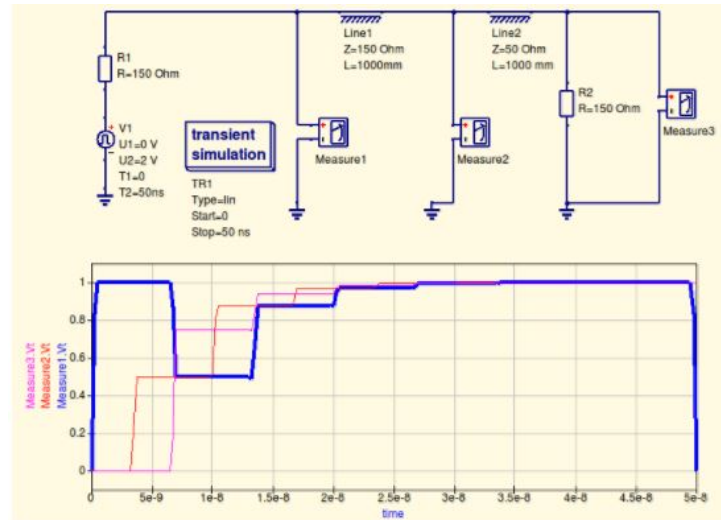


Figura 14:  $Z_O = 150\Omega; Z'_O = 50\Omega; Z_L = 150\Omega$

5. Cuando

$$Z_O = 150\Omega; Z'_O = 50\Omega; Z_L = 300\Omega$$

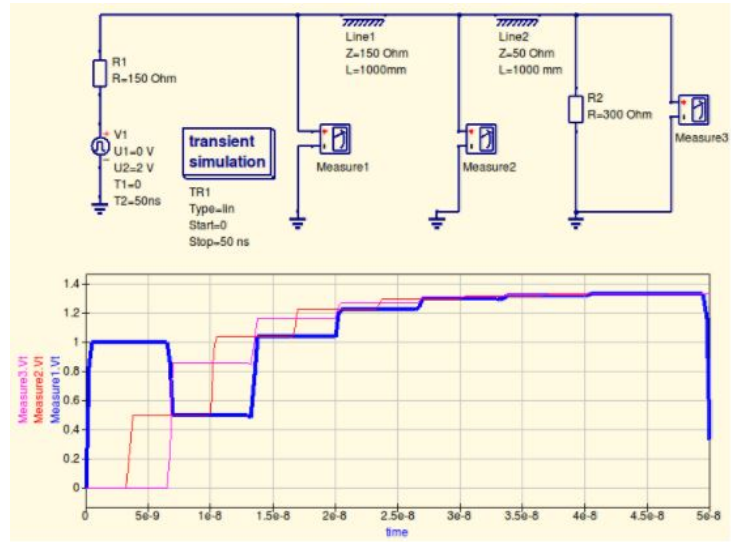


Figura 15:  $Z_O = 150\Omega$ ;  $Z'_O = 50\Omega$ ;  $Z_L = 300\Omega$

6. Cuando

$$Z_O = 150\Omega; Z'_O = 300\Omega; Z_L = 50\Omega$$

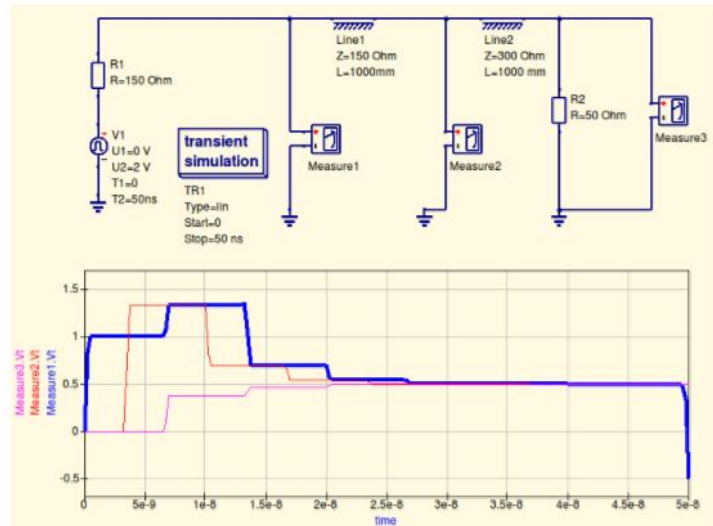


Figura 16:  $Z_O = 150\Omega$ ;  $Z'_O = 300\Omega$ ;  $Z_L = 50\Omega$

7. Cuando

$$Z_O = 300\Omega; Z'_O = 50\Omega; Z_L = 150\Omega$$

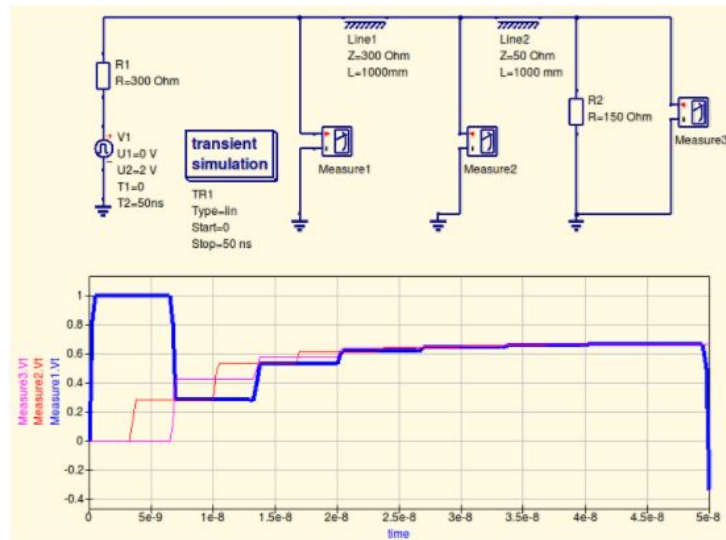


Figura 17:  $Z_O = 300\Omega$ ;  $Z'_O = 50\Omega$ ;  $Z_L = 150\Omega$

8. Cuando

$$Z_O = 300\Omega; Z'_O = 150\Omega; Z_L = 50\Omega$$

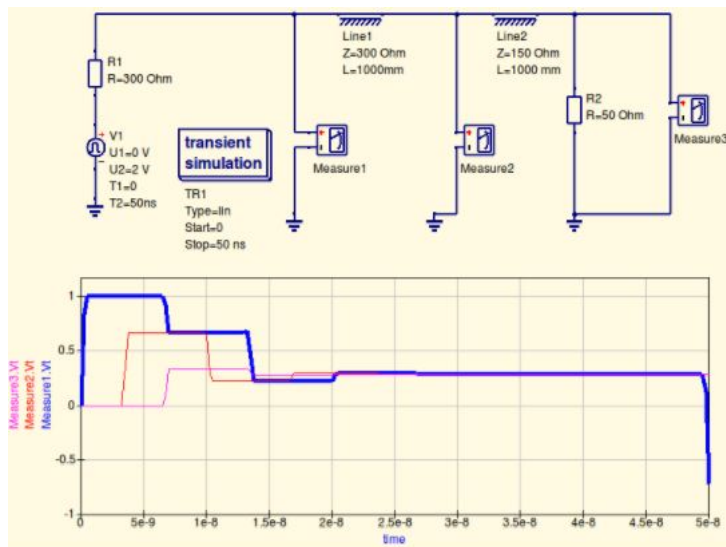


Figura 18:  $Z_O = 300\Omega$ ;  $Z'_O = 150\Omega$ ;  $Z_L = 50\Omega$

## 4. Práctica de análisis

- En la Figura 19 se muestran dos oscilogramas de reflexión por carga real. Se sabe que la línea tiene  $50\Omega$  y no posee atenuación.
  - ¿Qué valores de impedancia se encuentran conectados al extremo de la línea? (Observe el punto de 0V)
  - Si en ambos casos (a) y (b) la línea estuviera terminada en cortocircuito y circuito abierto respectivamente, ¿Qué atenuaciones presentarían las líneas utilizadas?
- Dados los ejemplos de onda 20 (a) y 20 (b), determine a qué valor de carga compleja corresponden, y la longitud de la línea en caso de ser posible. Considere línea de  $Z_o = 50\Omega$  y atenuación despreciable. Luego, en base al caso 20 (c), dibuje cuál sería la forma de onda obtenida.

