

Taller de Comunicaciones Eléctricas

Introducción Laboratorio 2

Ing. Sergio Arriola-Valverde. M.Sc
Ing. Néstor Hernández Hostaller. M.Sc
Ing. Alexander Barrantes Muñoz

Escuela de Ingeniería Electrónica
Instituto Tecnológico de Costa Rica

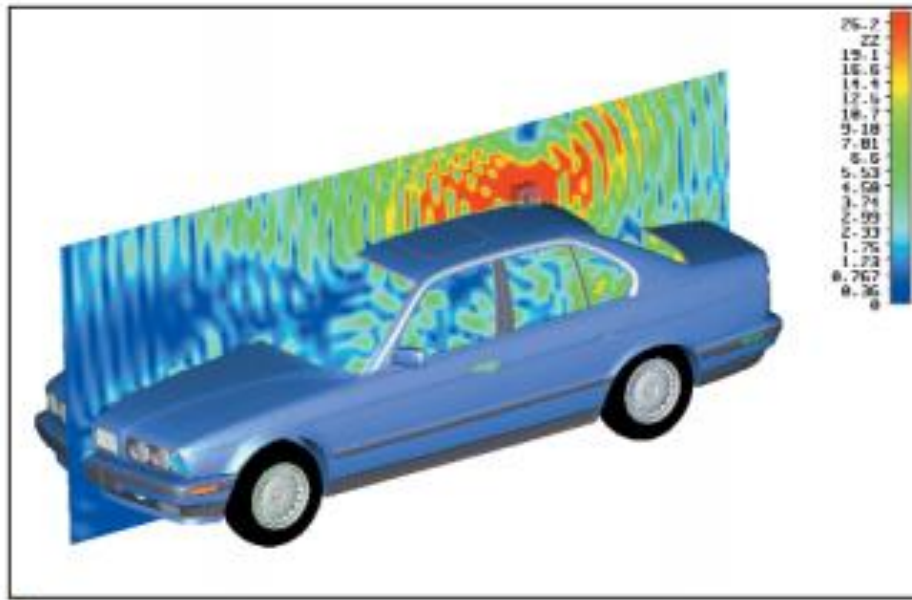
Contenidos y Cronograma

- Entornos de Simulación RF
- Líneas de Transmisión
- Componentes de radio frecuencia

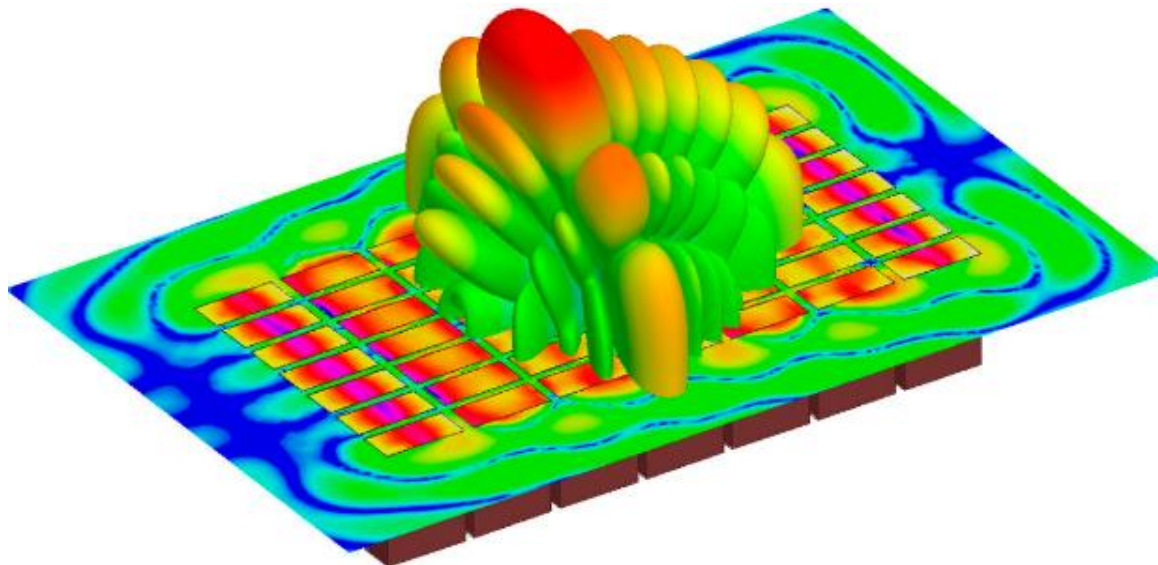
Contenidos y Cronograma

- Entornos de Simulación RF
- Líneas de Transmisión
- Componentes de radio frecuencia

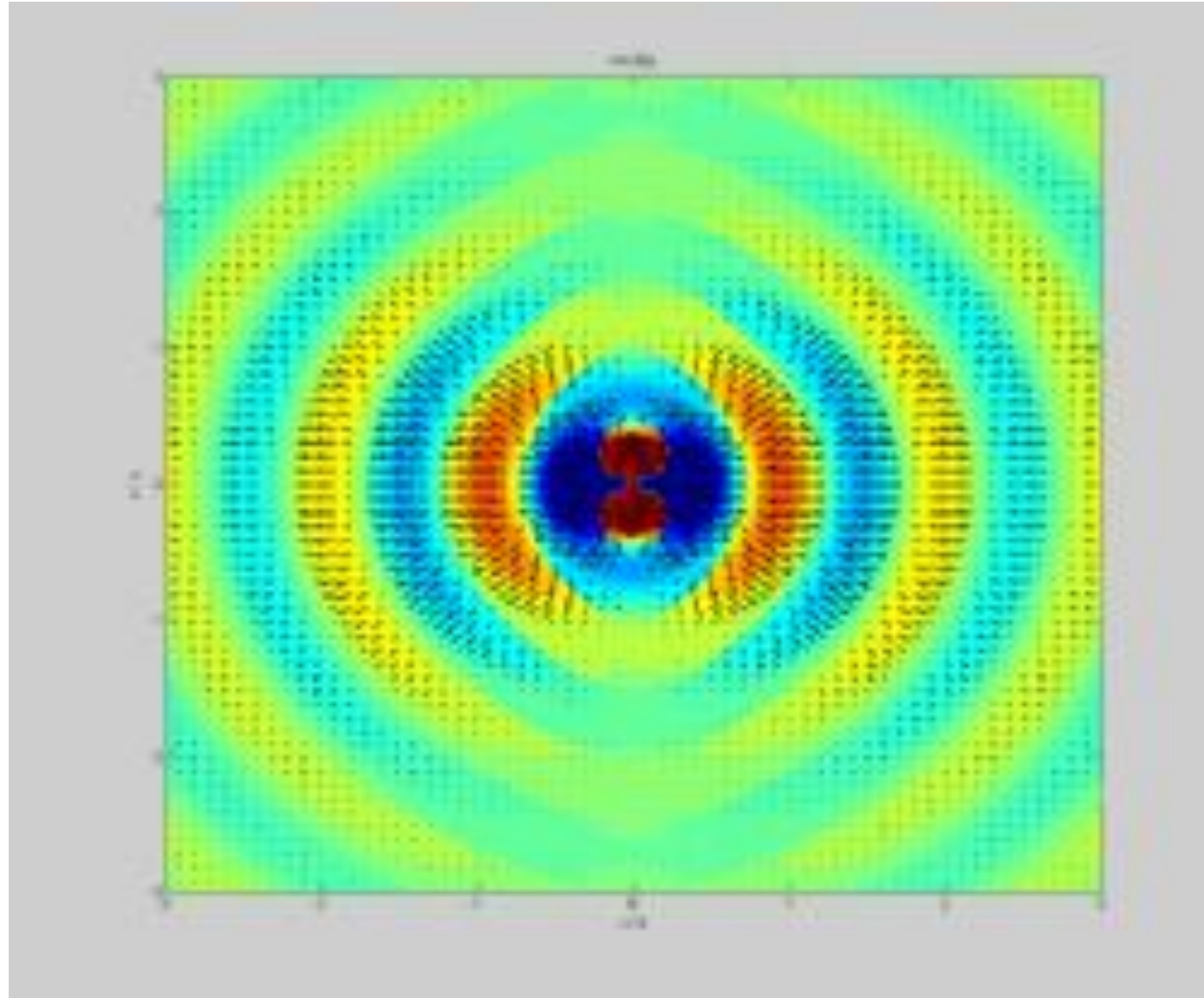
Simulación Electromagnética



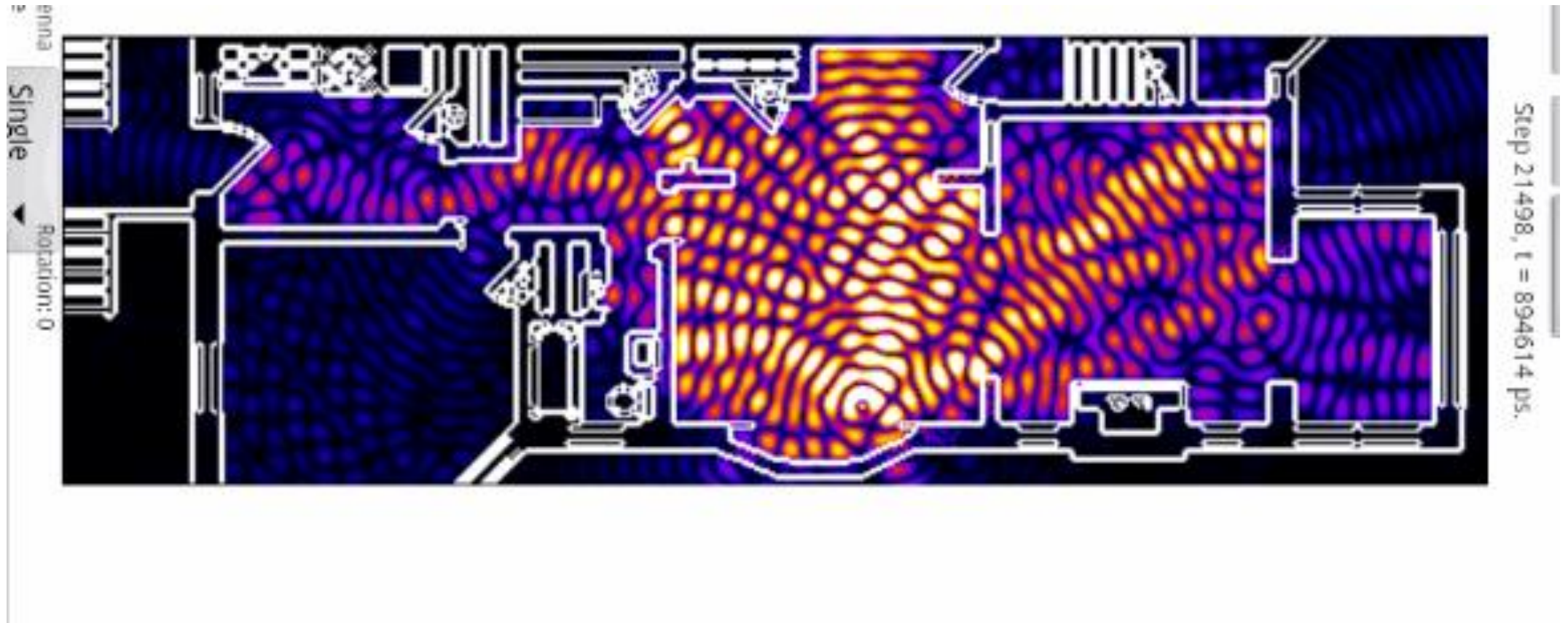
Herramientas CAD para simulaciones electromagnéticas: simuladores tipo SPICE mejorados para manejo de líneas de transmisión, librerías con componentes de radiofrecuencia y procesos de fabricación de IC. Frecuentemente se interfazan con solucionadores numéricos.



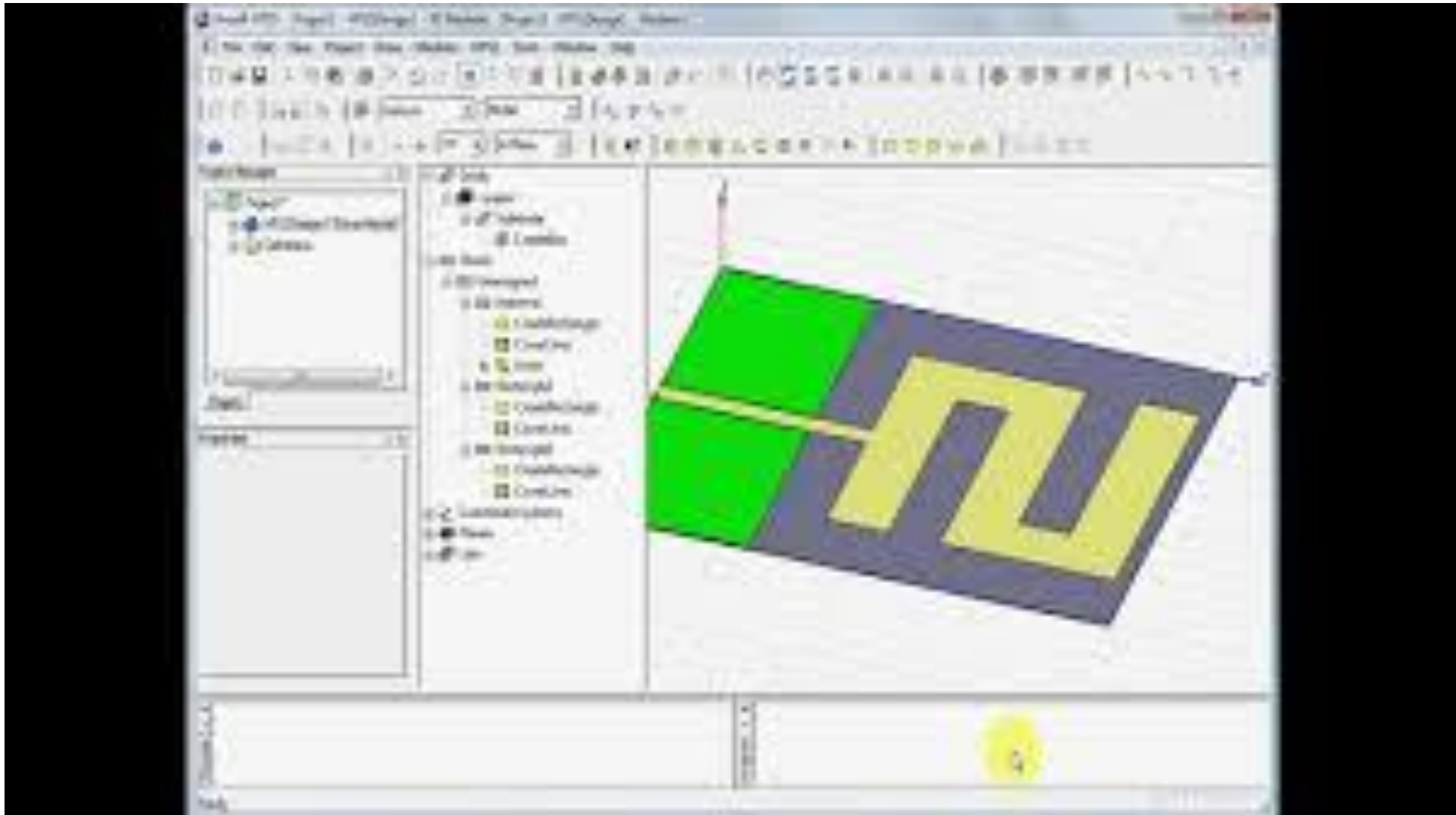
Simulación Electromagnética



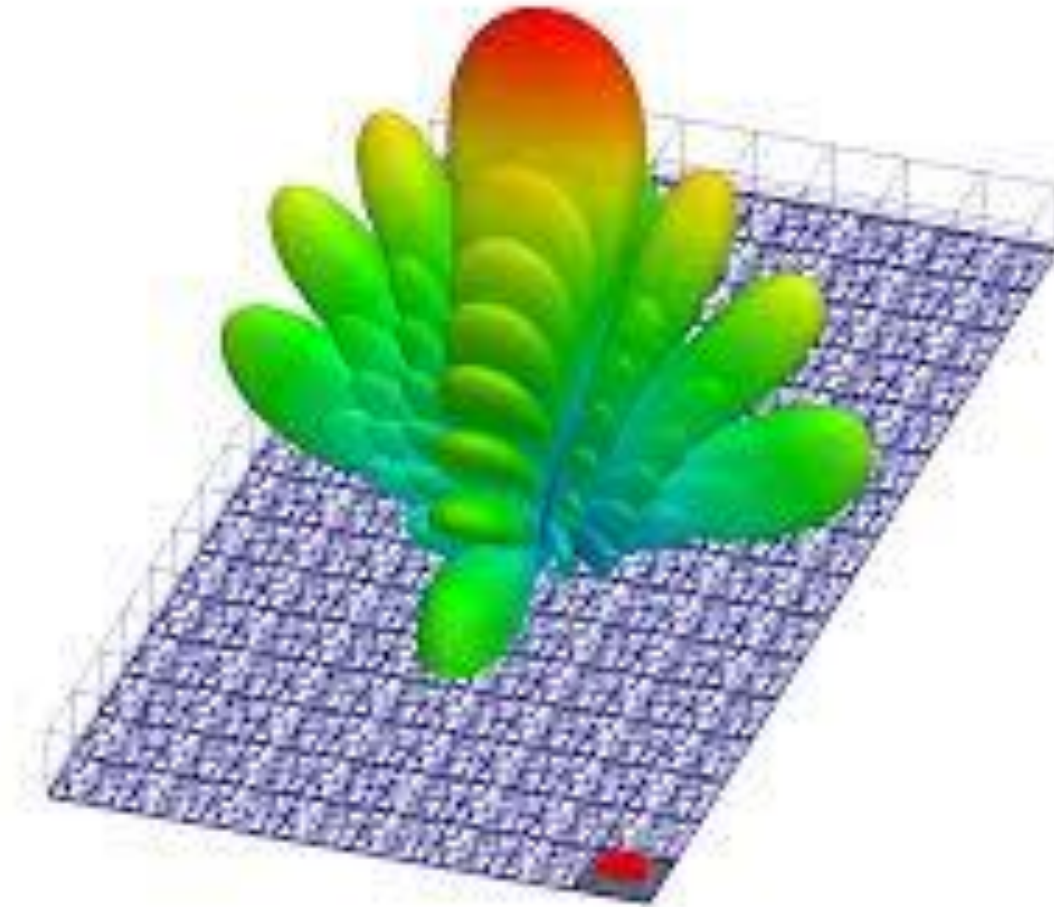
Simulación Electromagnética



Simulación Electromagnética



Simulación Electromagnética



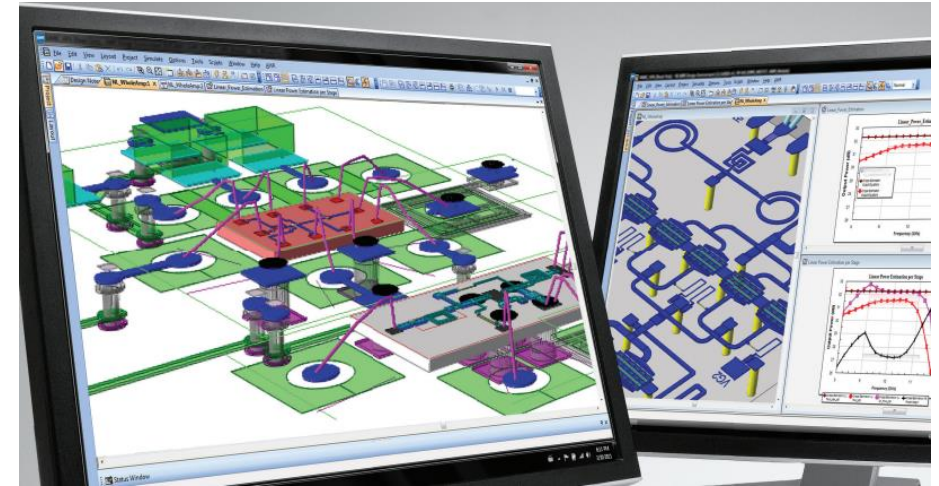
Microwave Office de AWR/NI

Capacidades:

- Diseño esquemático y layout.
- Simulación de circuitos lineales y no lineales.
- Análisis EM.
- Síntesis, optimización y análisis de fallas.
- Soporte PDK para tecnologías de IC.

Aplicaciones:

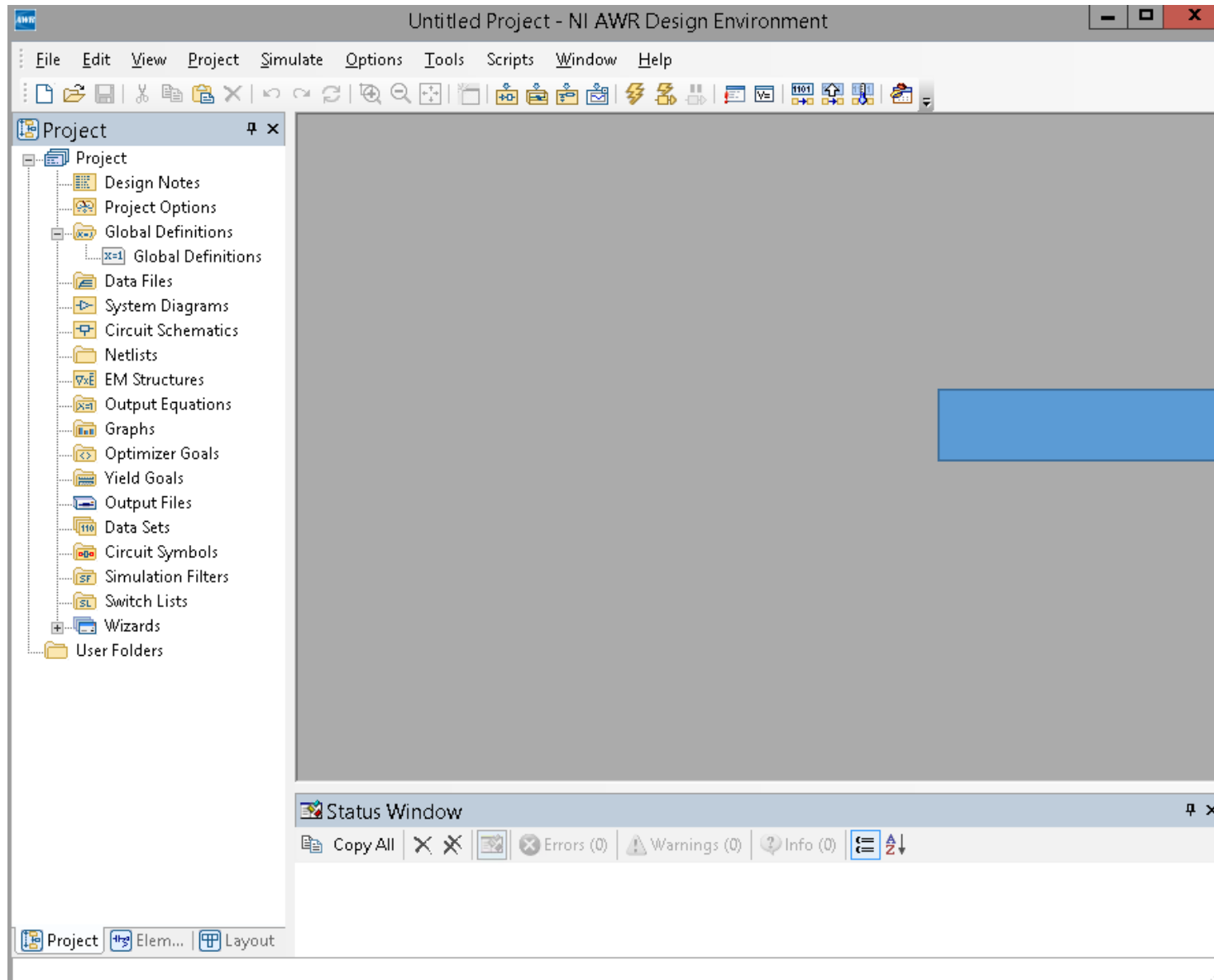
- Circuitos Integrados para aplicaciones en microondas (MICs).
- Interconexiones para RF (PCBs).
- Ensamblajes para RF.
- Simulación numérica de antenas.



Tomado de NI AWRNational Instruments

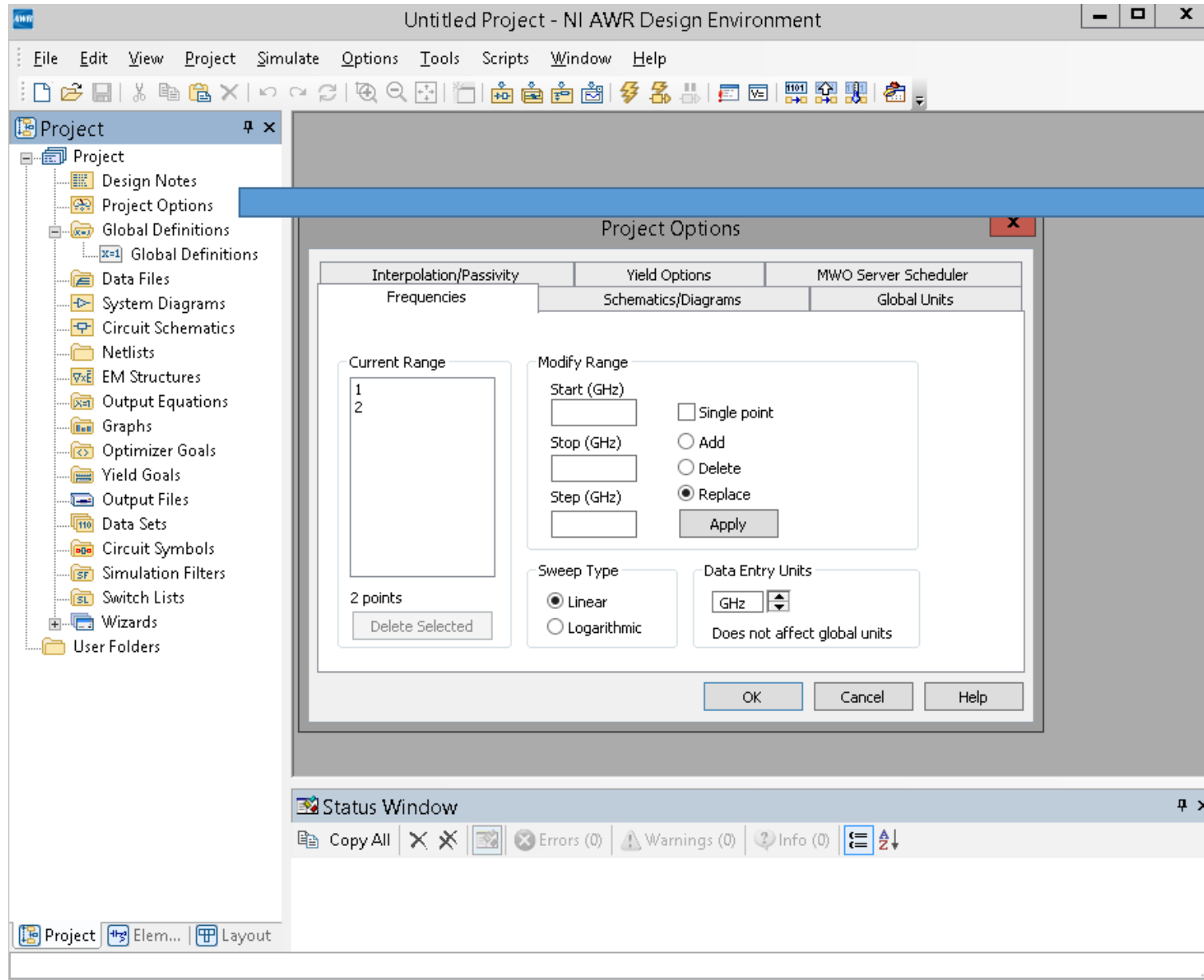
<http://www.awrcorp.com/products/microwave-office>