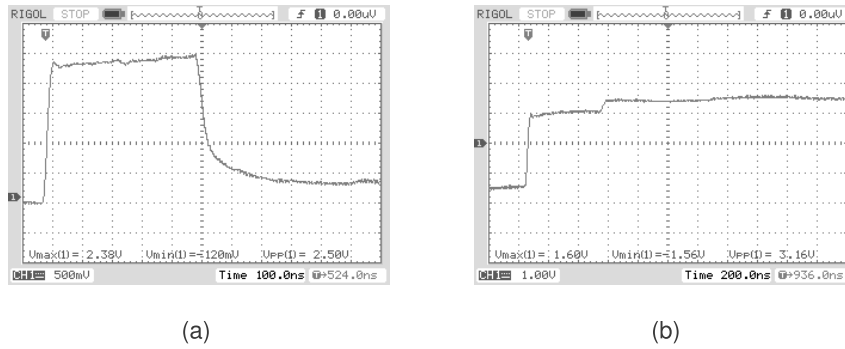


Figura 19: Casos de reflexión por carga real

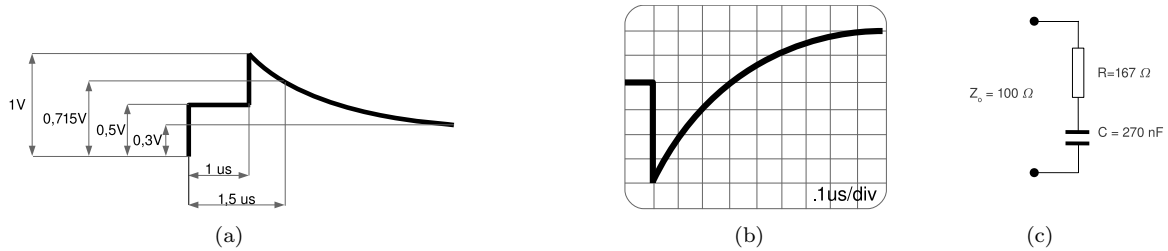


Figura 20: Casos de carga compleja

3. Dadas las reflexiones en los casos escalon y pulso de la Fig. 21, graficar cuando sea posible la onda que se observaría en sus contrapartidas pulso/escalón respectivamente y a qué tipo de carga y longitudes corresponden. Considere atenuación despreciable.

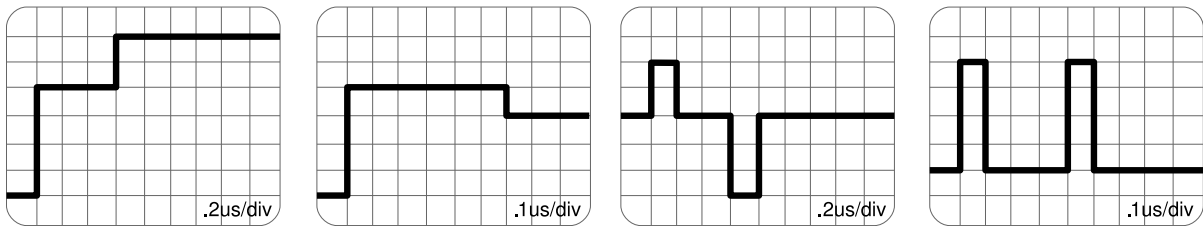


Figura 21: Escalon vs pulso

Comentar qué sucedería en este ejemplo si la impedancia del generador está desadaptada, y cómo se podría subsanar este problema.

En una de los casos de la Fig. 21 se cometió un error de medición. Indique de qué caso se trata y por qué es erróneo.

4. Una línea con discontinuidades múltiples presenta las siguientes características:

$$Z_o = 300 \, \Omega, Z'_o = 50 \, \Omega, Z_L = 75 \, \Omega, L_{\text{línea}} = 75 \, \text{metros}, V_p = 0,8 \, V_c, \alpha \text{ despreciable}$$

Grafique la forma de onda esperada en base a lo aprendido en el curso teórico, comentando a qué valor tenderá  $E_{T_2}$  para  $t = \infty$ .

5. ¿Se puede calcular la impedancia característica de una línea a partir de una medición con carga desadaptada?
6. Si se sospecha que una discontinuidad se encuentra en la zona de subida del escalón de entrada, ¿cómo se podría modificar la disposición de test para observarla?

#### 4.1. Cuestionario de Autoevaluación

1. Definir que es una línea de transmisión y principales características que presenta.



2. Por qué es muy importante adaptar líneas de transmisión tanto del lado del generador como de la carga?
3. ¿Qué es posible obtener en la medición con reflectometría?
4. ¿Qué tipos de señales se utilizan para realizar TDR y por qué?
5. ¿Si tenemos que la  $Z_L = Z_0$ , ¿cuánto vale su ROE?
6. Si se presentan los casos de cortocircuito/circuito abierto en el extremo final, ¿cuál es la ROE?
7. ¿Cómo debe ser la carga para tener un coeficiente de reflexión nulo?
8. ¿Cómo resulta más práctico medir atenuación?
9. Si la señal incidente está en fase con la reflejada ¿Cuánto vale su coeficiente de reflexión?
10. Si en una línea se conecta una carga  $R$  en serie con  $L$  ¿Cómo se calcula su  $\tau$ ?
11. ¿Qué diferencias pudo observar entre las tres etapas de medición?
12. ¿Qué sucede cuando la primer linea de transmisión esta desadaptada con la impedancia del generador?
13. ¿De qué dependen la cantidad de reflexiones intermedias hasta que se estabiliza la señal?