Microwave Office de AWR/NI



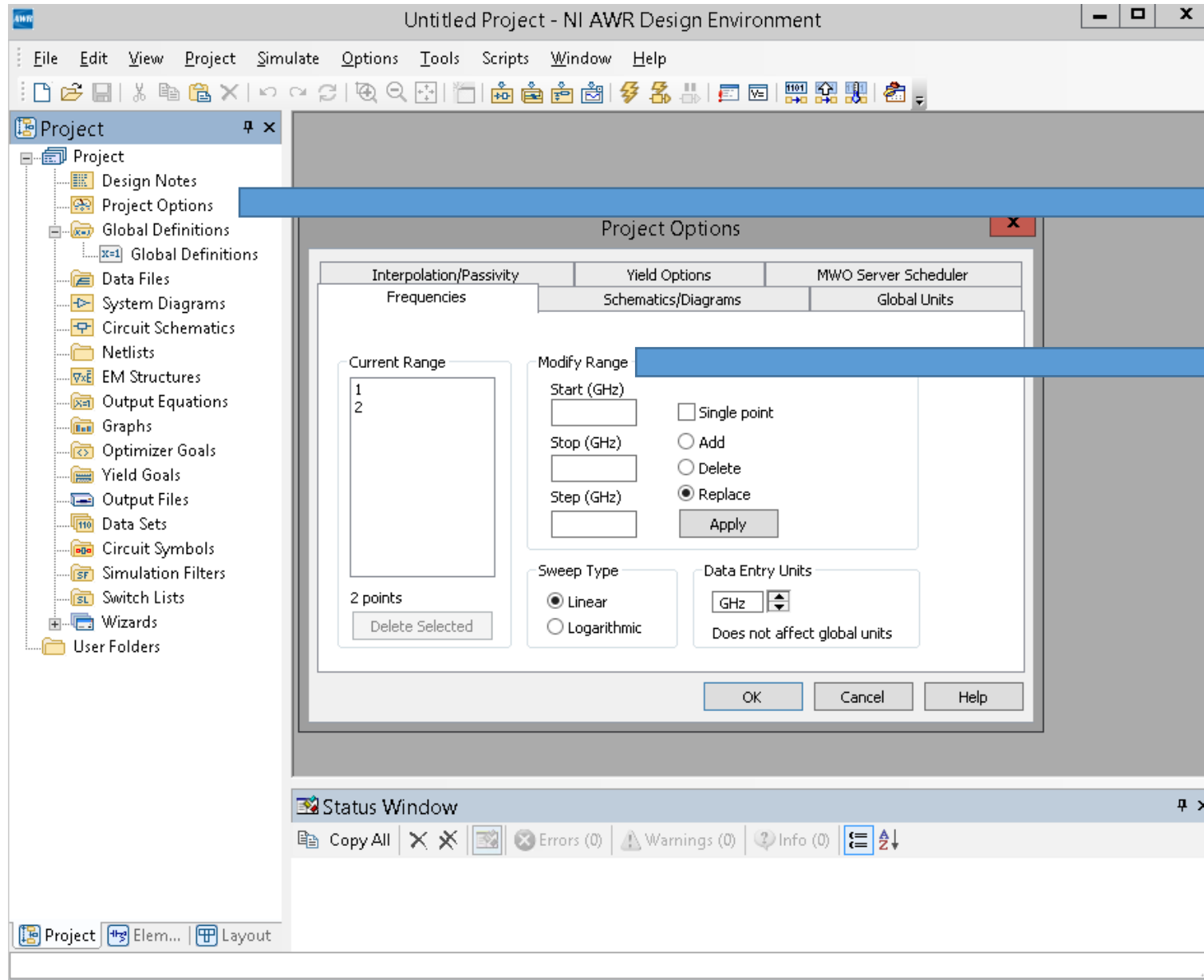
Panel frontal

Microwave Office de AWR/NI



Configuración de
frecuencias de
barrido

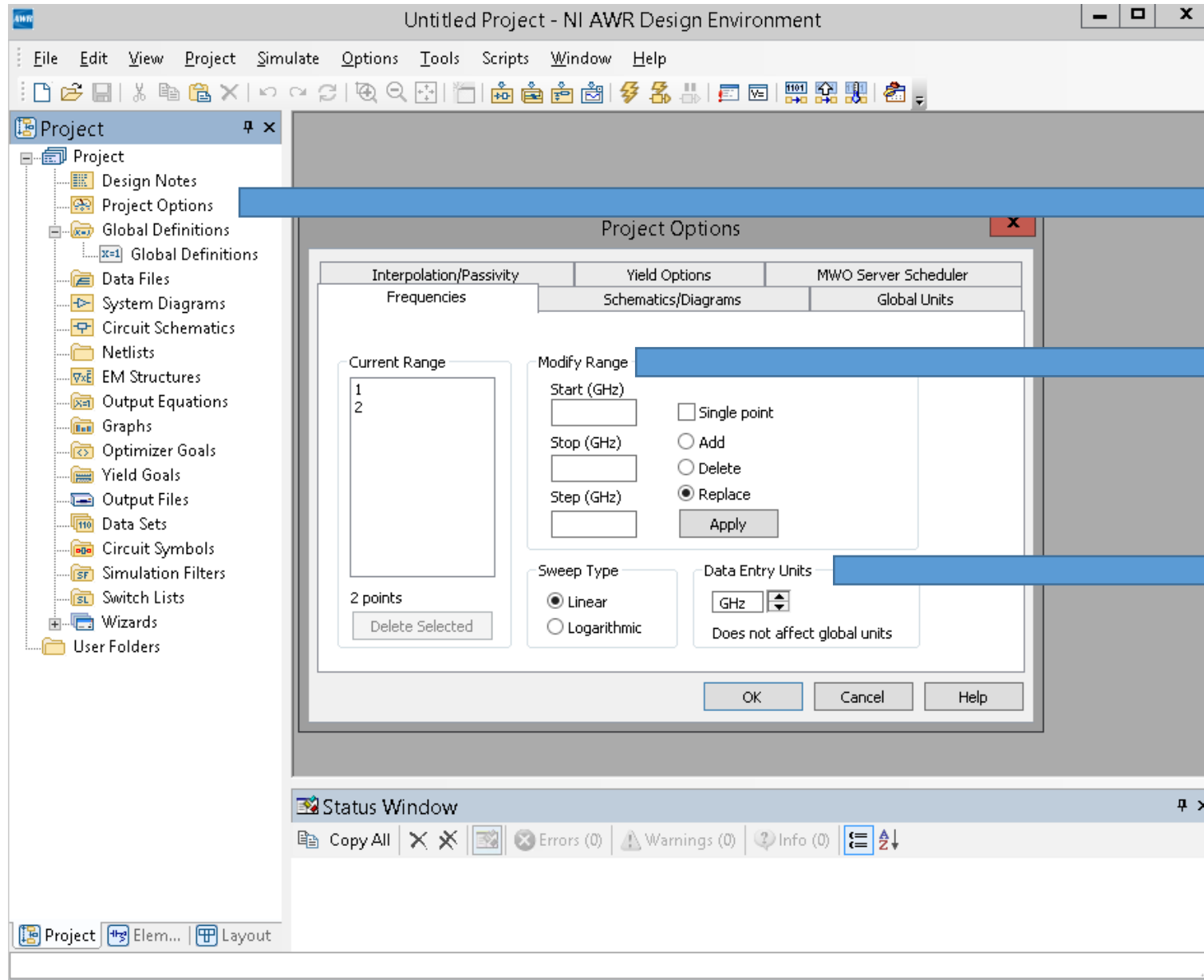
Microwave Office de AWR/NI



Configuración de
frecuencias de
barrido

Inserción de
valores

Microwave Office de AWR/NI

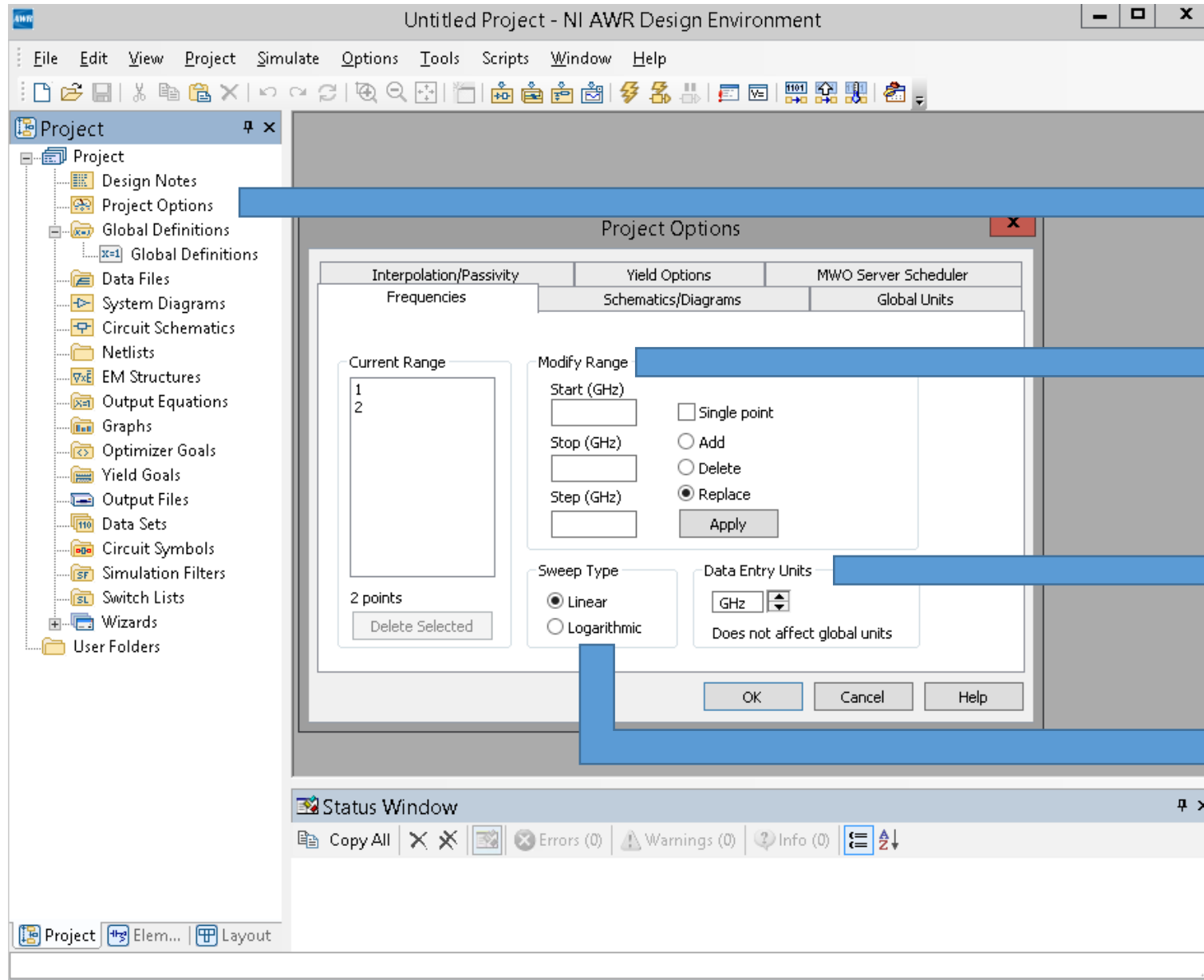


Configuración de
frecuencias de
barrido

Inserción de
valores

Unidades

Microwave Office de AWR/NI



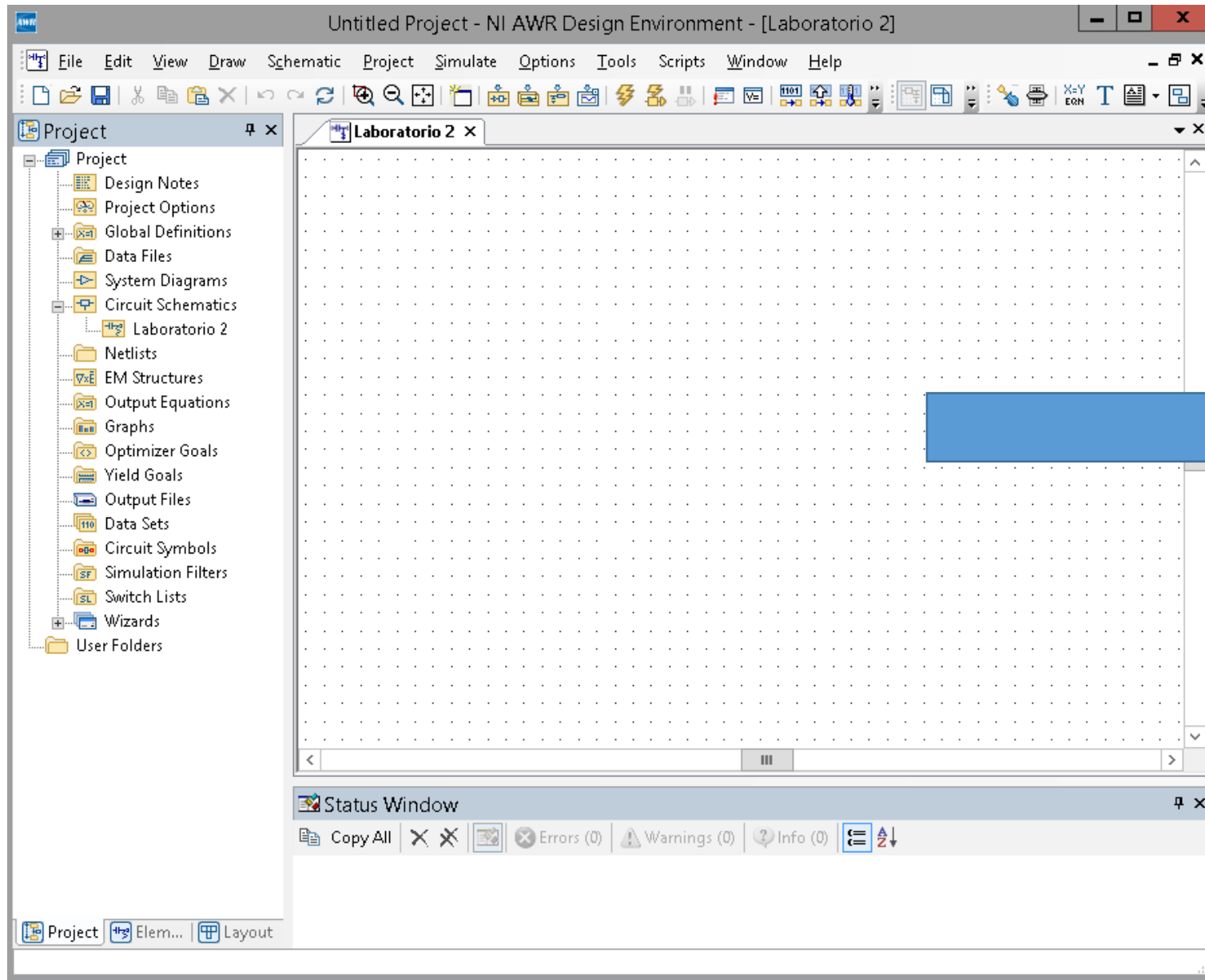
Configuración de
frecuencias de
barrido

Inserción de
valores

Unidades

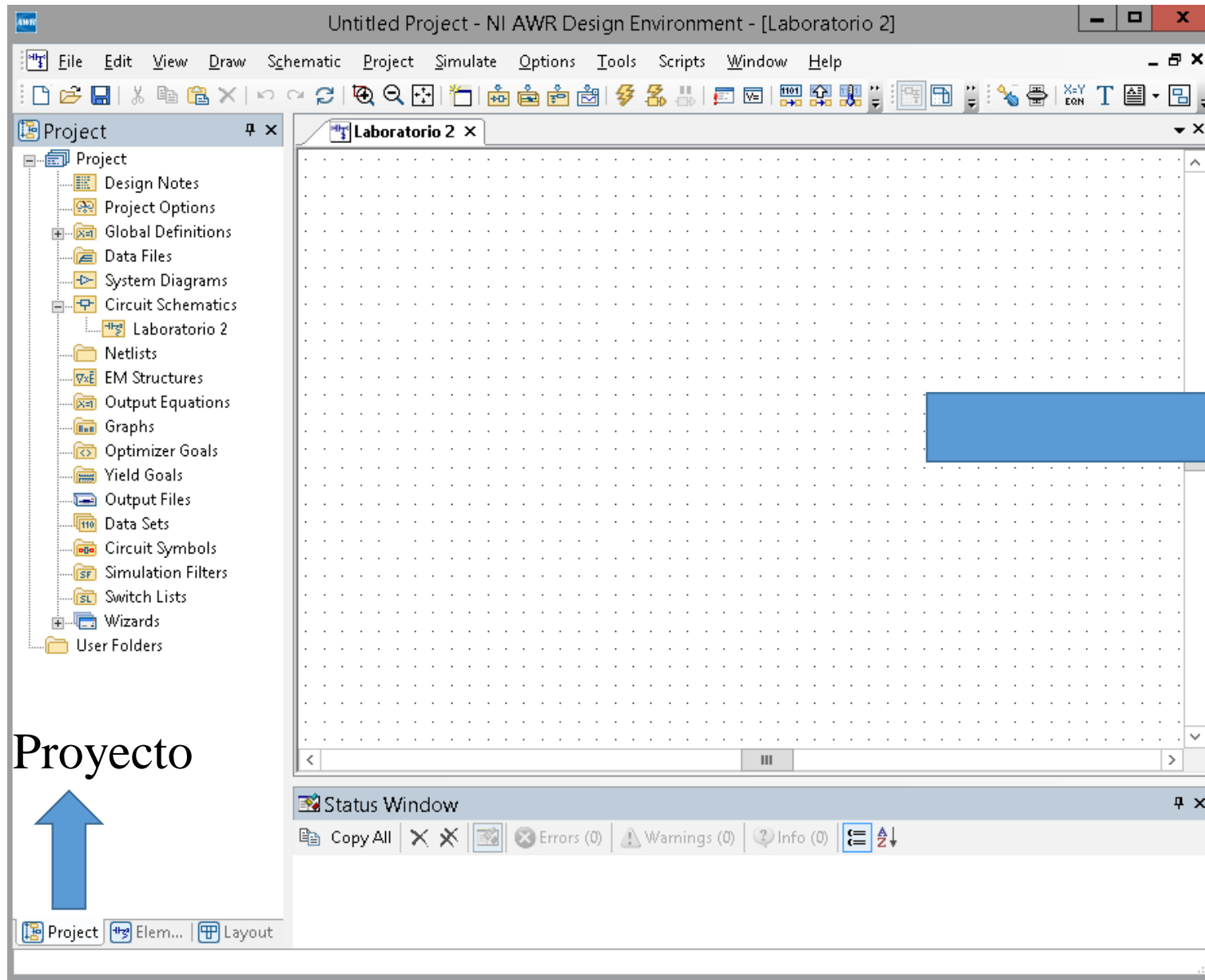
Tipo de barrido

Microwave Office de AWR/NI



Panel de
esquemático

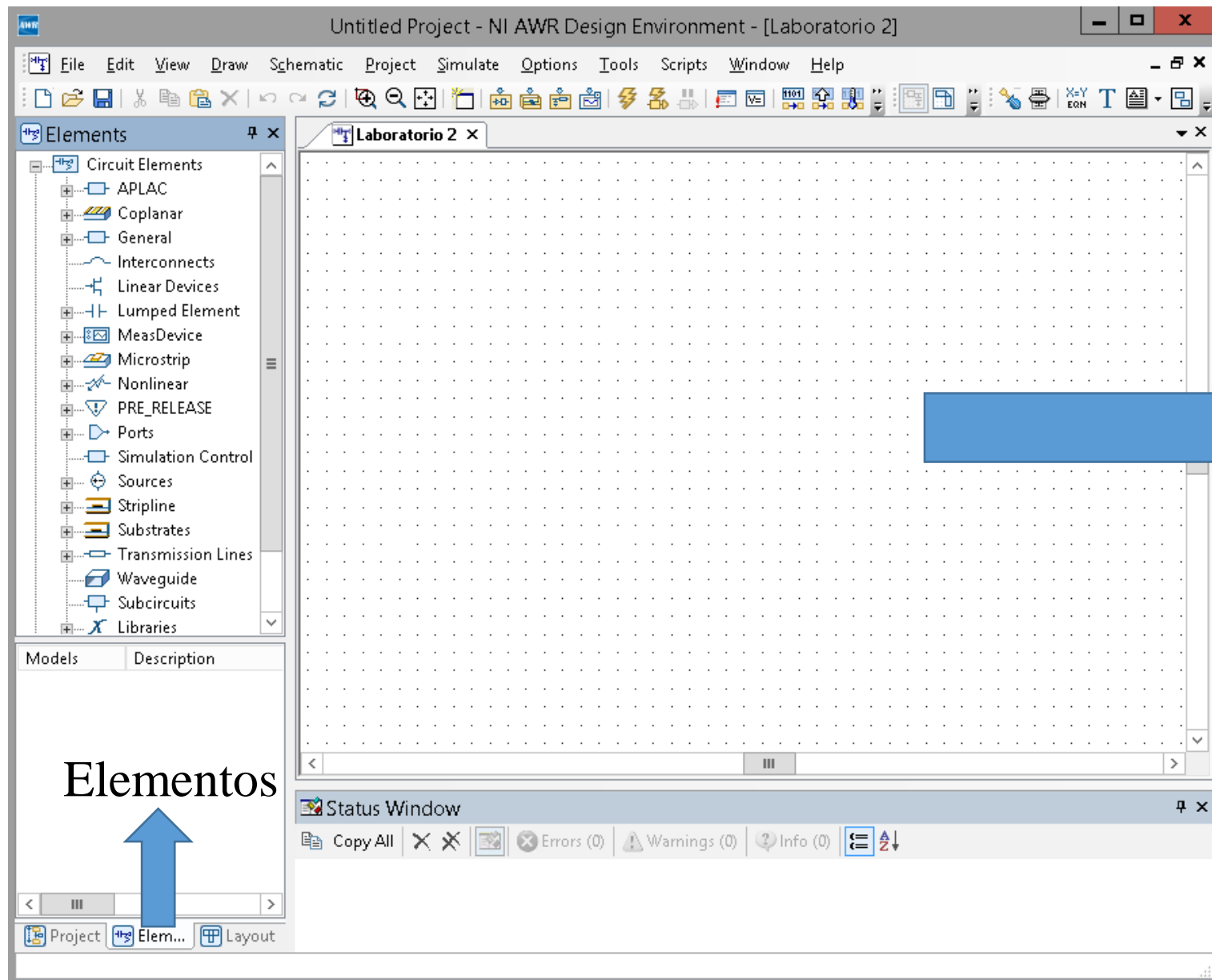
Microwave Office de AWR/NI



Panel de
esquemático

Proyecto

Microwave Office de AWR/NI



Panel de
esquemático

Elementos

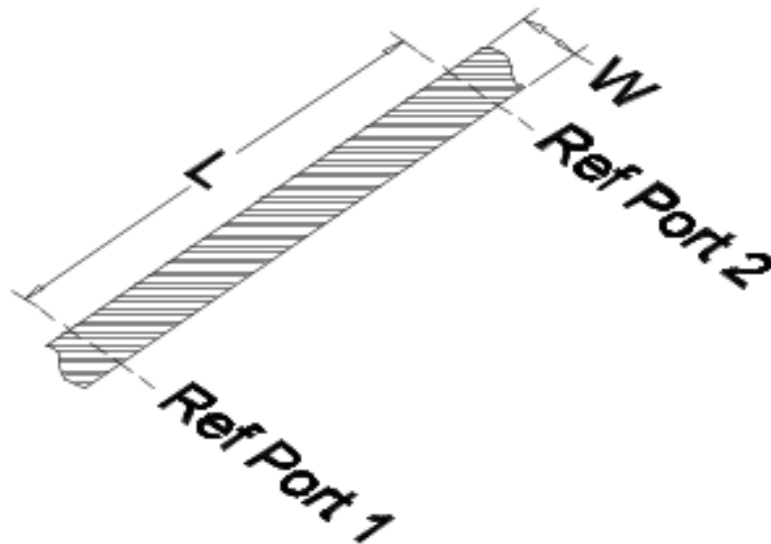
Microwave Office de AWR/NI

Microstrip Line (Closed Form): MLIN

Symbol



Topology



Restrictions

$0.02 \leq W/H \leq 20$ recommended

$T/W \leq 0.7$ recommended

$T/H \leq 0.5$ recommended

$\epsilon_r \leq 16$ recommended

$1 \leq \epsilon_r$ required

$\text{Tand} \geq 0$ required

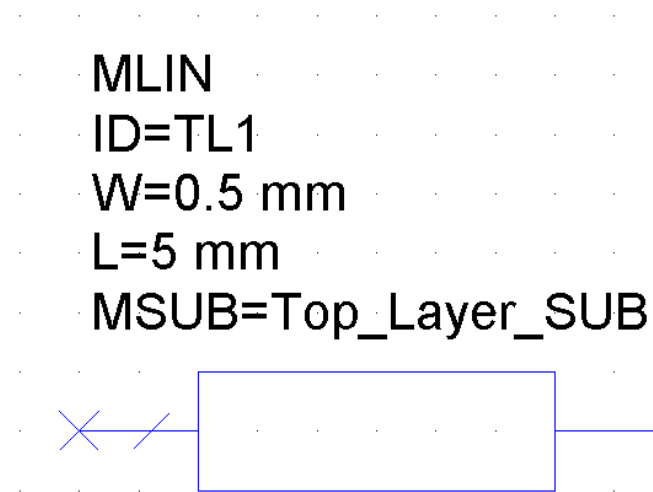
$0 \leq \text{Rho} \leq 1000$ required

$0 \leq \text{Rho} \leq 100$ recommended

Microwave Office de AWR/NI

Parameters

Name	Description	Unit Type	Default
ID	Element ID	Text	TL1
W	Conductor width	Length	W ^[1]
L	Conductor length	Length	L ^[1]
<u>MSUB</u>	Substrate definition	Text	MSUB# ^[2]



Microwave Office de AWR/NI

Open Microstrip Line With End Effect (Closed Form): MLEF

Symbol



Parameters

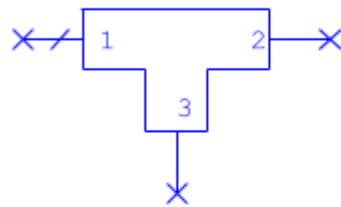
Name	Description	Unit Type	Default
ID	Element ID	Text	TL1
W	Conductor width	Length	W ^[1]
L	Conductor length	Length	L ^[1]
MSUB	Substrate definition	Text	MSUB# ^[2]

MLEF
ID=TL3
W=0.5 mm
L=5 mm
MSUB=Top_Layer_SUB

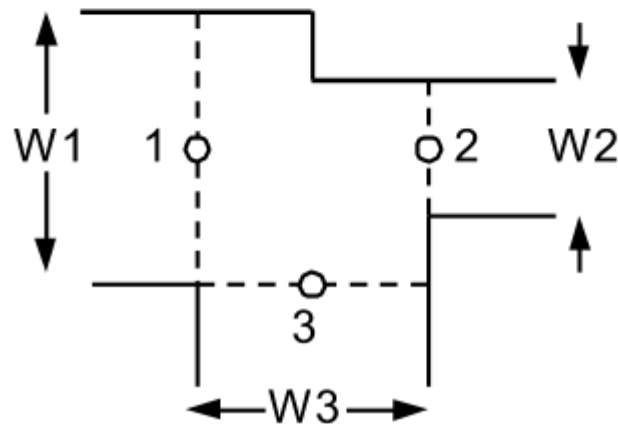
Microwave Office de AWR/NI

Microstrip Tee - Junction (Closed Form): MTEE

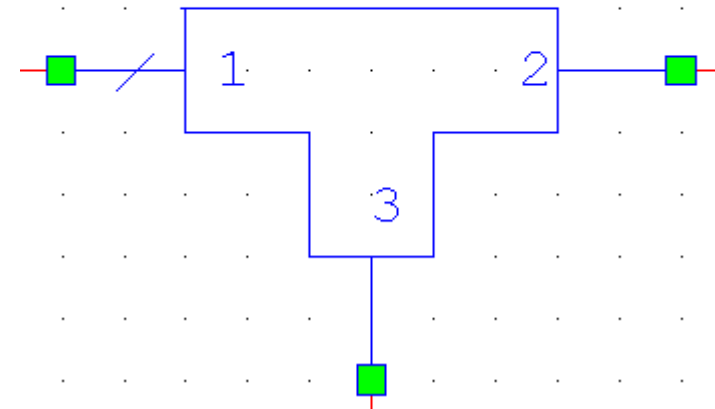
Symbol



Topology



MTEES
ID=TL4
MSUB=Top_Layer_SUB



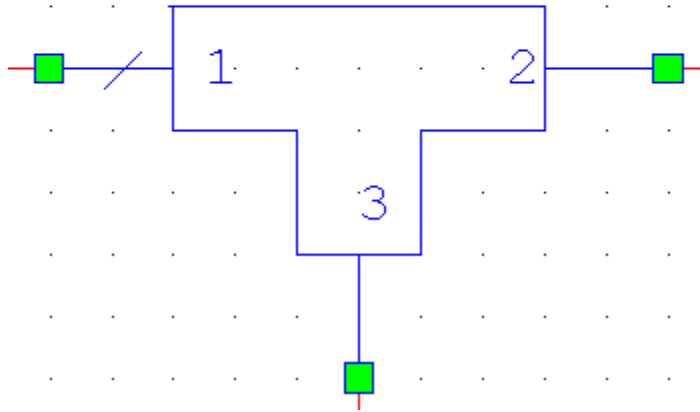
Microwave Office de AWR/NI

Parameters

Name	Description	Unit Type	Default
ID	Name	Text	TL1
W1	Conductor width @ node 1	Length	W ^[1]
W2	Conductor width @ node 2	Length	W ^[1]
W3	Conductor width @ node 3	Length	W ^[1]
MSUB	Substrate name	Text	MSUB ^[2]

Microwave Office de AWR/NI

MTEES\$
ID=TL4
MSUB=Top_Layer_SUB

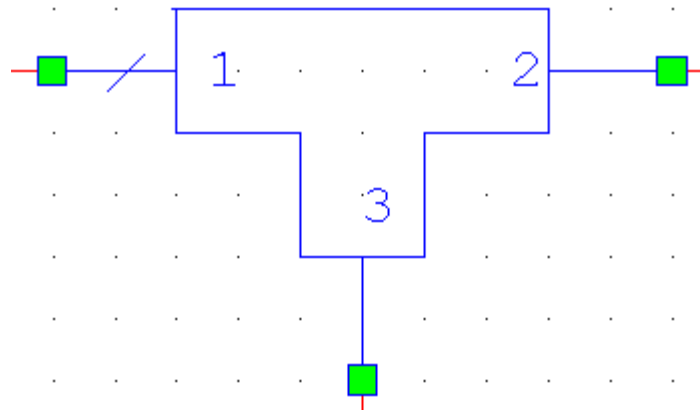


El modelo en el dominio de la frecuencia esta basado en un modelo empírico (modelo analítico).

Modelo de calculo en la unión es calculado por la modelo de Hammerstad

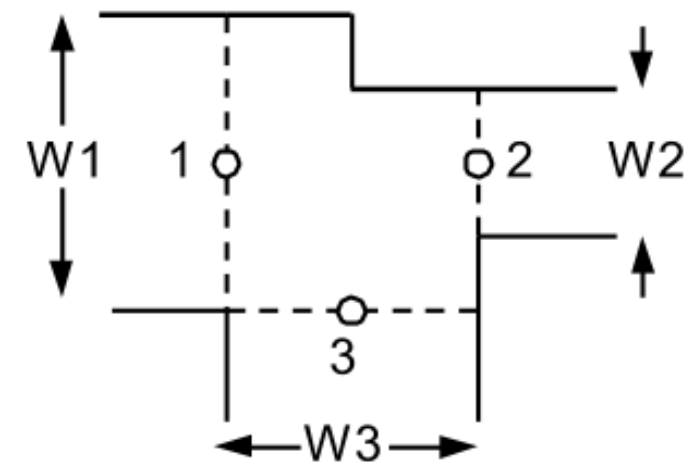
Microwave Office de AWR/NI

MTEES\$
ID=TL4
MSUB=Top_Layer_SUB



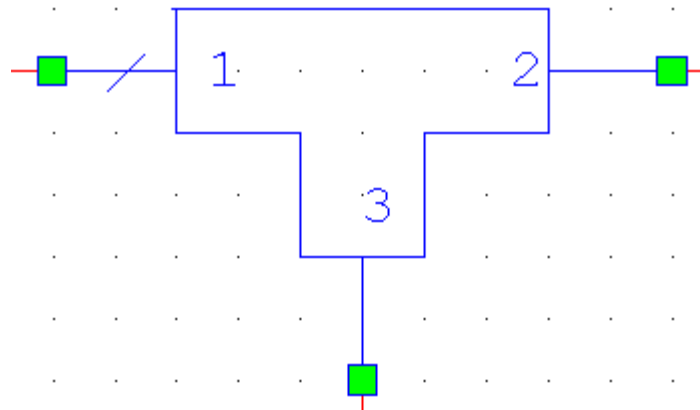
La interconexión entre el puerto 1 y 2 se asume que esta interconectado de manera alineada

Topology



Microwave Office de AWR/NI

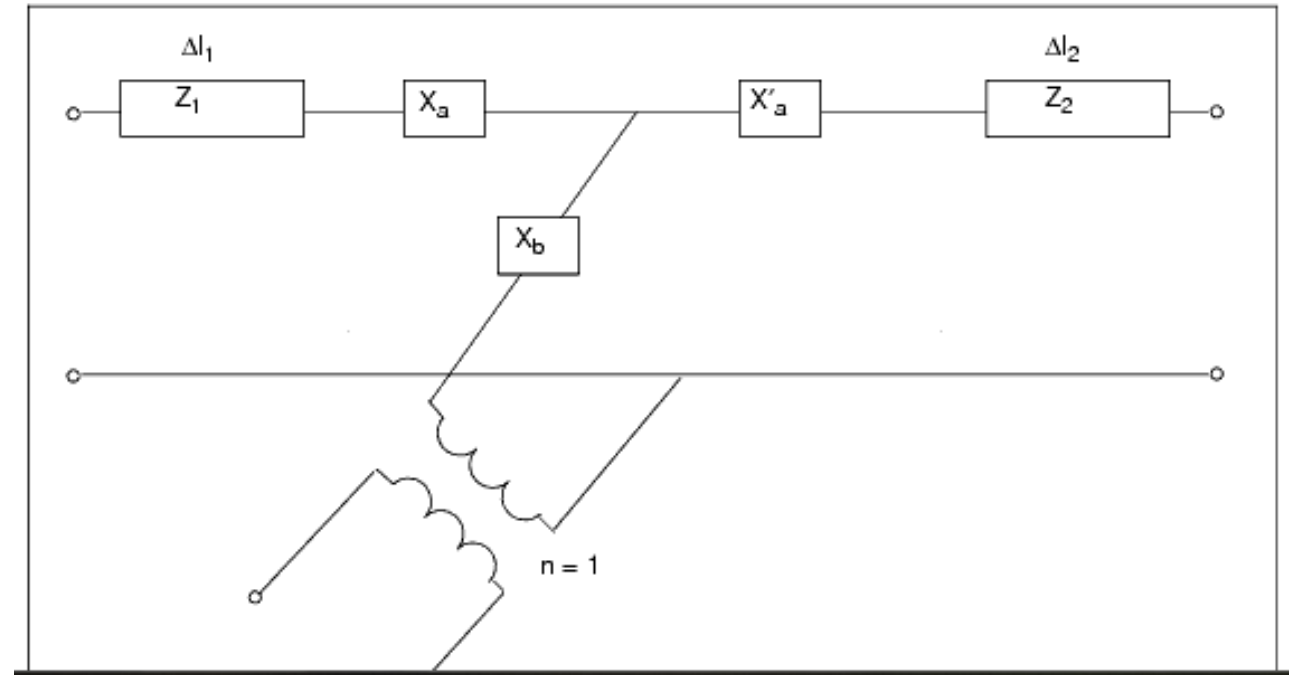
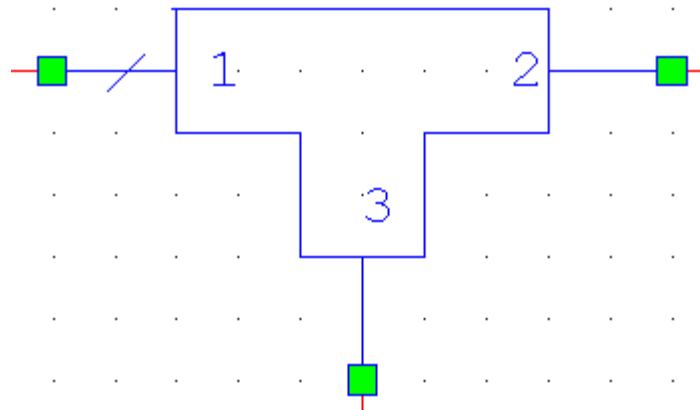
MTEES\$
ID=TL4
MSUB=Top_Layer_SUB



Para análisis temporal, la respuesta la impulso es obtenida a partir del modelo analítico usado en el dominio de la frecuencia.

Microwave Office de AWR/NI

MTEES\$
ID=TL4
MSUB=Top_Layer_SUB

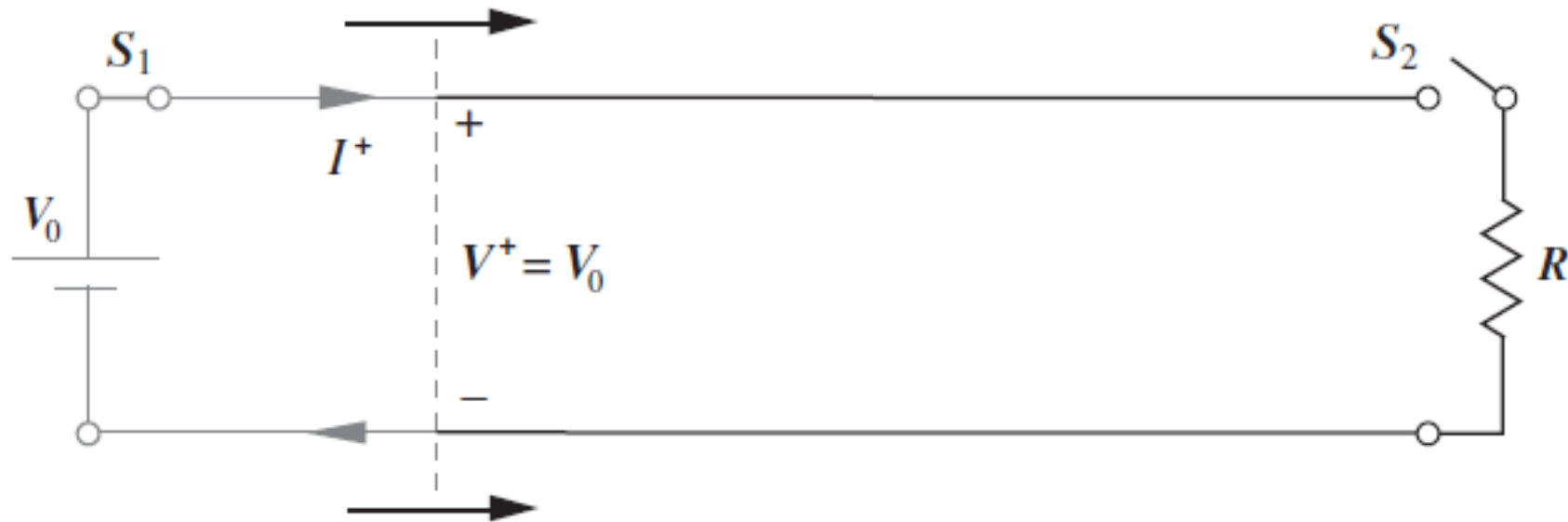


Contenidos y Cronograma

- Entornos de Simulación RF
- Líneas de Transmisión
- Componentes de radio frecuencia

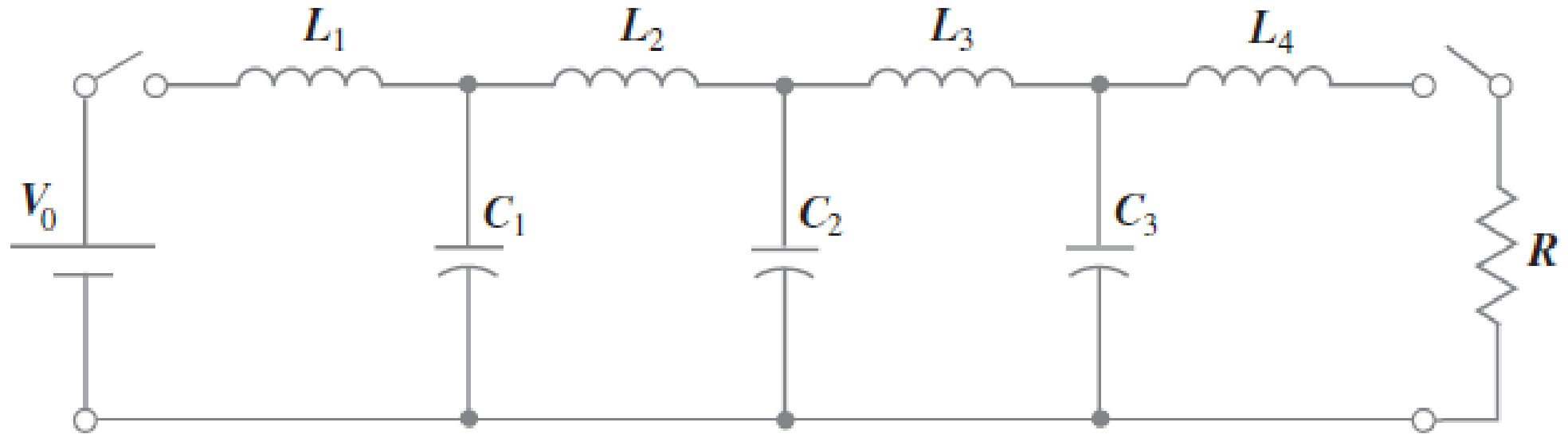
Línea de transmisión

Algunas descripciones físicas para las líneas de transmisión se considera lo siguiente:



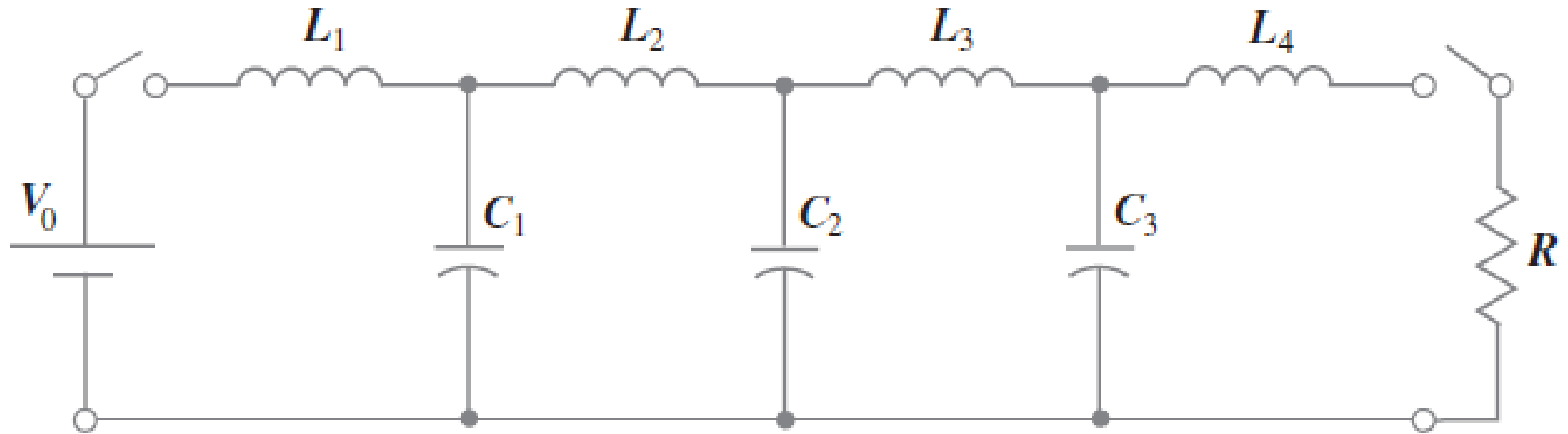
Línea de transmisión

Si se consideran elementos distribuidos se tiene que:



Línea de transmisión

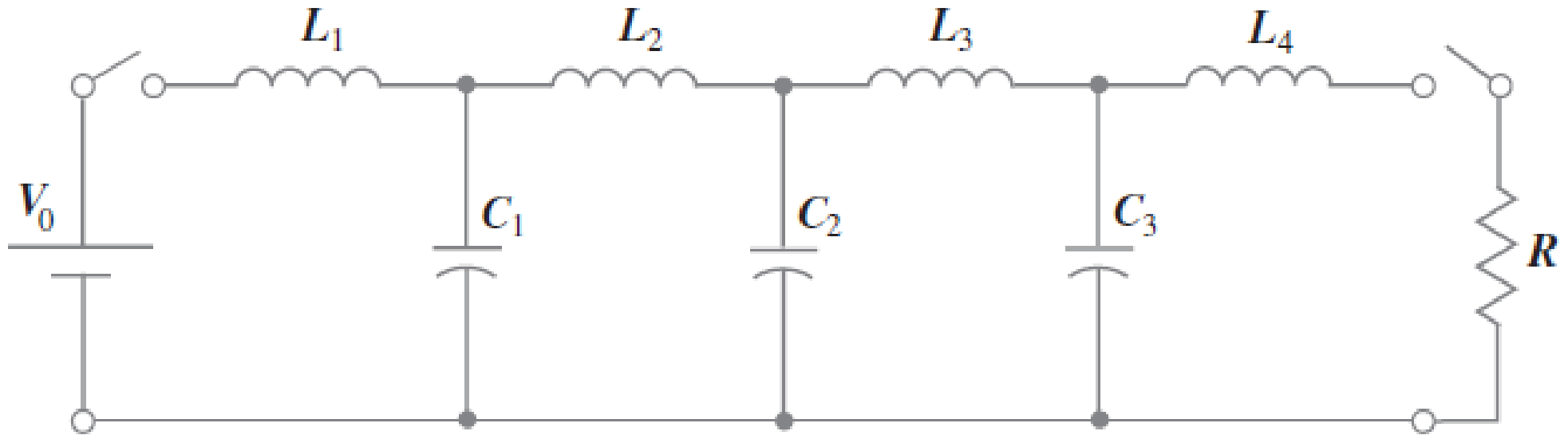
Si se consideran elementos distribuidos se tiene que:



Según la configuración que se tiene la red mostrada, es una red que es capaz de formar pulsos

Línea de transmisión

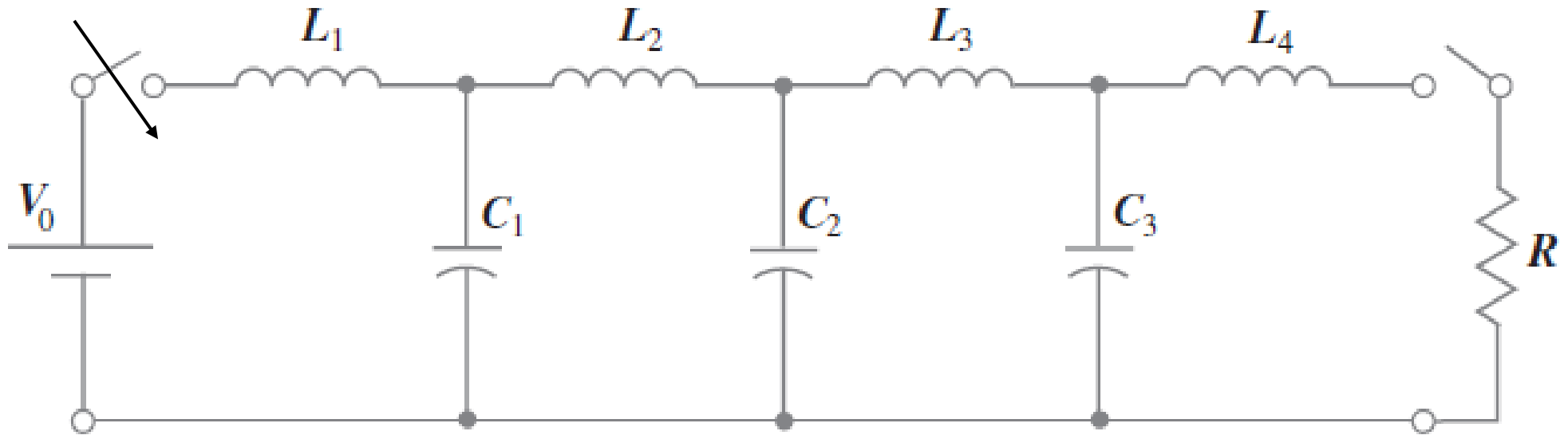
Si se consideran elementos distribuidos se tiene que:



¿Qué sucede si cerramos el interruptor cercano a la batería?

Línea de transmisión

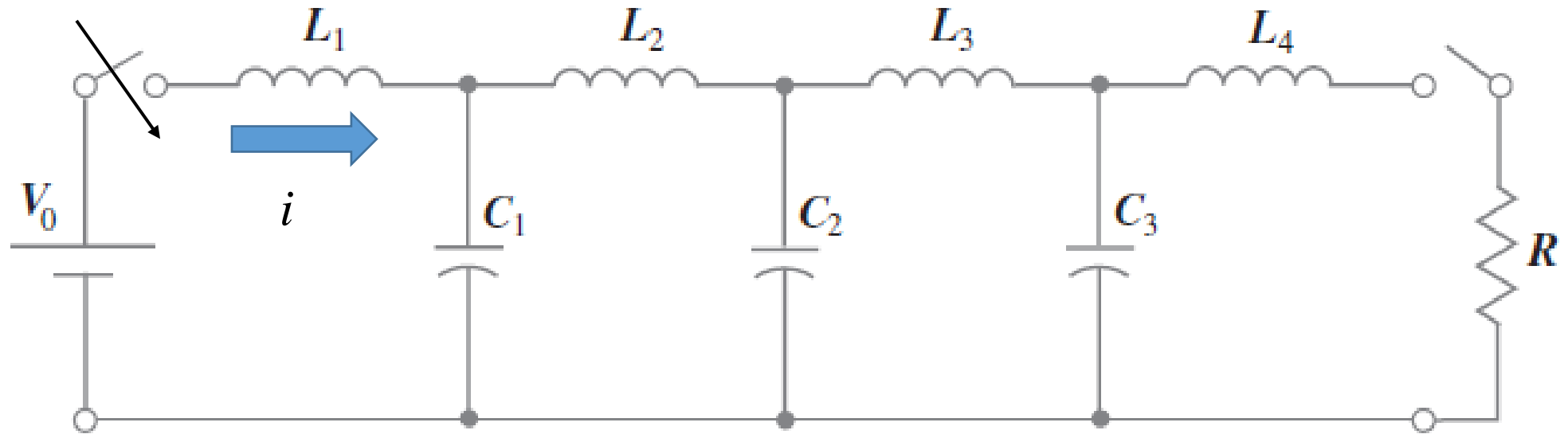
Si se consideran elementos distribuidos se tiene que:



¿Qué sucede si cerramos el interruptor cercano a la batería?

Línea de transmisión

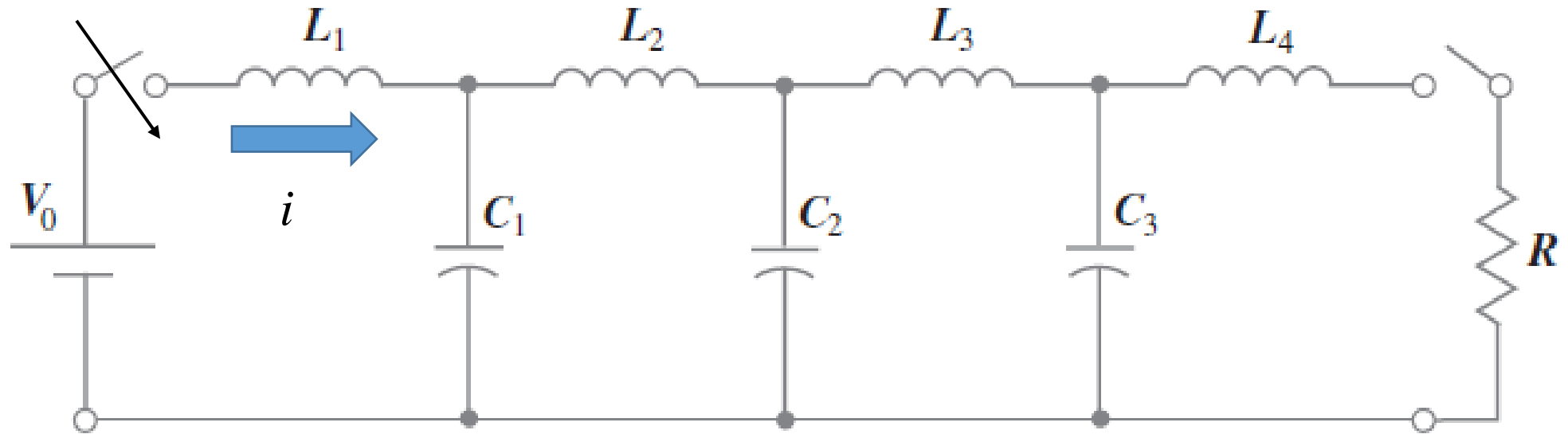
Si se consideran elementos distribuidos se tiene que:



Hay una corriente atravesando por la bobina L_1 que permite que el condensador C_1 se empiece a cargar

Línea de transmisión

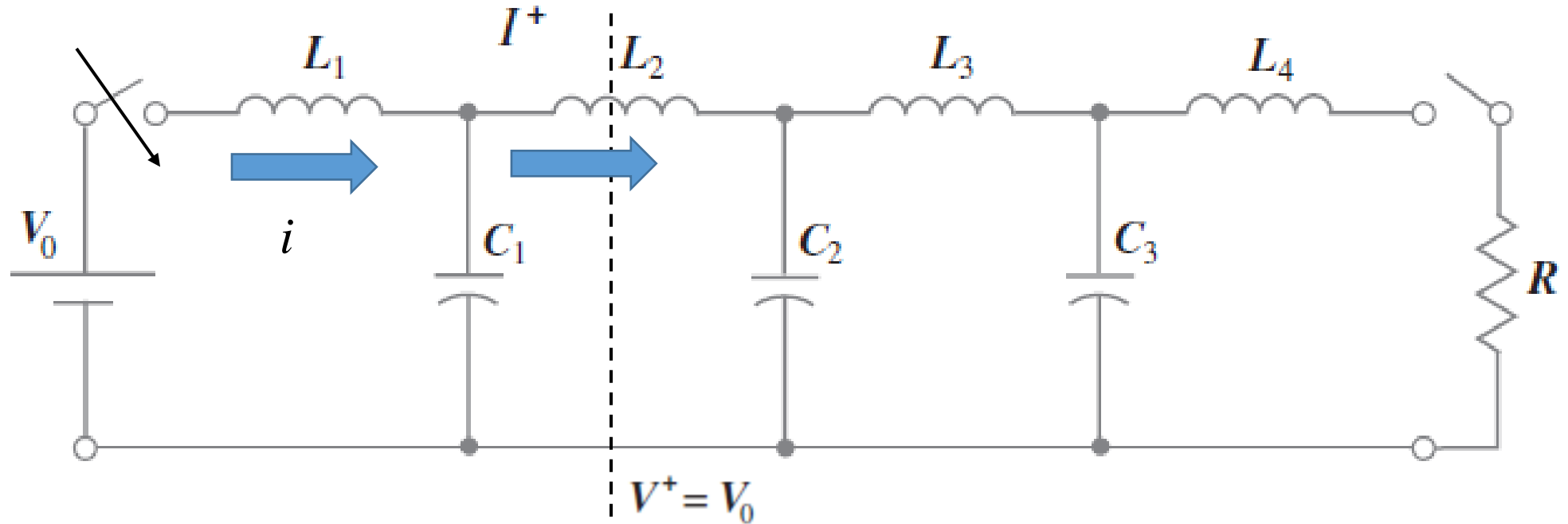
Si se consideran elementos distribuidos se tiene que:



El proceso de flujo de corriente en la siguiente bobina genera que el siguiente condensador se carga así con la red siguiente

Línea de transmisión

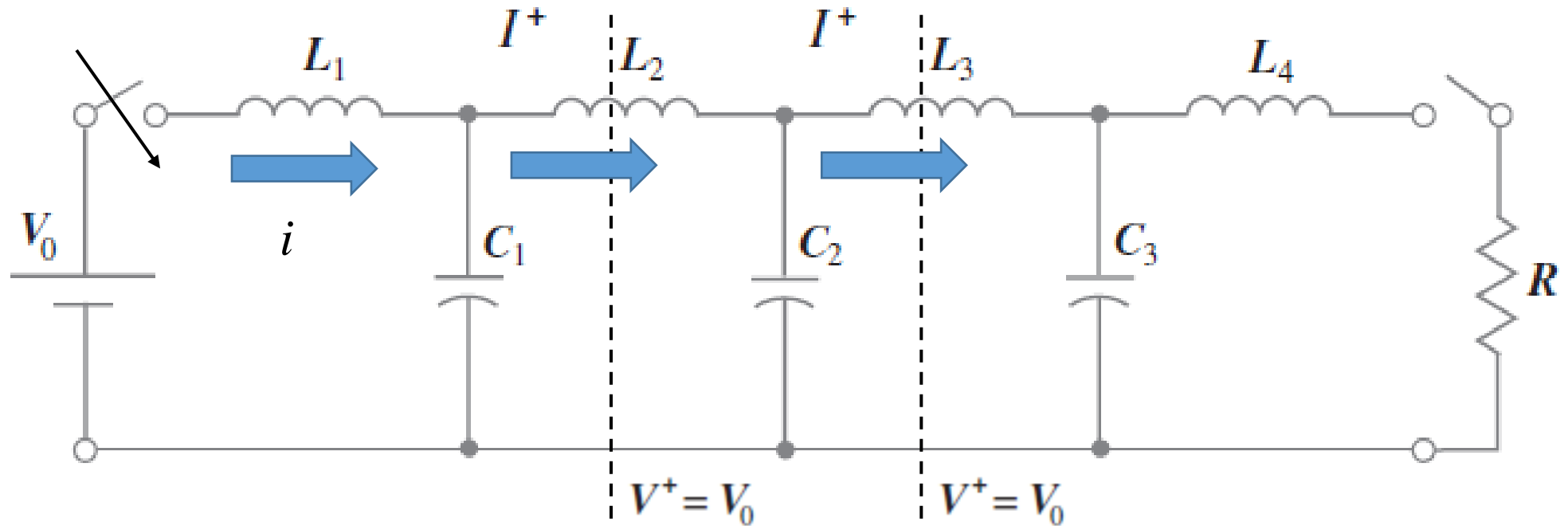
Si se consideran elementos distribuidos se tiene que:



Este proceso genera la aparición de una frente de onda ubicada específicamente entre dos capacitores adyacentes

Línea de transmisión

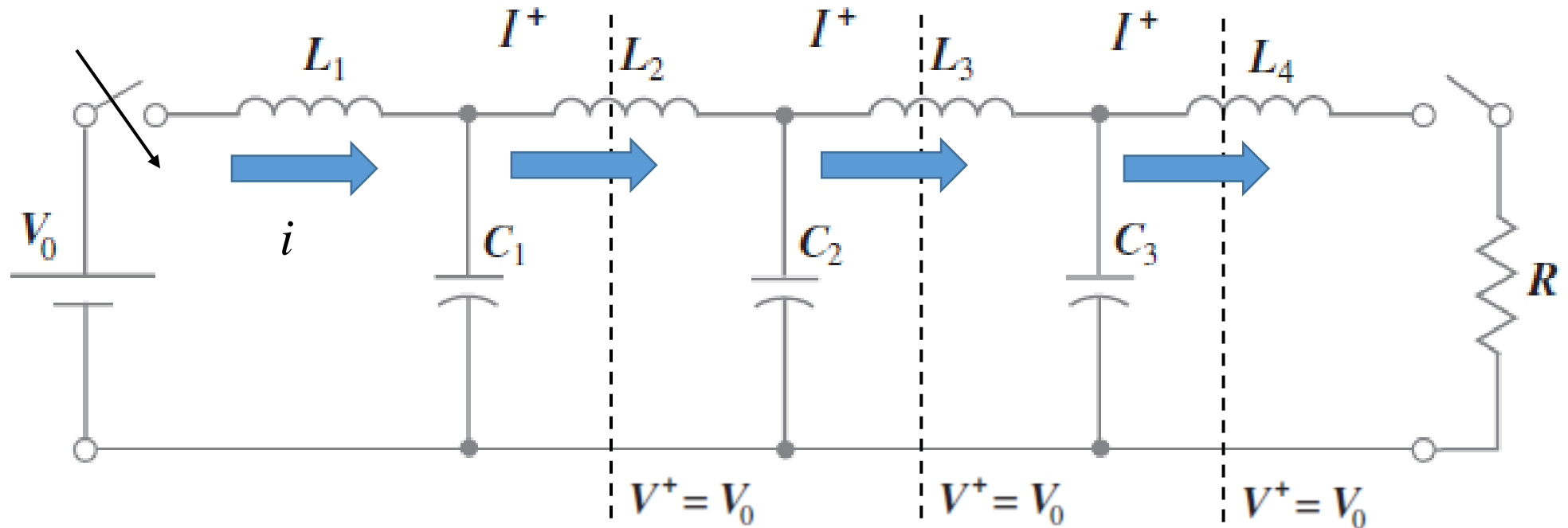
Si se consideran elementos distribuidos se tiene que:



El desplazamiento se genera de izquierda a derecha

Línea de transmisión

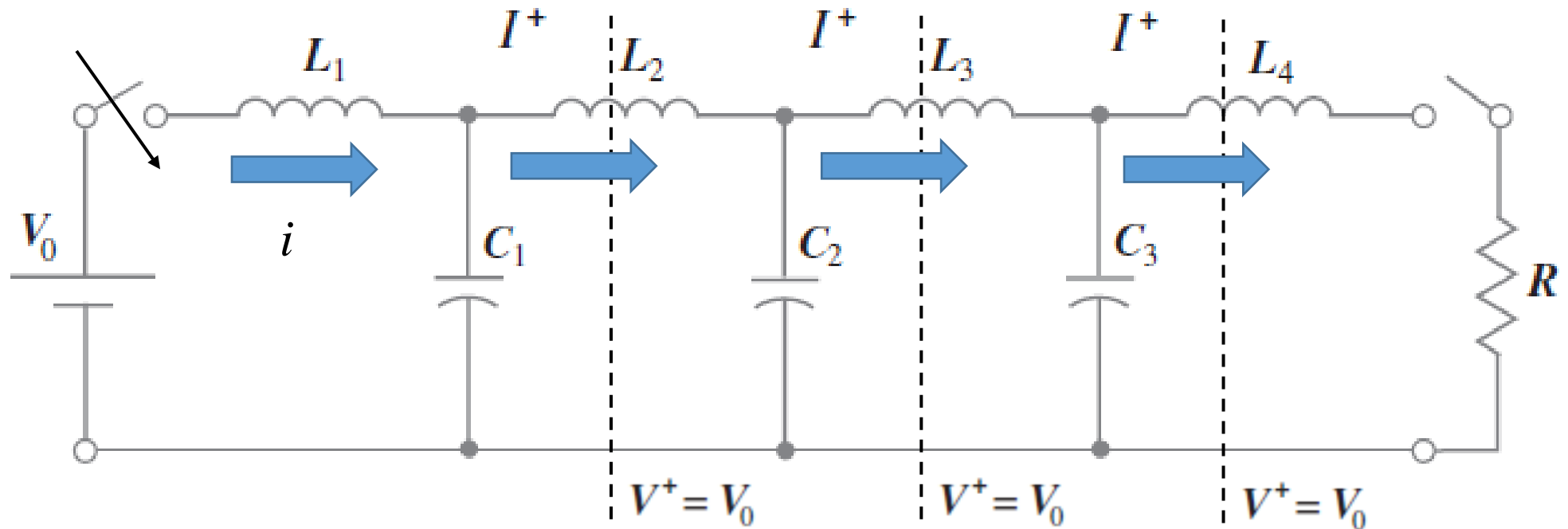
Si se consideran elementos distribuidos se tiene que:



¿De que depende la velocidad?

Línea de transmisión

Si se consideran elementos distribuidos se tiene que:

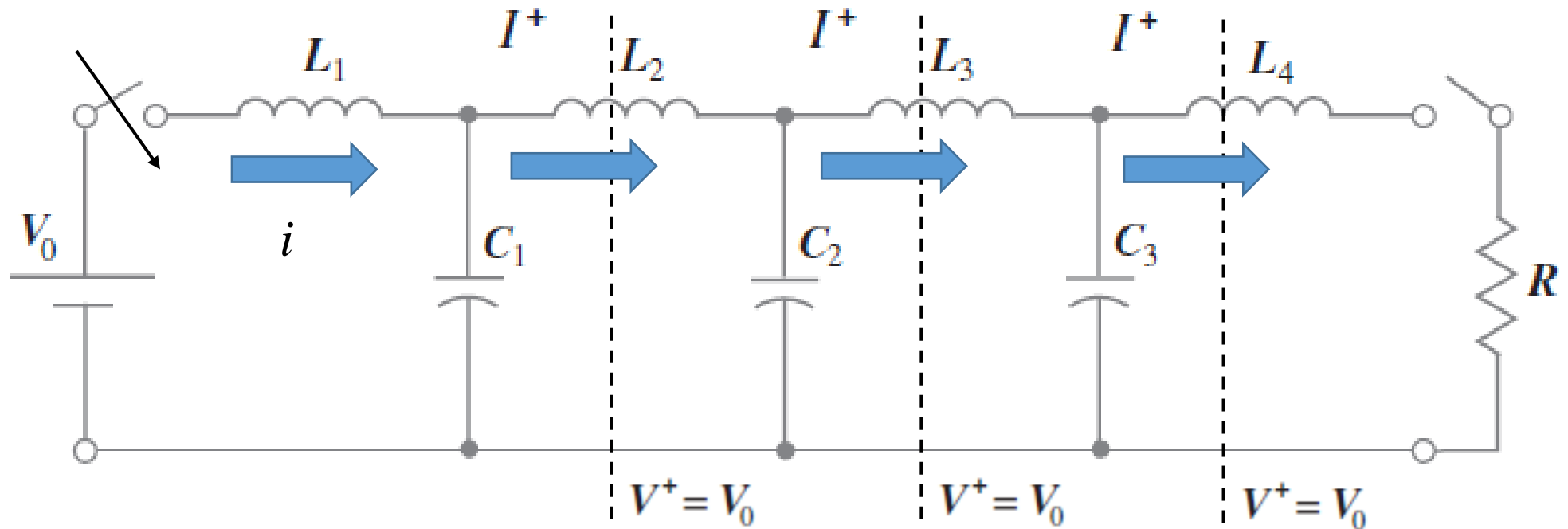


¿De que depende la velocidad?

¿DE LA LUZ?

Línea de transmisión

Si se consideran elementos distribuidos se tiene que:

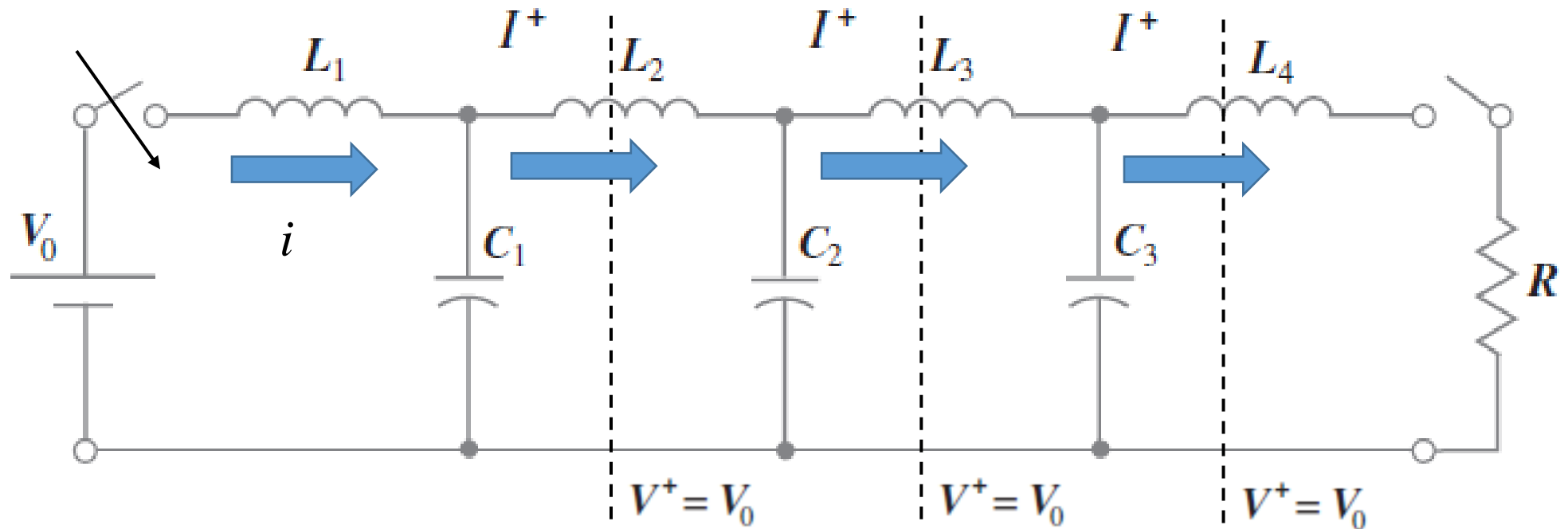


¿De que depende la velocidad?

NO depende la luz

Línea de transmisión

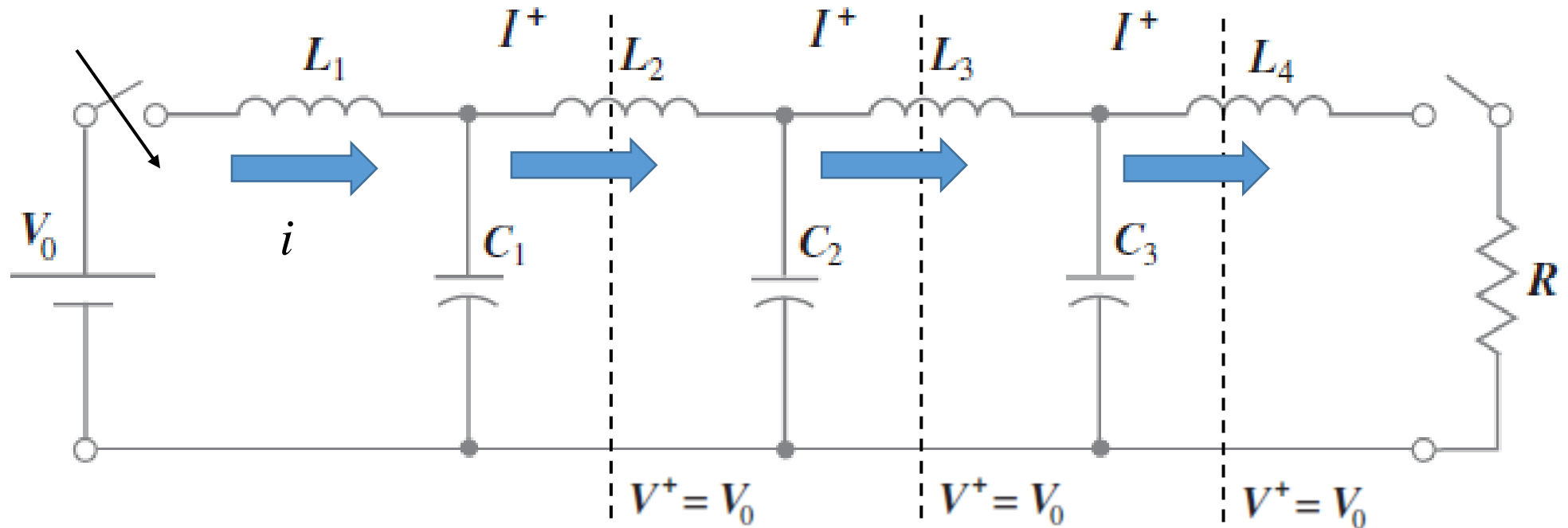
Si se consideran elementos distribuidos se tiene que:



Va a depender de que tan rápido la bobina y condensador alcanza su estado de carga total

Línea de transmisión

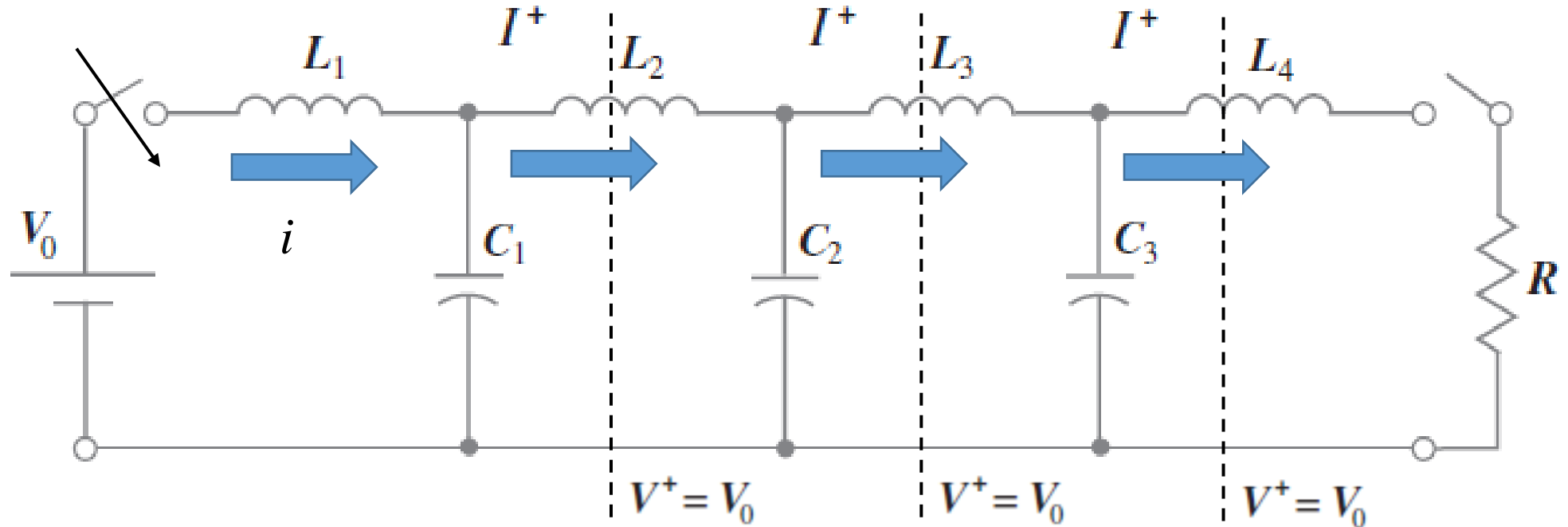
Si se consideran elementos distribuidos se tiene que:



Para que la onda se propague más rápido
¿Cómo deberán ser los valores de L y C ?

Línea de transmisión

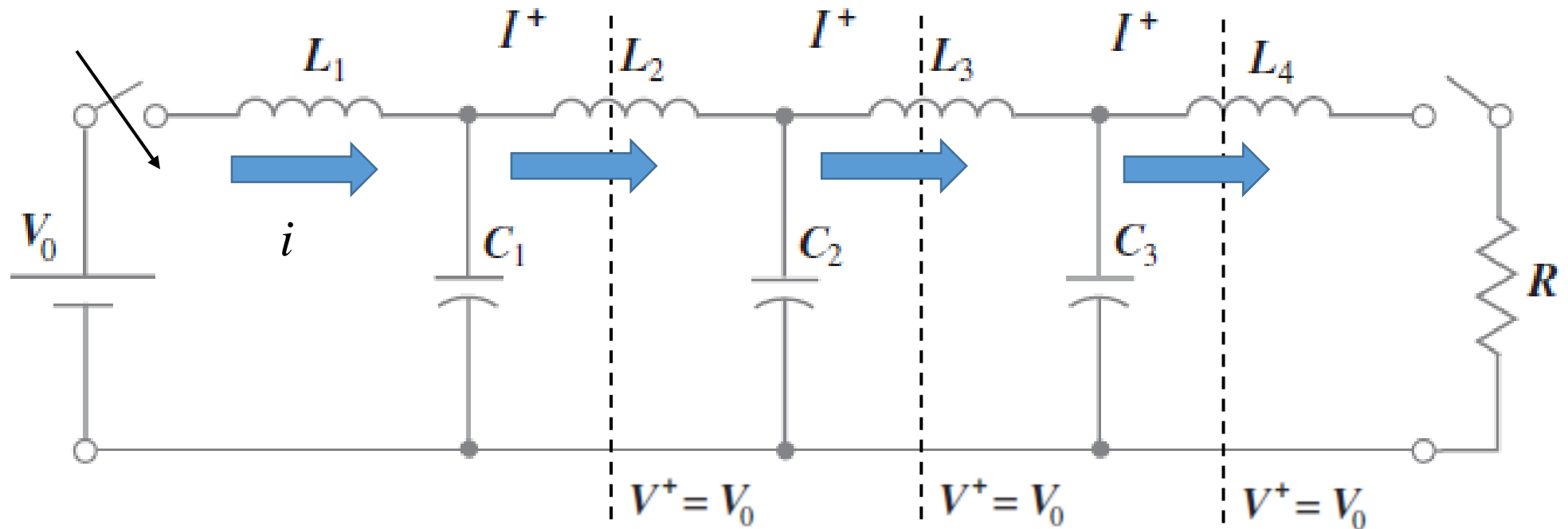
Si se consideran elementos distribuidos se tiene que:



Deberá ser lo suficientemente pequeños para garantizar una velocidad rápida según la topología bajo análisis

Línea de transmisión

Si se consideran elementos distribuidos se tiene que:

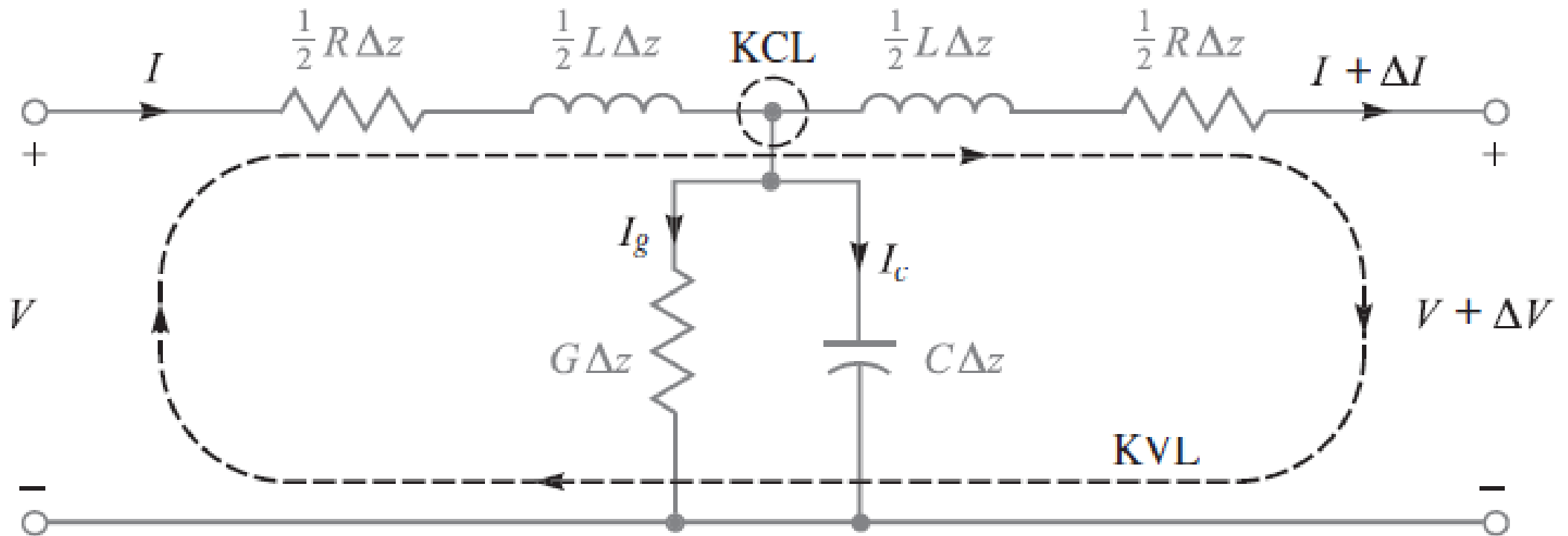


Asumiendo que este modelo de análisis es sin pérdidas

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

Línea de transmisión

Antes de llegar a un modelo matemático de una línea transmisión esencialmente se puede considerar que un línea puede estar compuesta por:



Línea de transmisión

Antes de llegar a un modelo matemático de una línea transmisión esencialmente se puede considerar que una línea puede estar compuesta por:

- Bobinas (L)
- Capacitancias (C)
- Conductancias de desviación (G)
- Resistencias (R)

Línea de transmisión

¿Para que son utilizadas la conductancias de desviación?

Línea de transmisión

Generalmente son utilizadas para modelas corrientes de fuga a través del dieléctrico que estuviera presente a lo largo de la línea de transmisión.

Esto se debe a que se podría suponer que el dieléctrico pueda tener una conductividad eléctrica.

Donde además se tiene una constante dieléctrica que pueda afecta la capacitancia.

Línea de transmisión

¿Para que son utilizadas resistencias en serie?

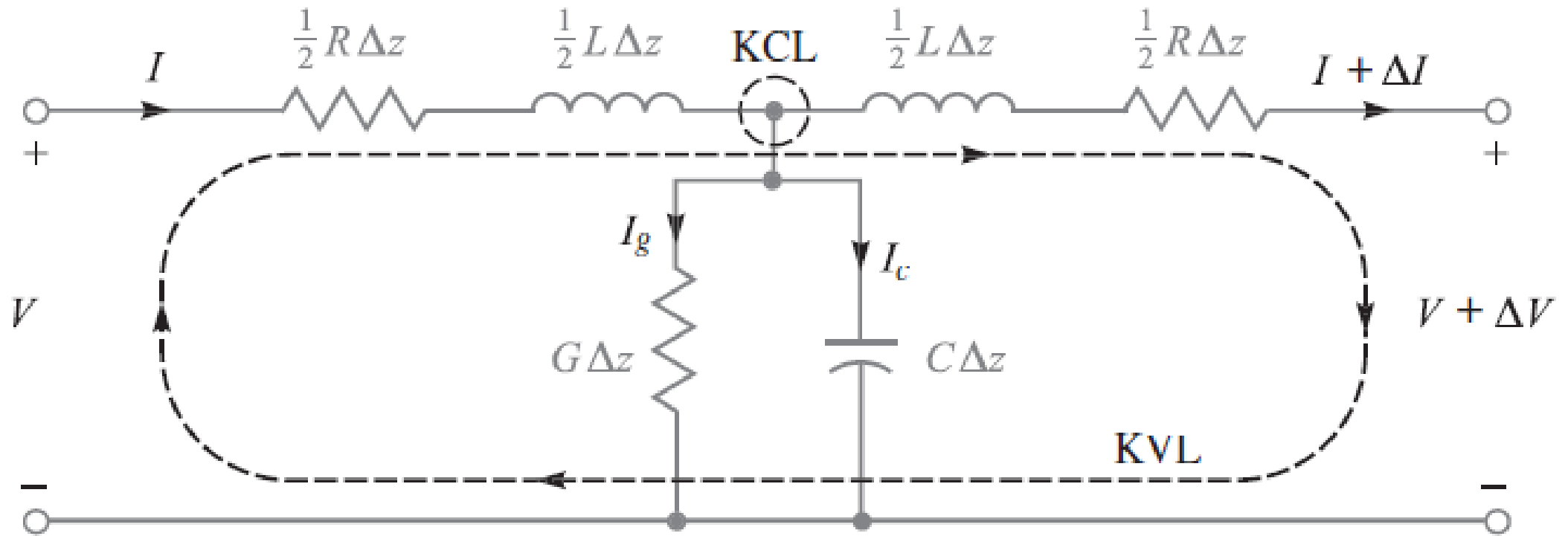
Línea de transmisión

La resistencia esta asociada con cualquier conductividad finita que este presente en los conductores.

Si bien es cierto la perdida en la línea de transmisión los responsables de ello serán R y G

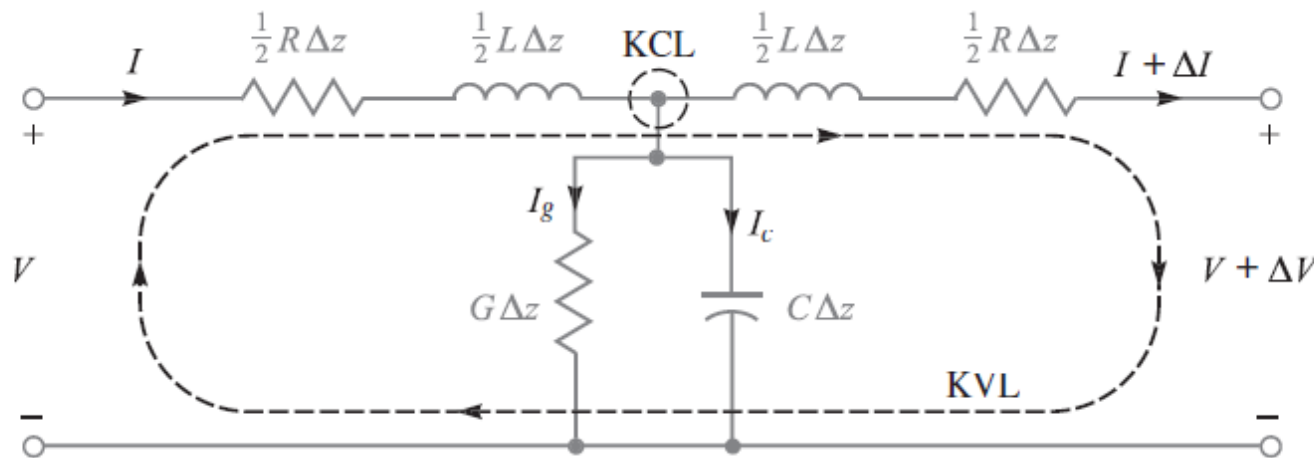
Línea de transmisión

Finalmente tenemos un modelo a nivel de circuito eléctrico de una línea de transmisión



Línea de transmisión

Si se asume que si tiene un propagación en la componente x

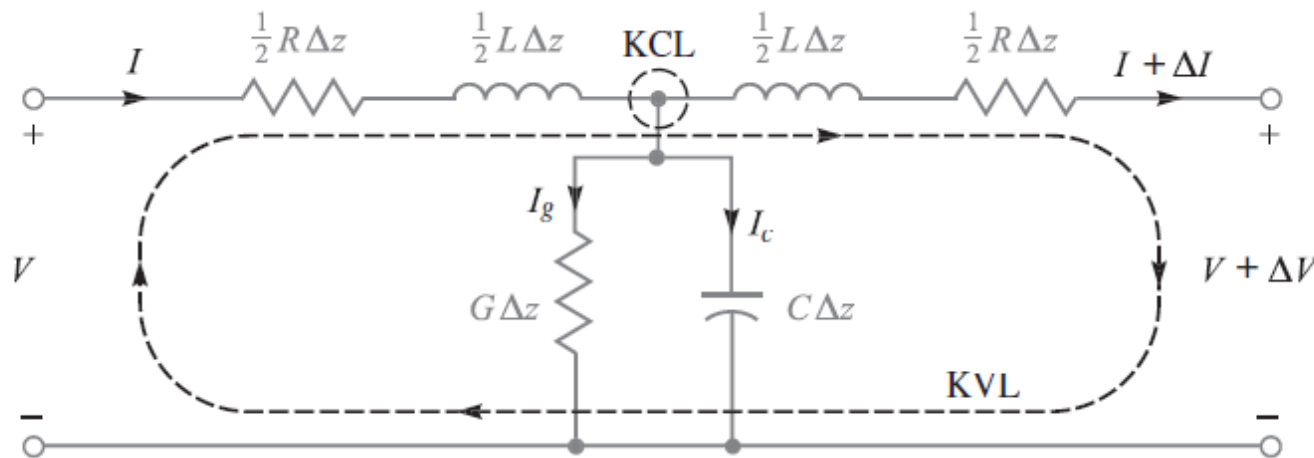


Si aplico un LVK a lo largo de la malla se tiene que:

$$V = \frac{1}{2} R I \Delta z + \frac{1}{2} L \frac{\partial I}{\partial t} \Delta z + \frac{1}{2} L \left(\frac{\partial I}{\partial t} + \frac{\partial \Delta I}{\partial t} \right) \Delta z + \frac{1}{2} R (I + \Delta I) \Delta z + (V + \Delta V)$$

Línea de transmisión

Si se asume que si tiene un propagación en la componente x

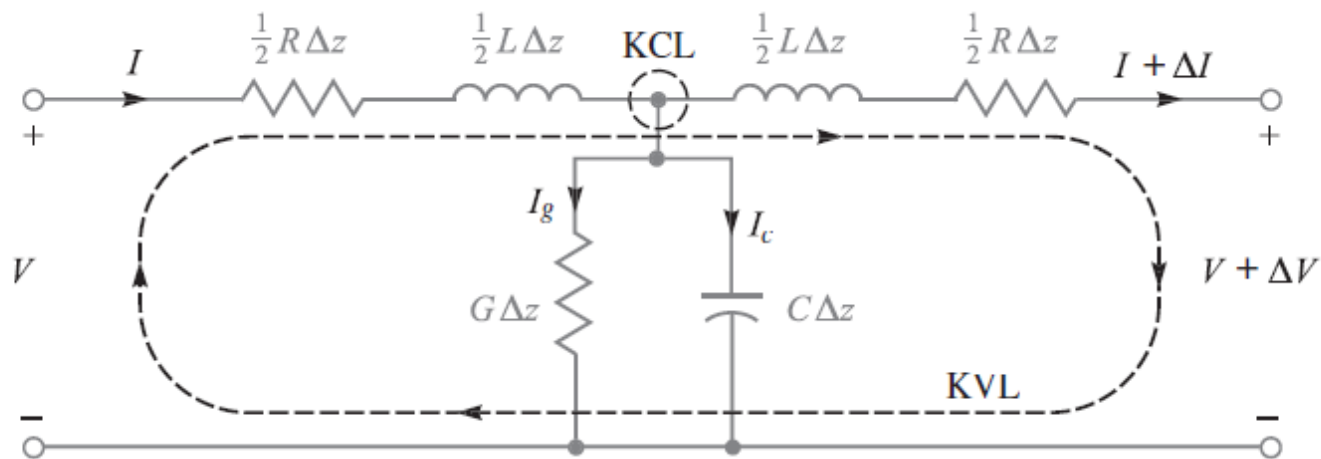


Buscando una variación de la tensión respecto al desplazamiento se tiene

$$\frac{\Delta V}{\Delta z} = - \left(RI + L \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{1}{2} L \frac{\partial \Delta I}{\partial t} + \frac{1}{2} R \Delta I \right)$$

Línea de transmisión

Si se asume que si tiene un propagación en la componente x

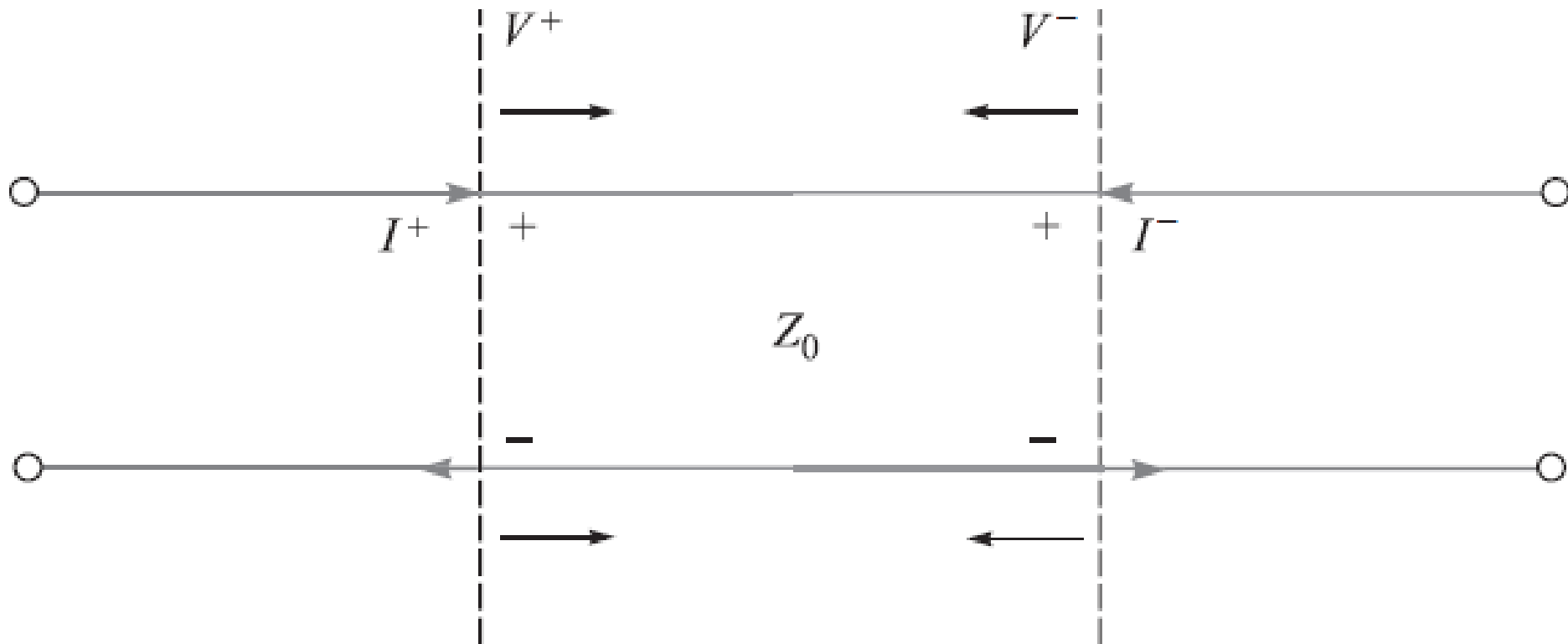


Finalmente se tiene que:

$$\frac{\partial V}{\partial z} = - \left(RI + L \frac{\partial I}{\partial t} \right)$$

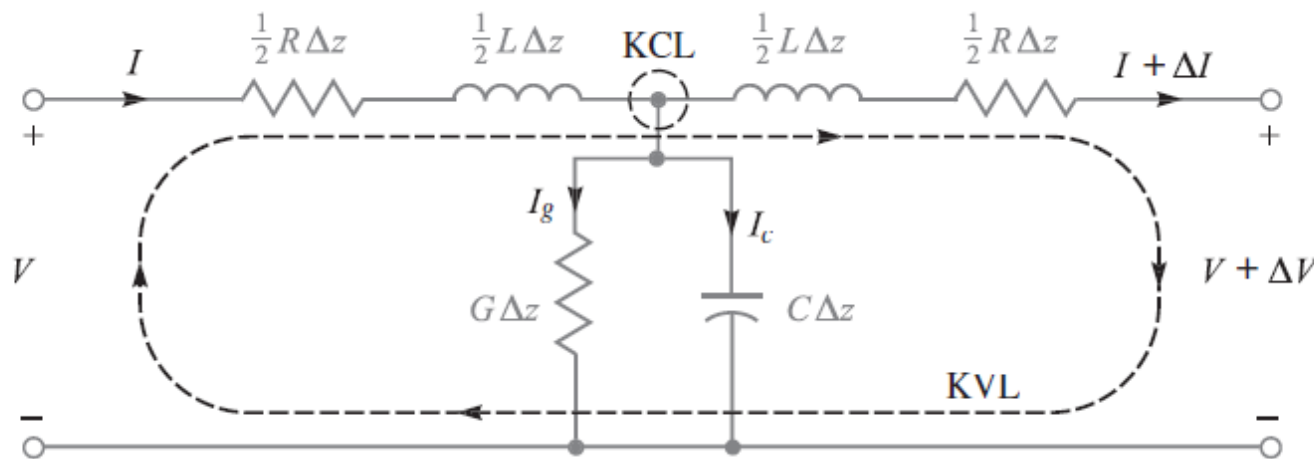
Línea de transmisión

Considerando un modelo más general



Línea de transmisión

Si se asume que si tiene un propagación en la componente x



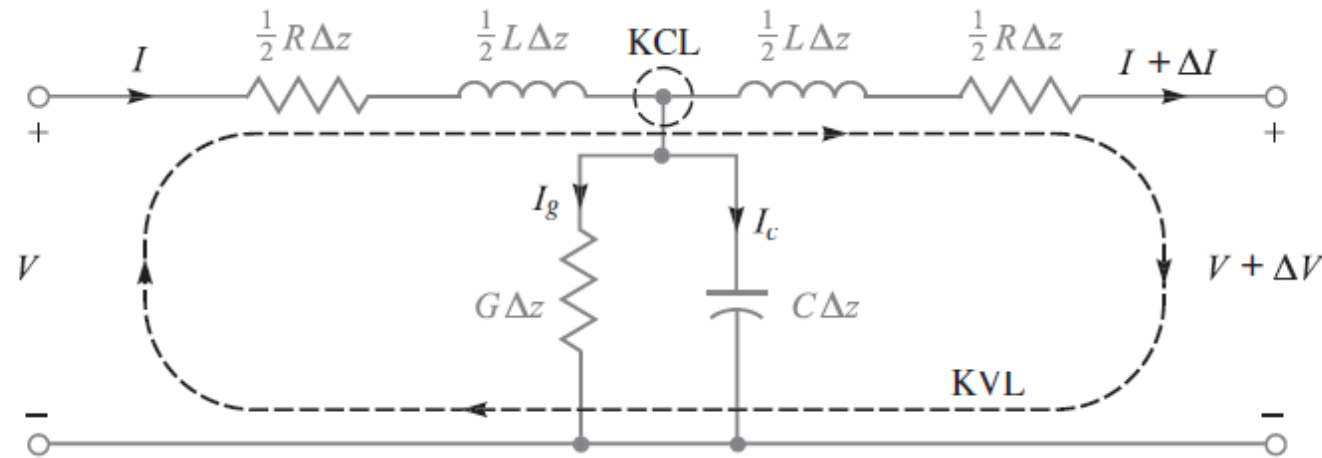
Y a nivel mas general se tiene para tensión y corriente

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = LC \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + (LG + RC) \frac{\partial V}{\partial t} + RGV$$

$$\frac{\partial^2 I}{\partial z^2} = LC \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} + (LG + RC) \frac{\partial I}{\partial t} + RGI$$

Ecuaciones de la LT

Sistema de n conductores que soportan ondas guiadas con $n-1$ modos del tipo TEM



$$\frac{d^2 V_s}{dz^2} = \underbrace{(R + j\omega L)}_Z \underbrace{(G + j\omega C)}_Y V_s = \gamma^2 V_s$$

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

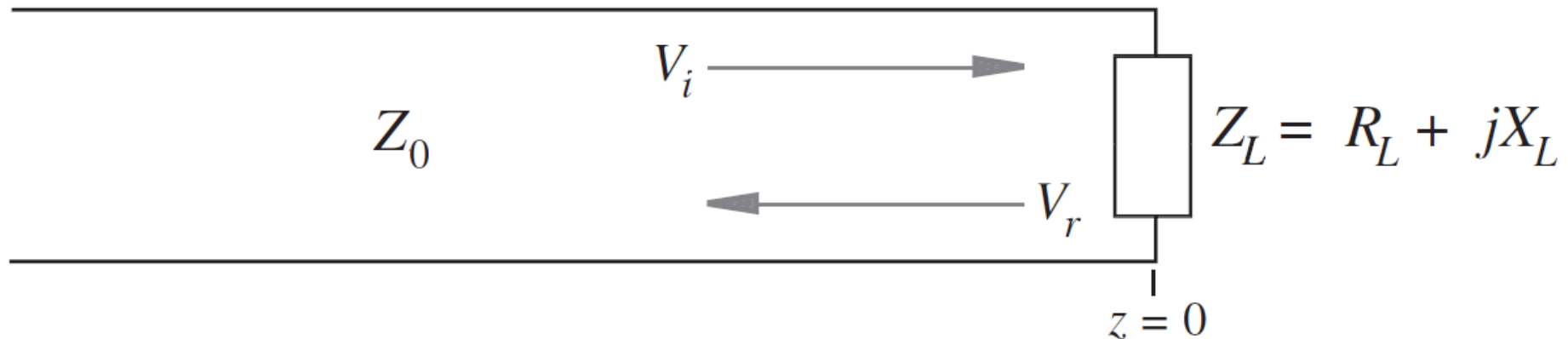
$$V_s(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{+\gamma z}$$

$$I_s(z) = I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{+\gamma z}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = |Z_0| e^{j\theta}$$

Coeficiente de Reflexión

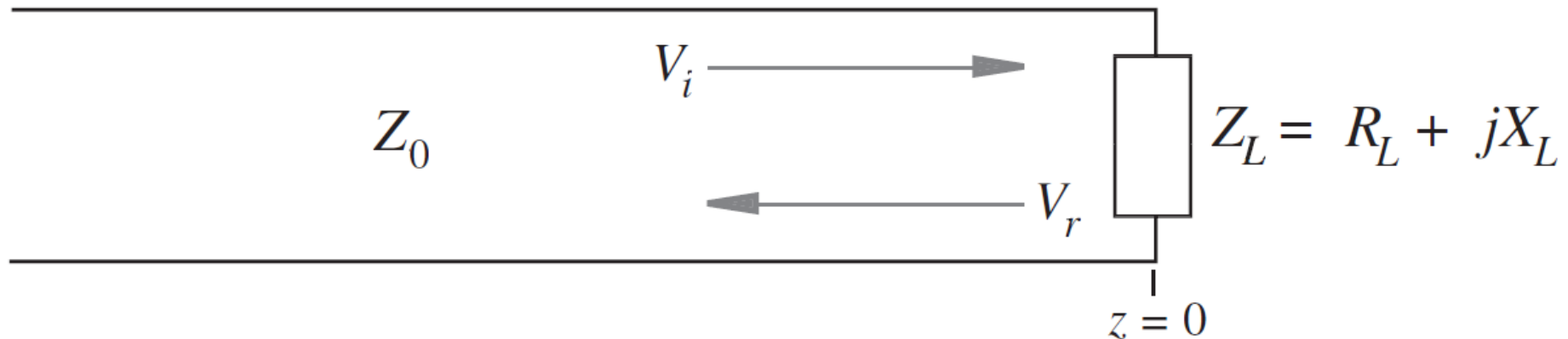
Según sean las condiciones de operación de la línea de transmisión es posible tener reflexiones en el sistema



$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = |Z_0|e^{j\theta}$$

Coeficiente de Reflexión

Según sean las condiciones de operación de la línea de transmisión es posible tener reflexiones en el sistema

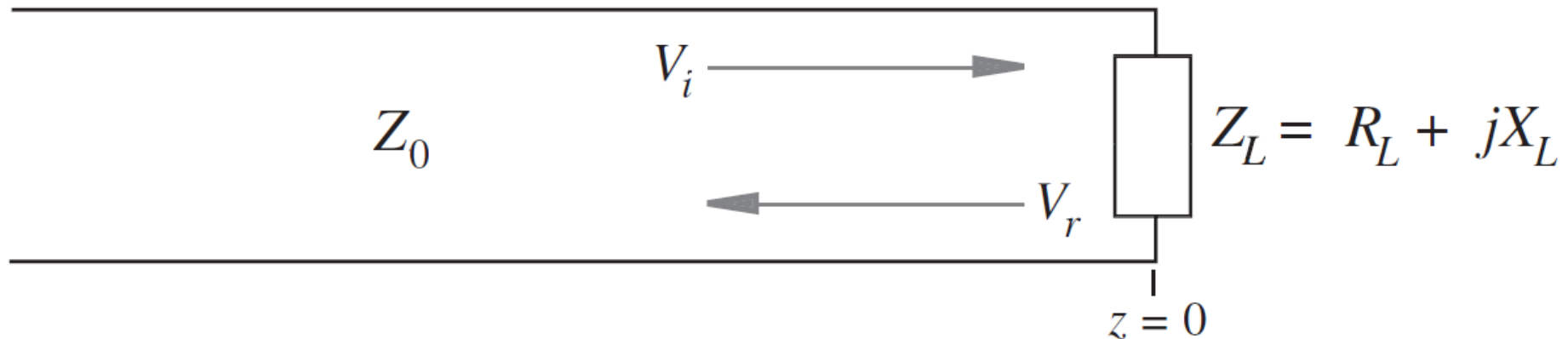


Para obtener la tensión en la carga se tiene que:

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

Coeficiente de Reflexión

Según sean las condiciones de operación de la línea de transmisión es posible tener reflexiones en el sistema

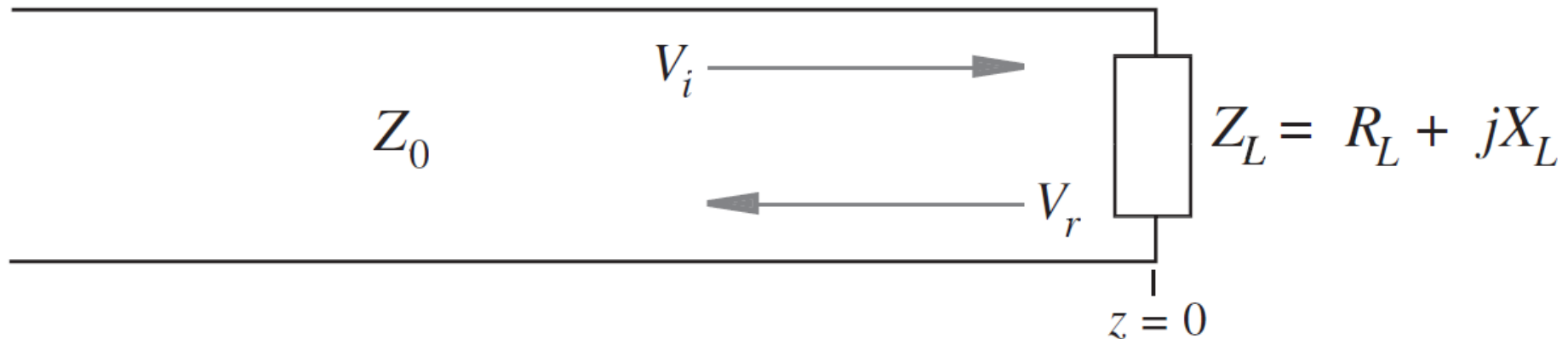


Determinando I en $z = 0$ se tiene que:

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

Coeficiente de Reflexión

Según sean las condiciones de operación de la línea de transmisión es posible tener reflexiones en el sistema



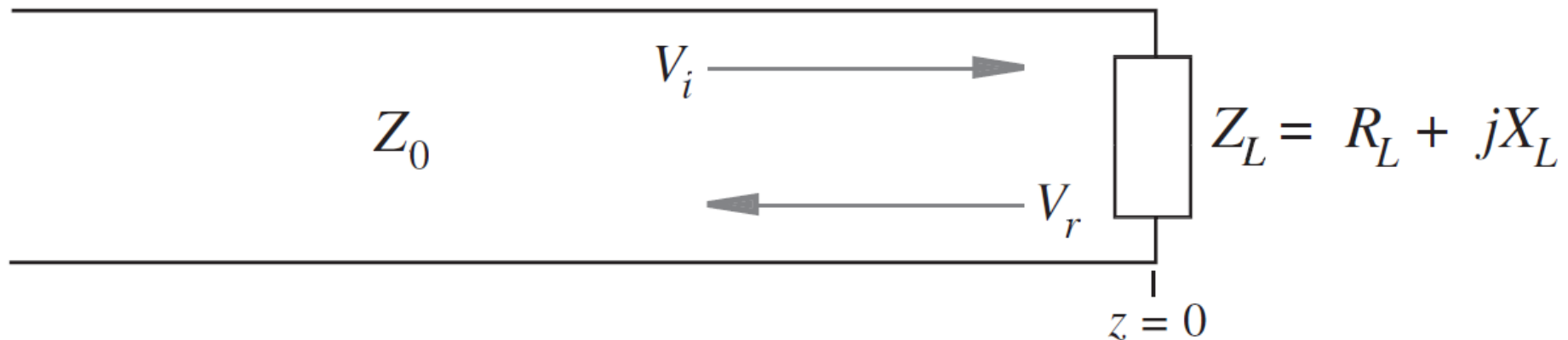
Buscando la relación entre reflejado e incidente se tiene que:

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

Coeficiente de reflexión
por tensión

Coeficiente de Reflexión

Según sean las condiciones de operación de la línea de transmisión es posible tener reflexiones en el sistema



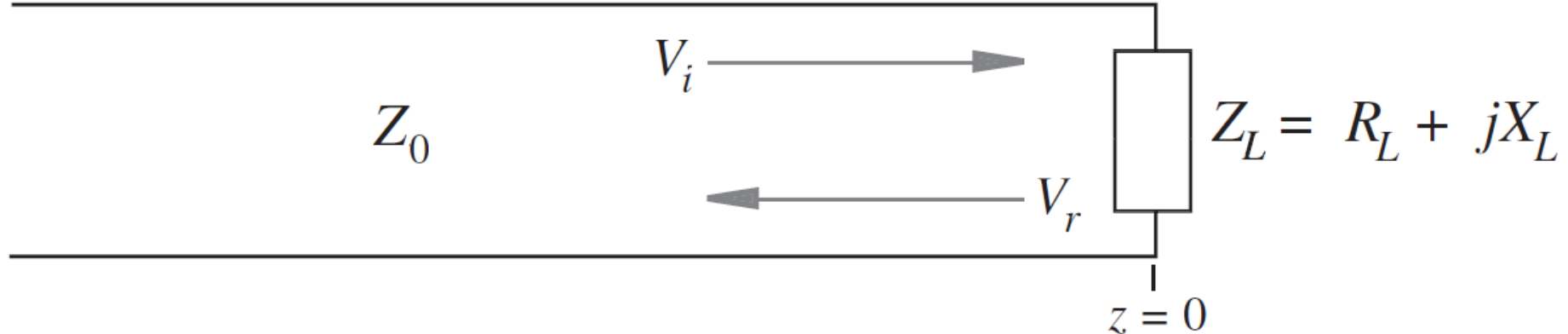
Buscando la relación entre reflejado e incidente se tiene que:

$$\boxed{-\Gamma_L}$$

Coeficiente de reflexión
por corriente

Coeficiente de Reflexión

Según sean las condiciones de operación de la línea de transmisión es posible tener reflexiones en el sistema



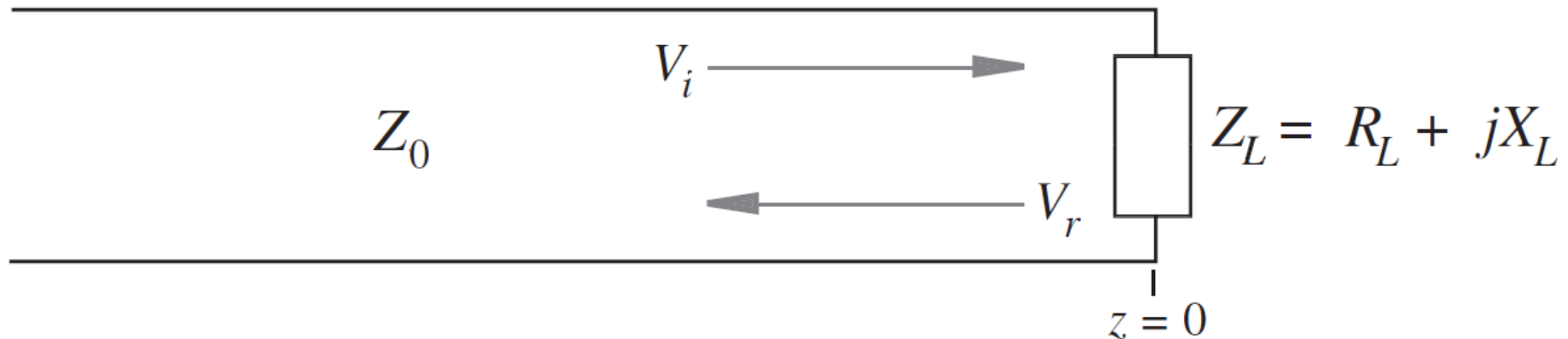
Es posible determinar el coeficiente de transmisión como:

$$\tau \equiv \frac{V_L}{V_{0i}} = 1 + \Gamma = \frac{2Z_L}{Z_0 + Z_L} = |\tau|e^{j\phi_\tau}$$

Coeficiente de
transmisión

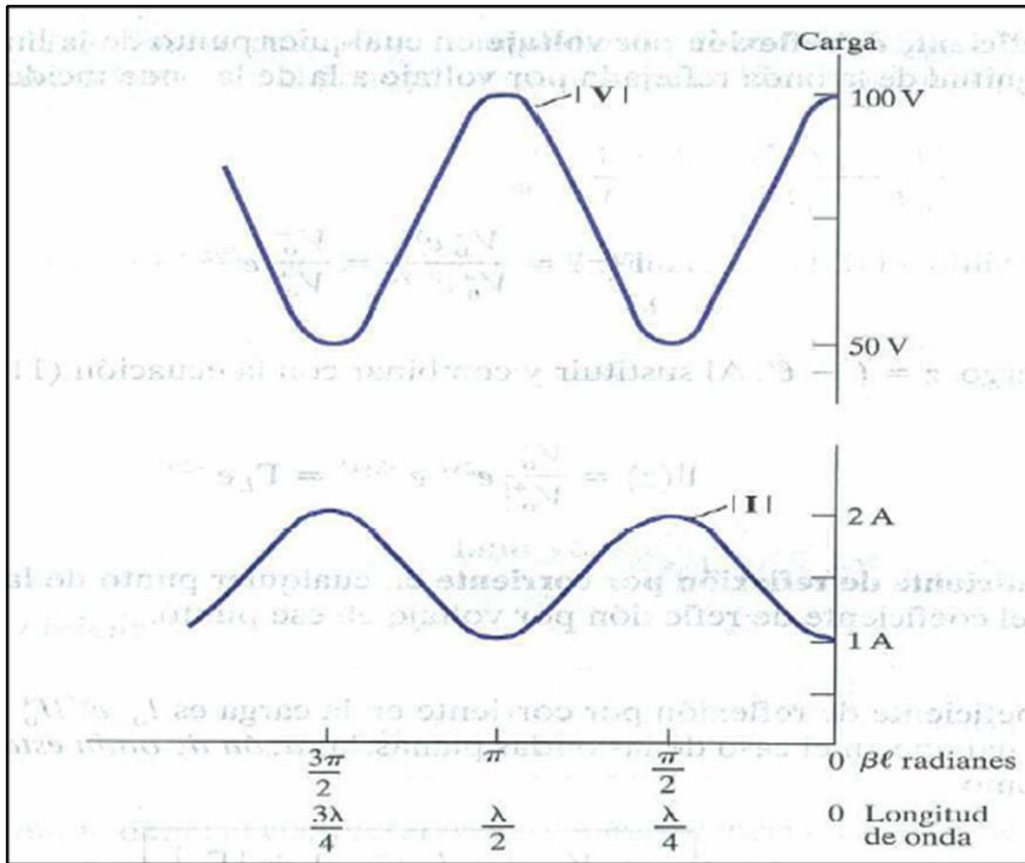
Coeficiente de Reflexión

Según sean las condiciones de operación de la línea de transmisión es posible tener reflexiones en el sistema



$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = |Z_0|e^{j\theta}$$

Razón de Onda Estacionaria (ROE)



Patrones de onda de V e I en una línea sin pérdidas con carga resistiva.

$$S = \frac{V_{\text{máx}}}{V_{\text{mín}}} = \frac{I_{\text{máx}}}{I_{\text{mín}}} = \frac{1 + |\Gamma_L|}{1 - |\Gamma_L|}$$

Diagrama de Smith

Diagrama normalizado del factor de reflexión que permite visualizar la impedancia vista a lo largo de un sistema con líneas de transmisión.

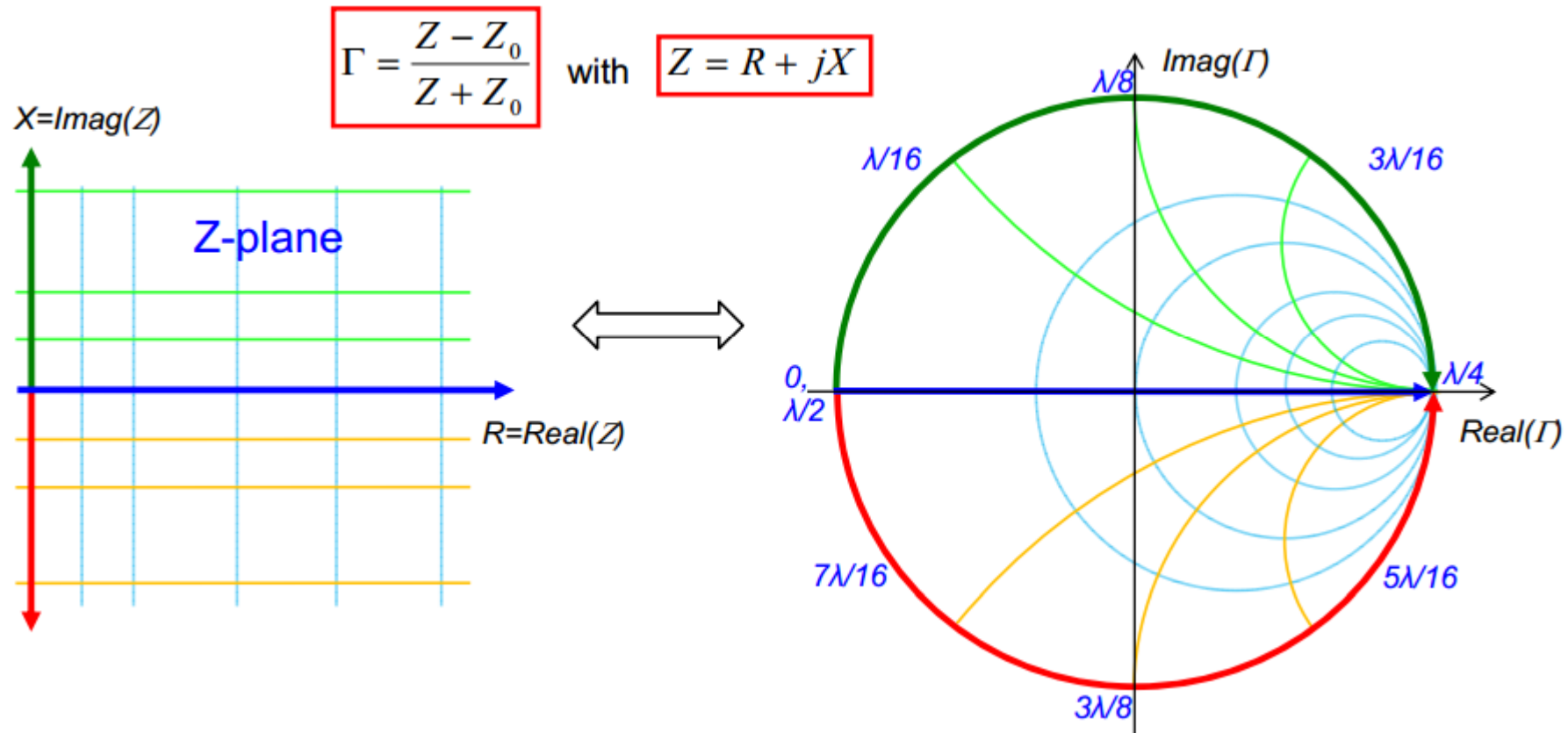


Diagrama de Smith: Generalidades

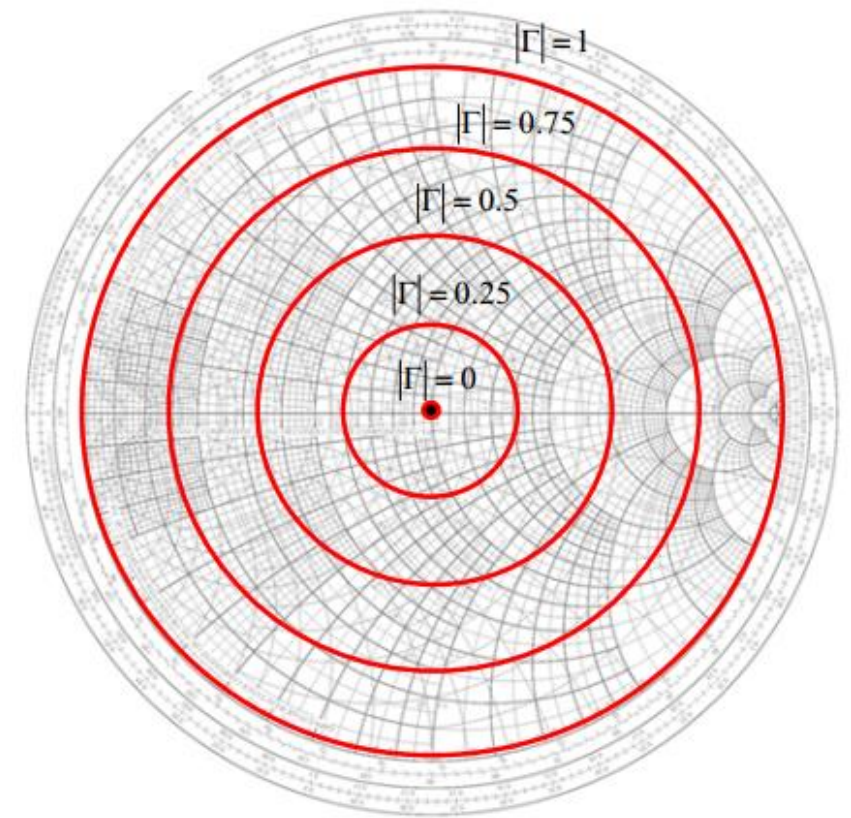
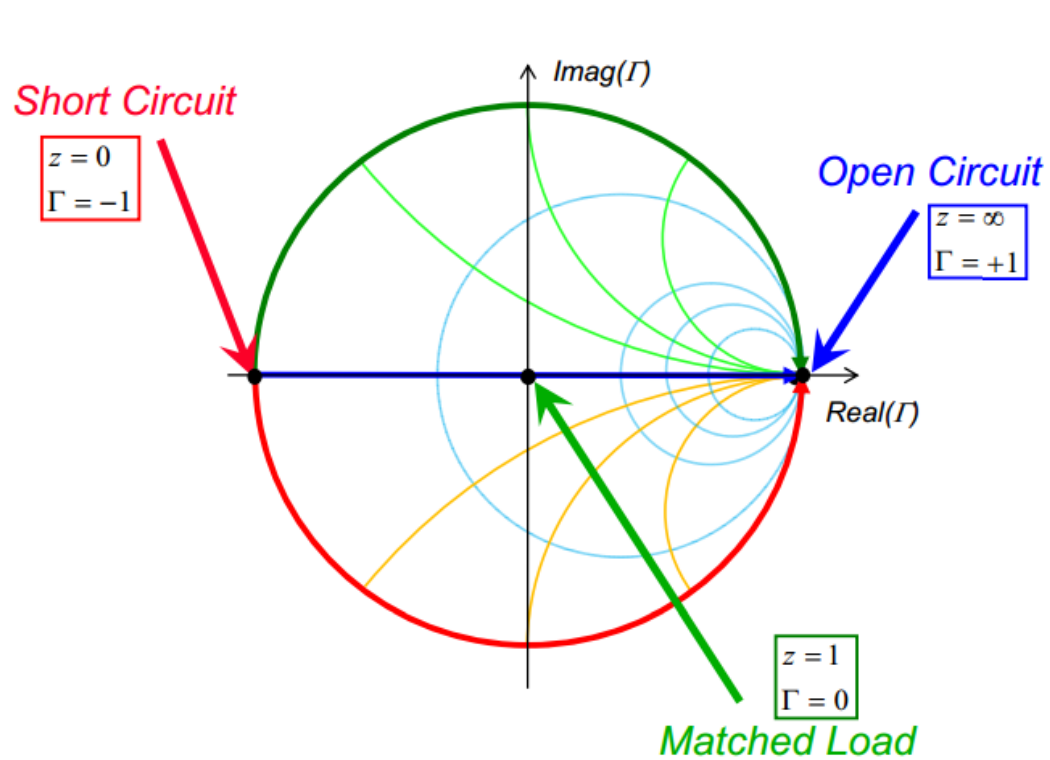


Diagrama de Smith: Generalidades

Hay software que tienen soporte para el diagrama de Smith, por ejemplo el software AWR

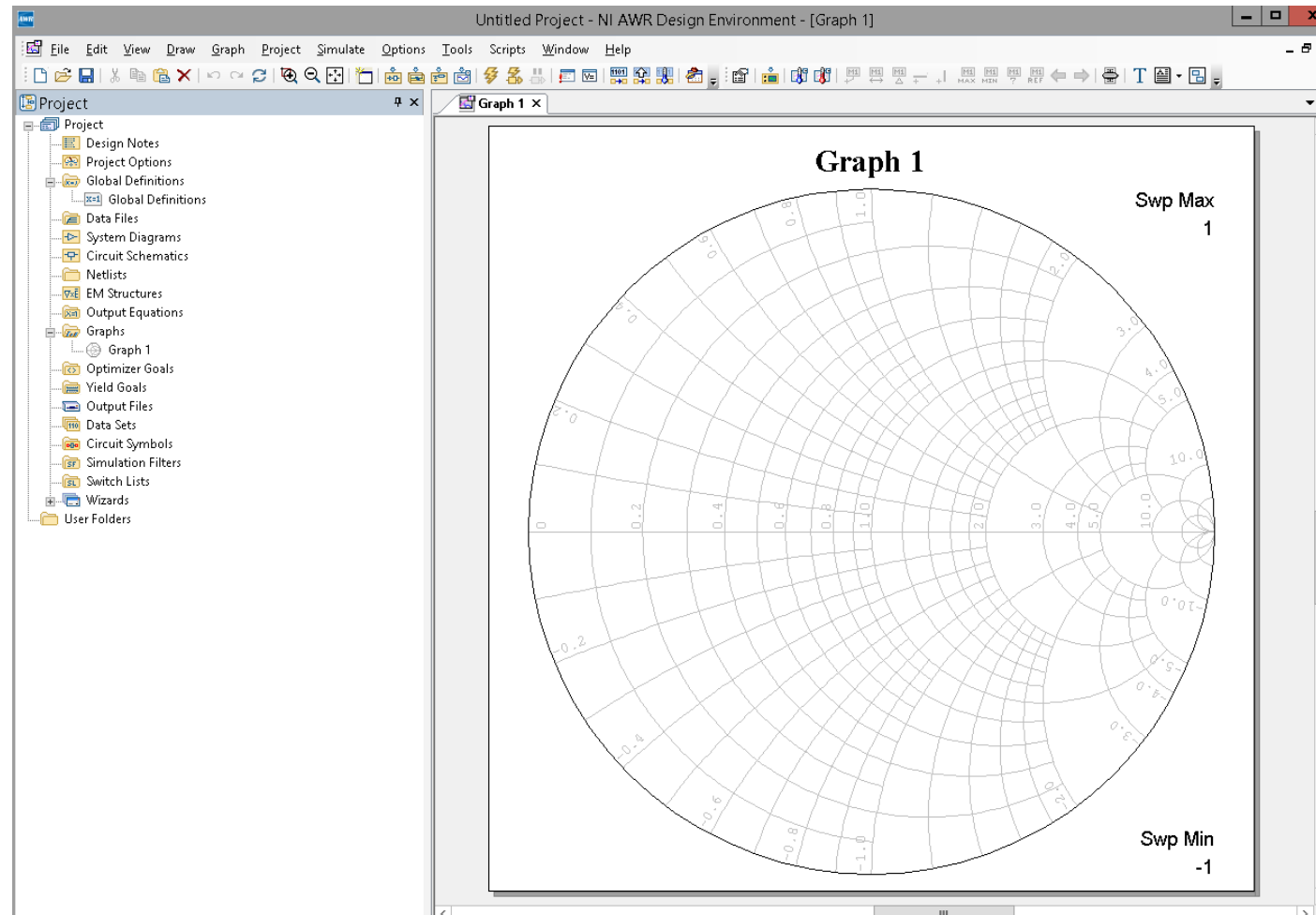


Diagrama de Smith: Generalidades

Equipos tales como analizadores de redes, tienen la capacidad para mostrar el diagrama de Smith

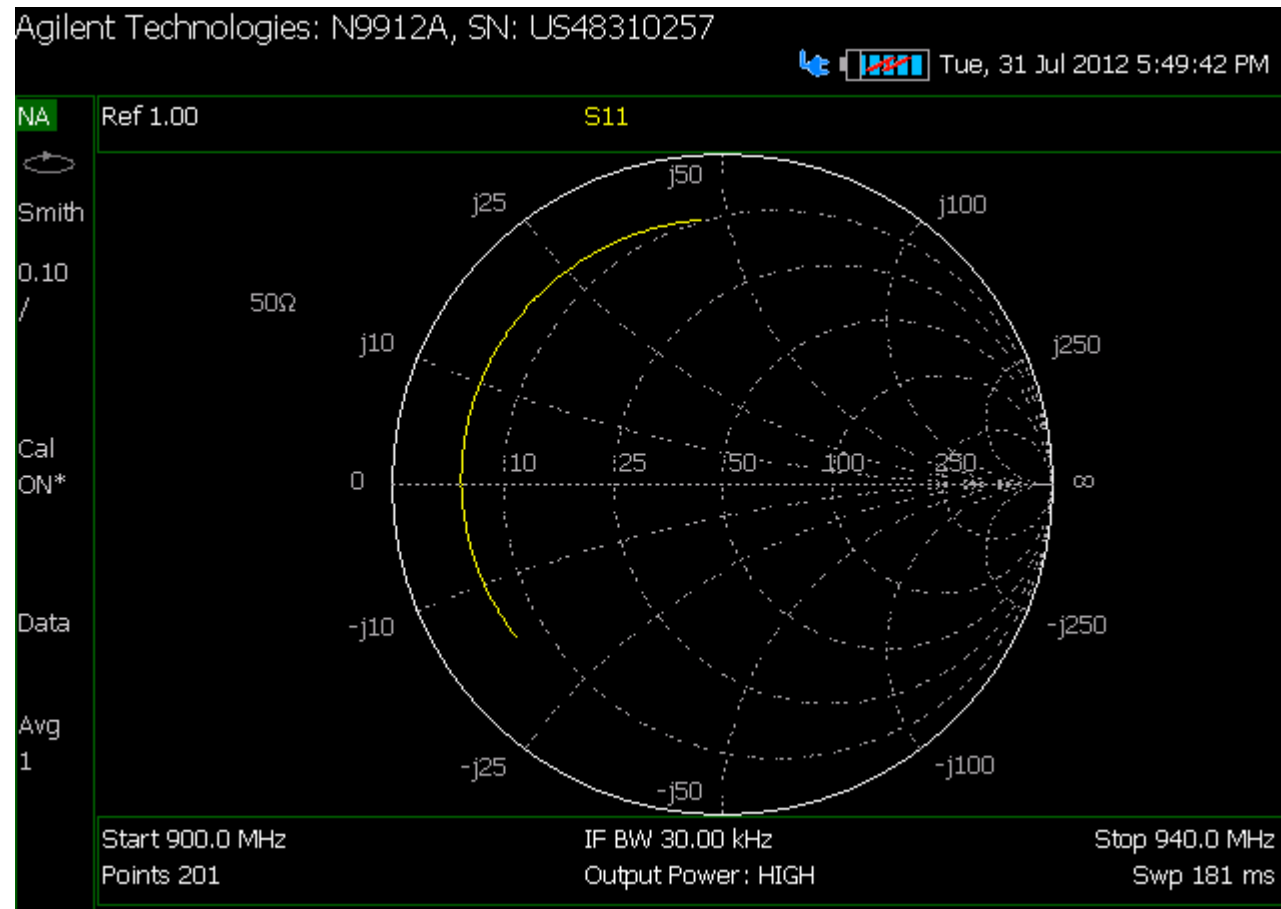


Diagrama de Smith: Generalidades

Hay aplicaciones en línea también, tienen la capacidad para mostrar el diagrama de Smith

This free online interactive Smith chart tool is a calculator which can help you design matching networks and obtain maximum power transfer between your source and load. This tool is javascript so it works on Windows, Mac, IOS, Android... or any device with a web browser

Operational Frequency: 2440 MHz
Characteristic Impedance: 50 Ω
Download this state: [Download schematic](#)
Impedance: 34.7 + 23.0j
Reflection Coefficient: -0.0994 + 0.299j

Frequency span (\mp): 0 MHz
Permittivity ϵ_{eff} (note all $\lambda = C/f\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$): 1
Upload previous state: [Seleccionar archivo](#) N...o
Admittance: 0.0200 - 0.0133j
Reflection Coefficient: 0.315 \angle 108°

Click below to add

Series Capacitor	Parallel Capacitor	Series Inductor	Parallel Inductor	Series Resistor	Parallel Resistor	Transmission Line	Open Stub	Short Stub

Below is your system, note impedance is looking towards the BLACK BOX

DP1

50 0 j
50+0j

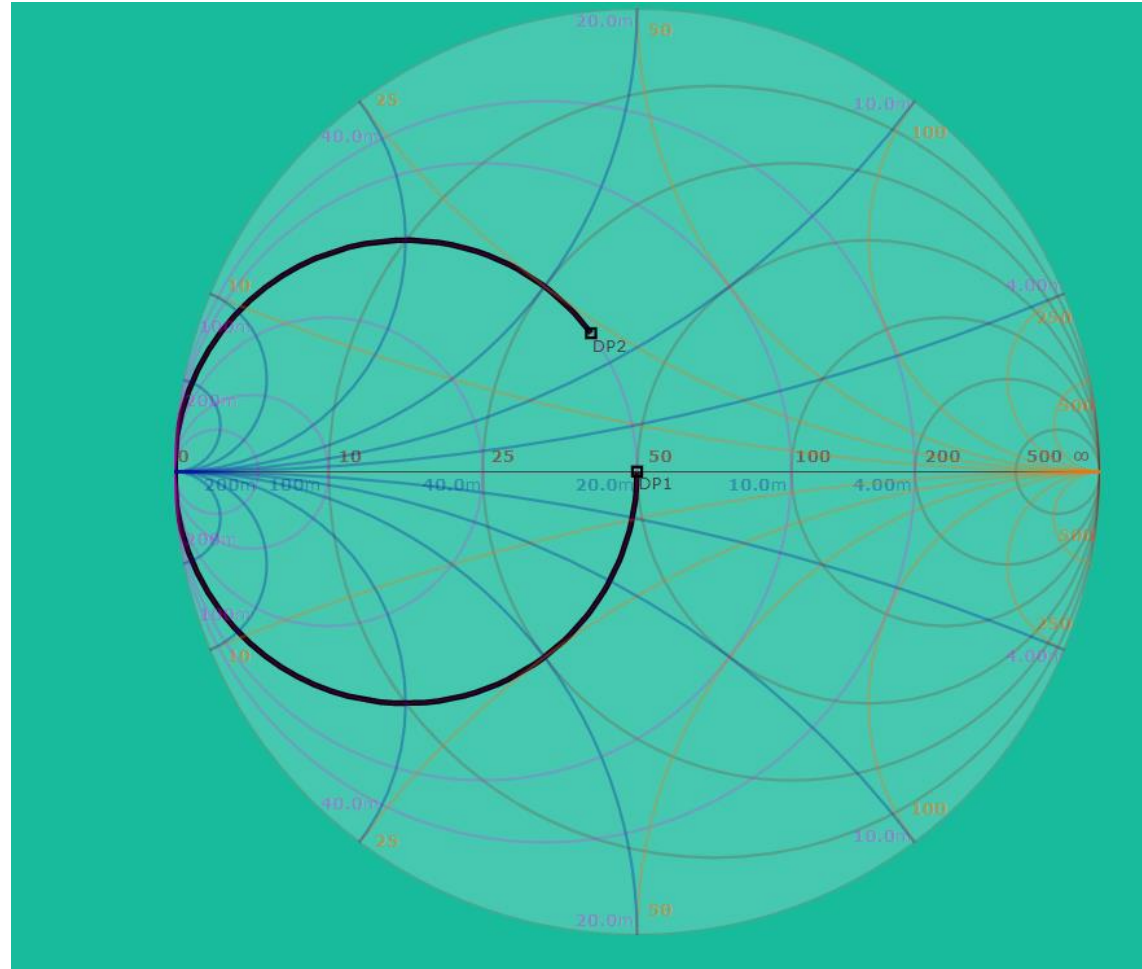
DP2

50 mm
Zo = 50

https://www.will-kelsey.com/smith_chart/

Diagrama de Smith: Generalidades

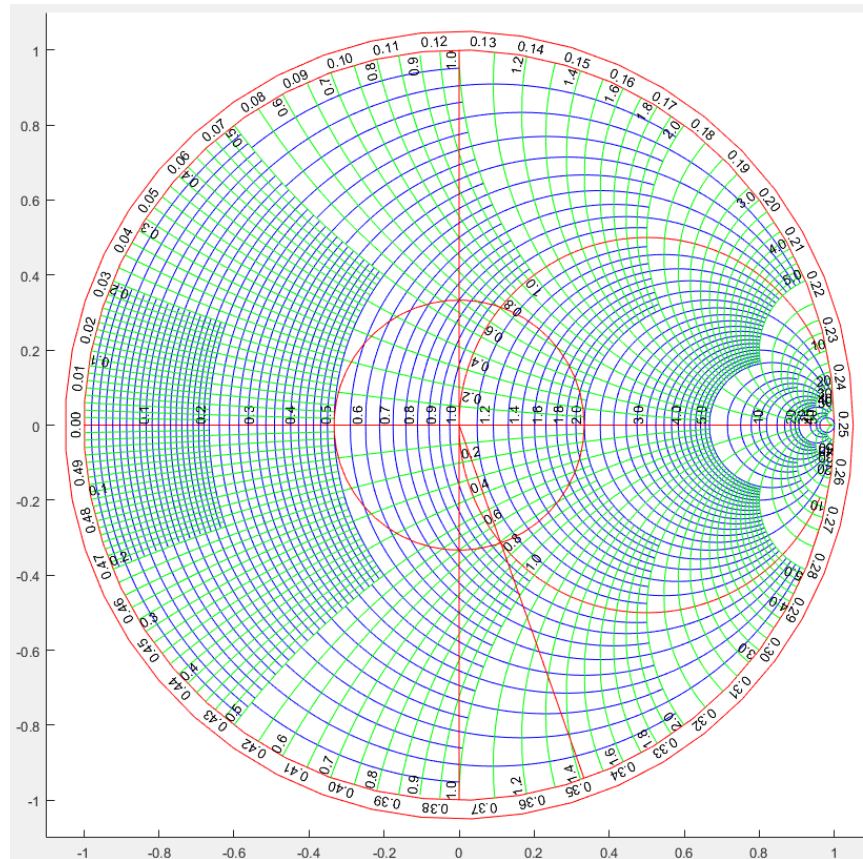
Hay aplicaciones en línea también, tienen la capacidad para mostrar el diagrama de Smith



https://www.will-kelsey.com/smith_chart/

Diagrama de Smith: Generalidades

Hay aplicaciones en Matlab, tienen la capacidad para mostrar el diagrama de Smith



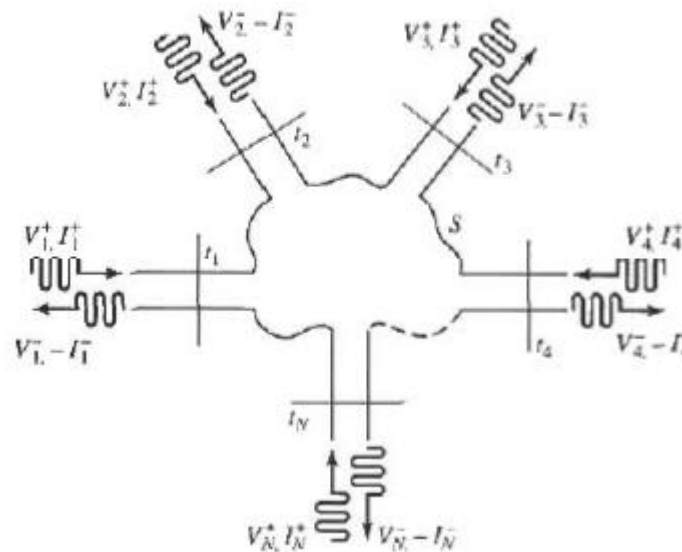
Contenidos y Cronograma

- Entornos de Simulación RF
- Líneas de Transmisión
- Componentes de radio frecuencia

Parámetros de Redes de Microondas

Representación que permite tratar un sistema general en términos de TL en las interfaces definidas como puertos, en función de la frecuencia.

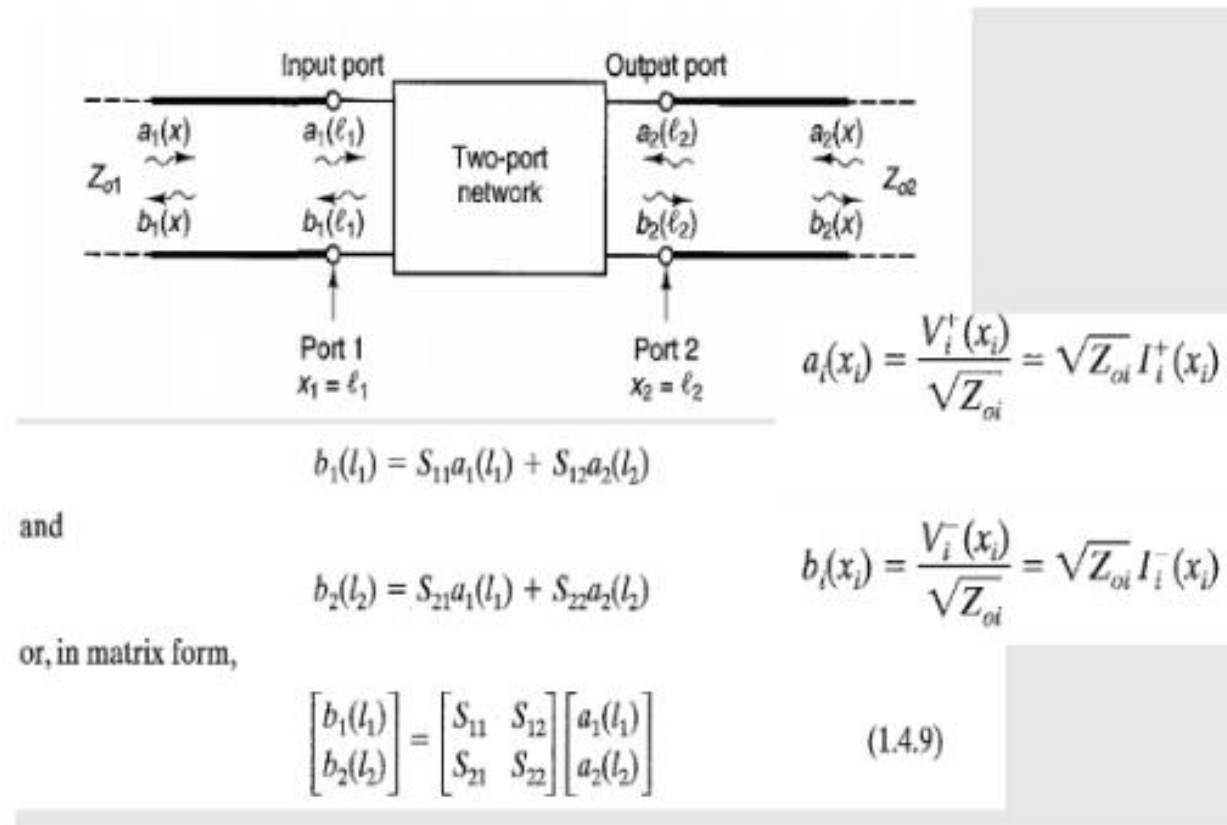
$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1N} \\ Z_{21} & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ Z_{N1} & \cdots & \cdots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix},$$



Lectura recomendada:
Pozar, Microwave
Engineering, 3 ed. Ch. 4.

Parámetros S (Scattering)

Parámetros de microondas en términos de ondas incidentes y reflejadas de tensión normalizadas.



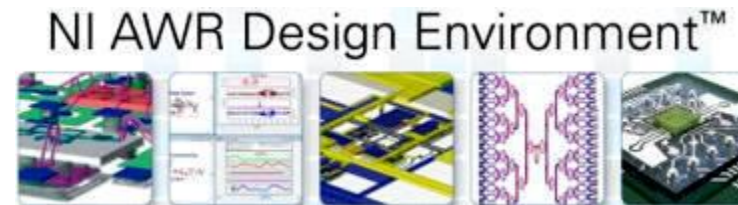
Parámetros S (Scattering)

En los casos prácticos estos parámetros pueden ser determinados con herramientas softwares para simulación y equipos de medición.



Analizador Vectorial de Redes (VNA)

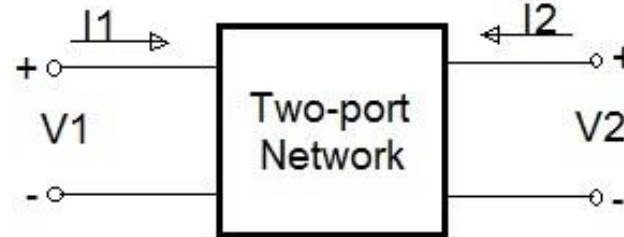
Tomado de VNA R&S



NI AWR Desing Enviroment

Tomado de NI AWR National Instruments

Parámetros S (Scattering)

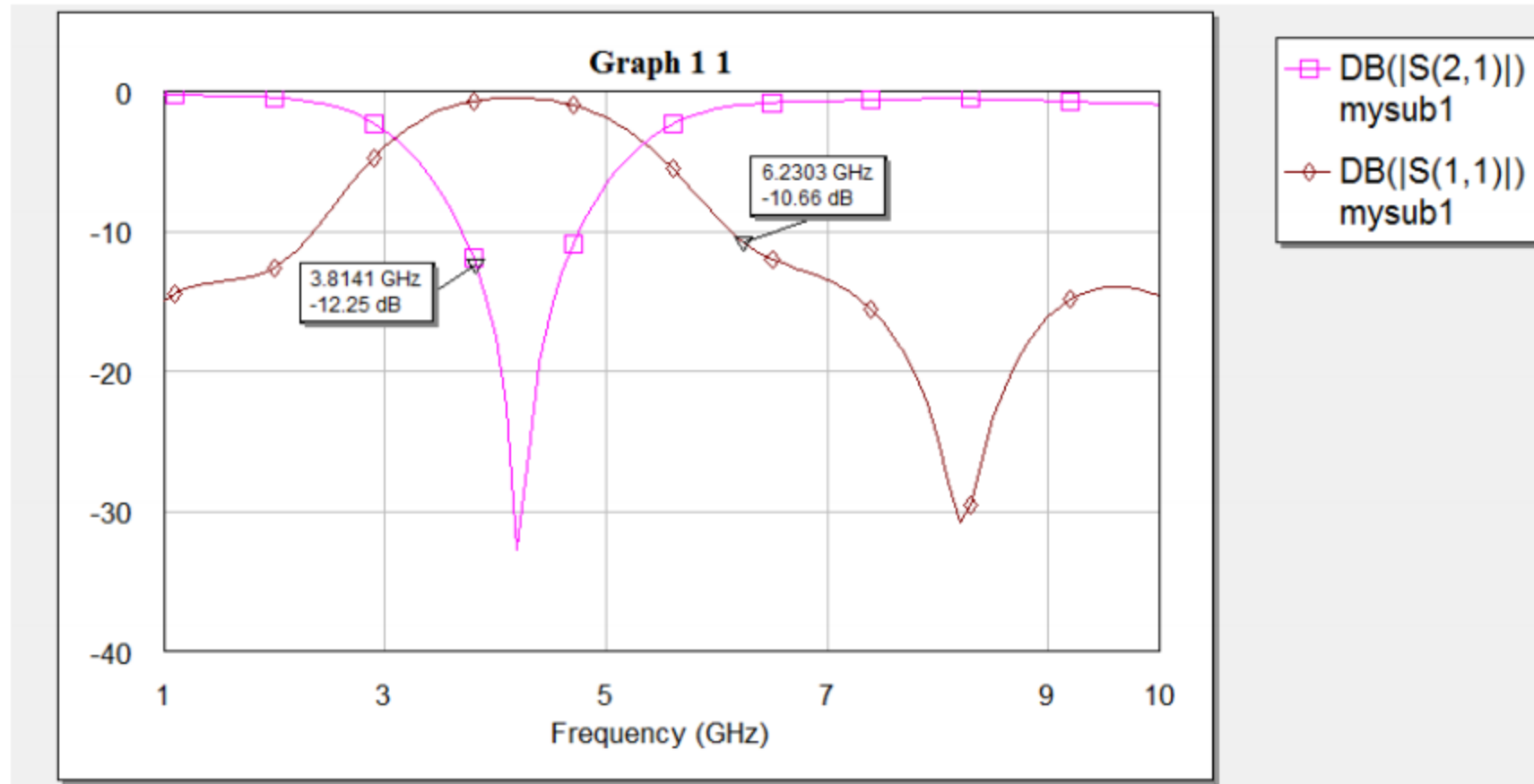


$$\begin{bmatrix} \Gamma_{11} & T_{12} \\ T_{21} & \Gamma_{22} \end{bmatrix}$$

Los parámetros S dan una versión intuitiva del comportamiento de un sistema en término de reflexiones y transmisión en función de la frecuencia.

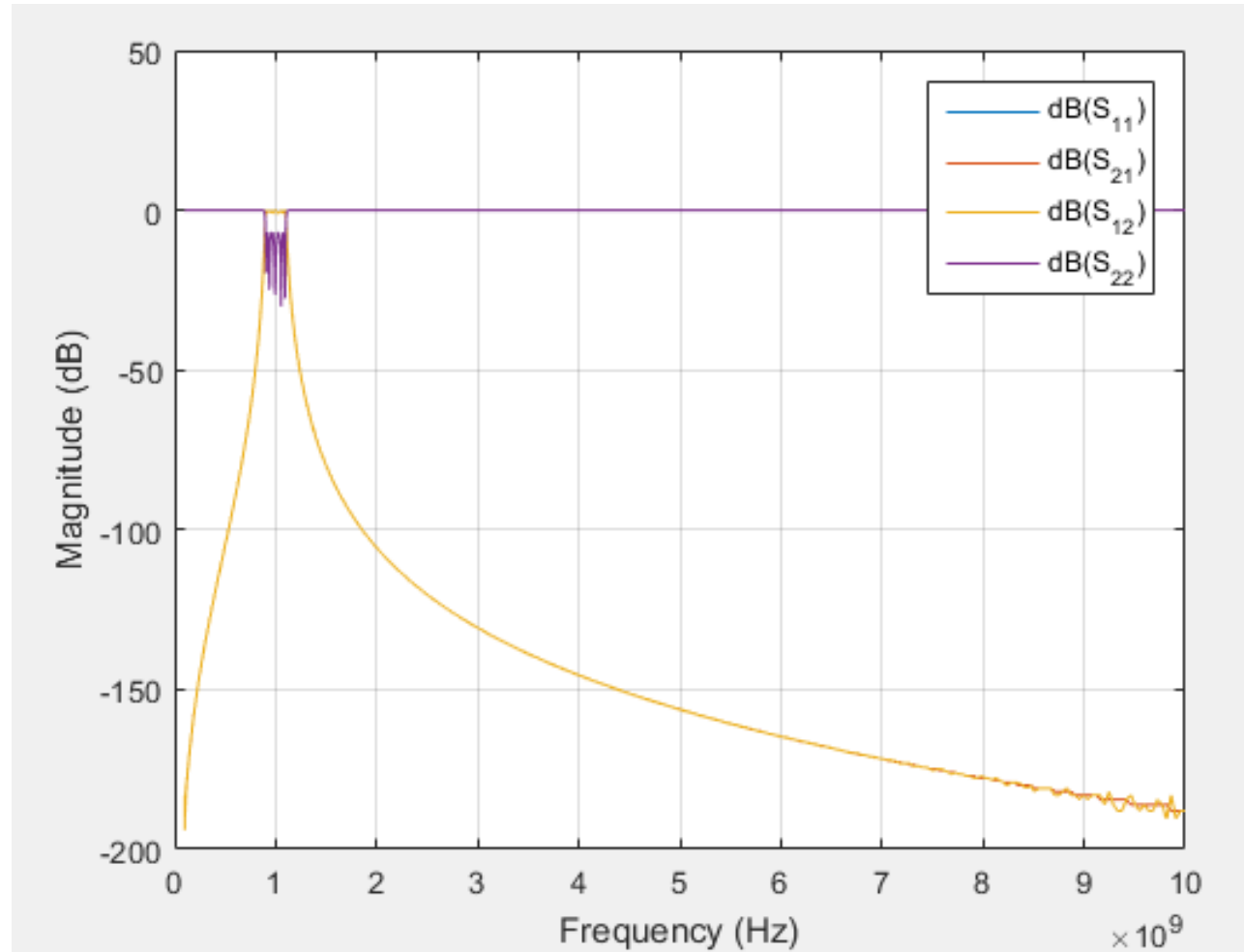
Parámetros S (Scattering)

Diversos software pueden llevar acabo el análisis de parámetros S



Parámetros S (Scattering)

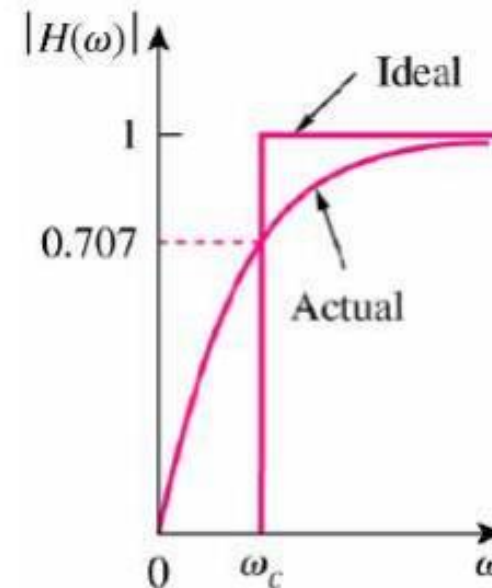
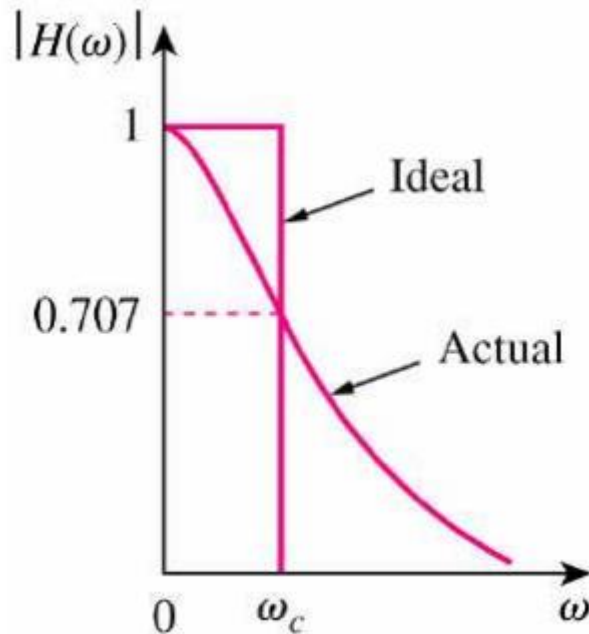
Diversos software pueden llevar acabo el análisis de parámetros S



Filtro

Red que atenúa cierta sección del espectro en frecuencias: pasa baja, pasa banda, paso alto, etc.

Pueden ser pasivos o activos y existen diferentes respuestas

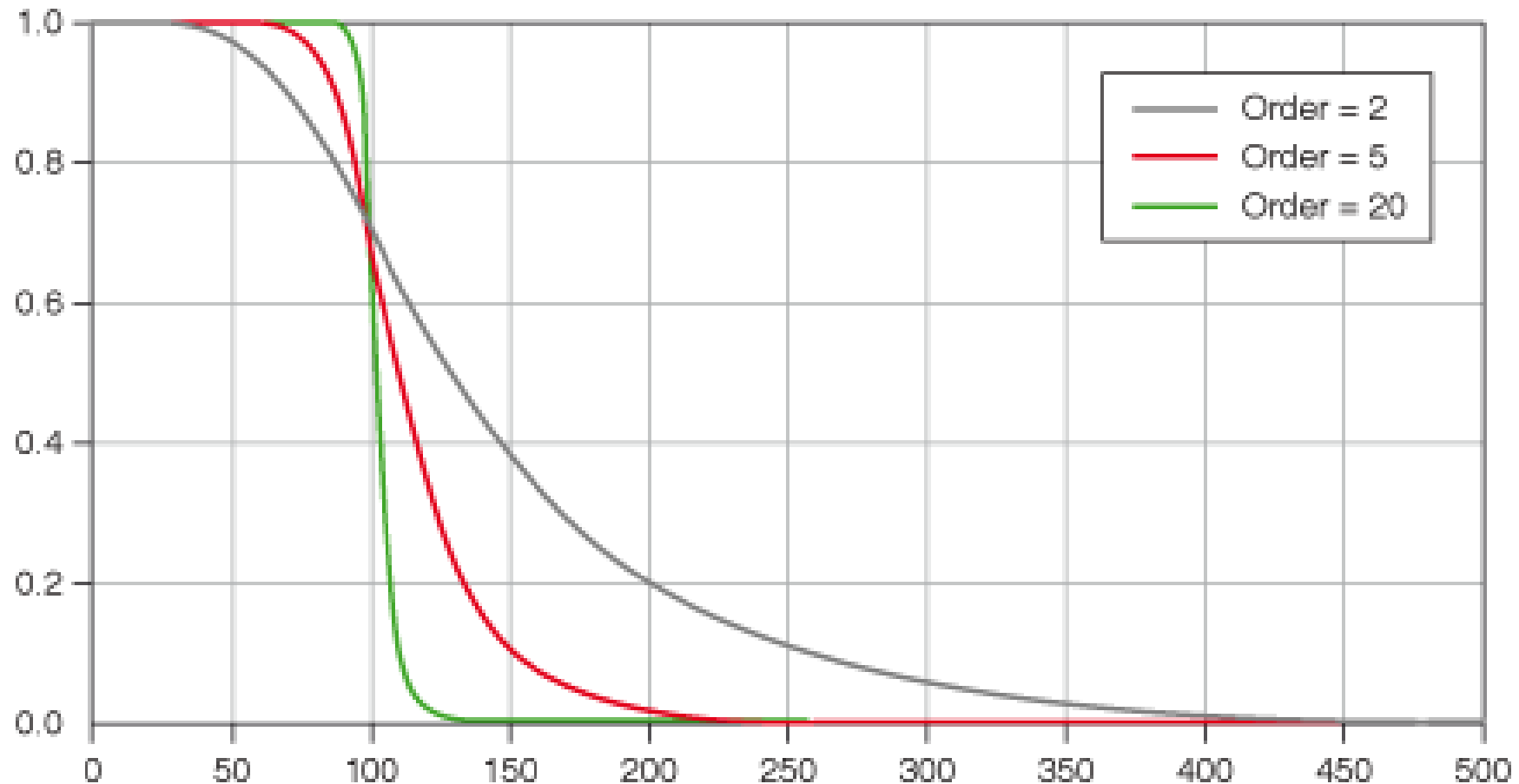


Filtro

- A partir de las respuestas en frecuencia de los filtros LPH y HPF, se puede conformar un filtro Butterworth.
- El filtro Butterworth es uno de los filtros más básicos, debido a que su diseño produce una respuesta lo más plana posible hasta en su frecuencia de corte.
- Debido a esa naturaleza el filtro Butterworth mantiene la salida casi constante hasta la frecuencia de corte y luego disminuye en razón de **$20n$ dB/dec**, dónde n es el orden del filtro.

Filtro

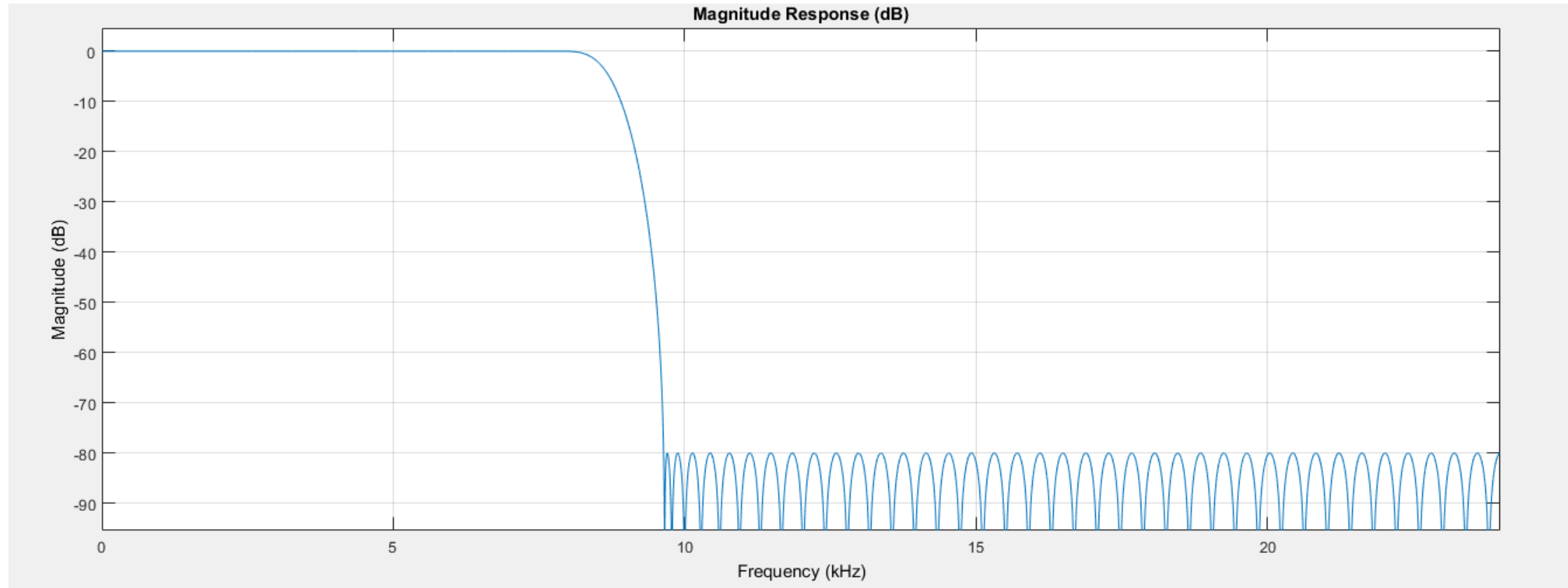
Butterworth Response



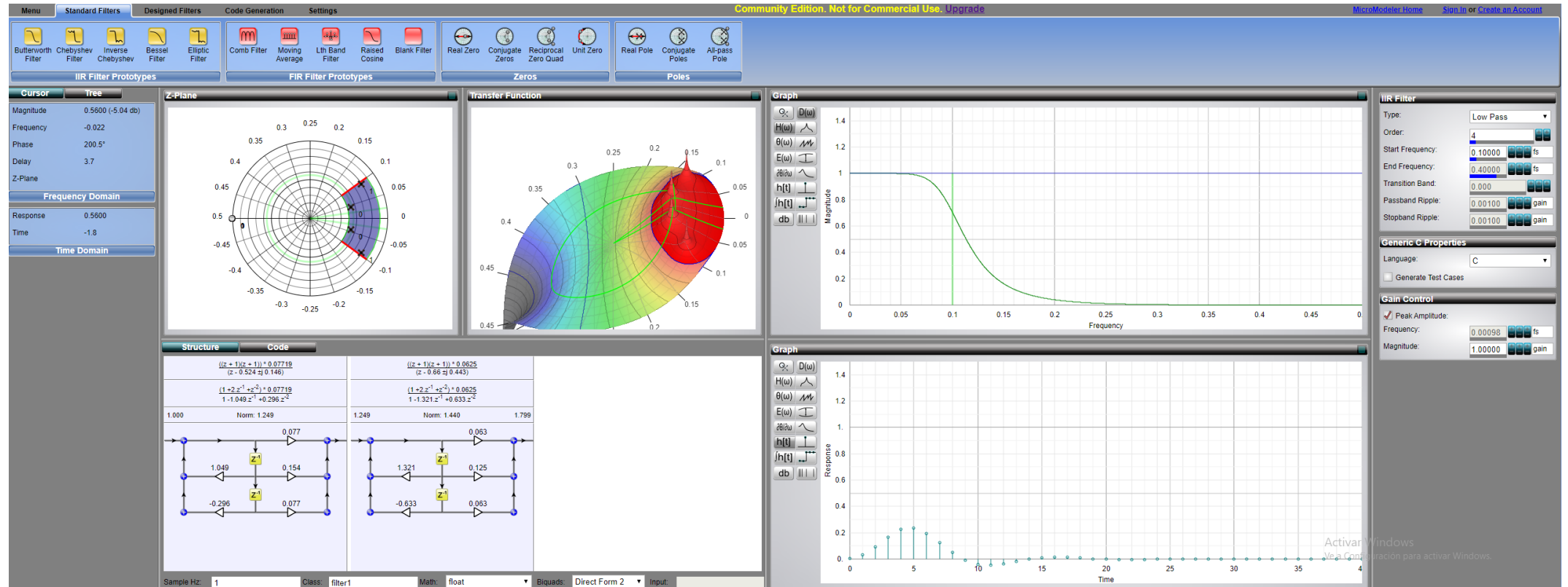
Respuesta en frecuencia de un filtro
Butterworth

Tomado de Butterworth Filters National Instruments

Filtro



Filtro



Bibliografía

- [1] Hayt, W. *Teoría Electromagnética*, Mc Graw-Hill, Octava Edición, 2013.
- [2] Sadiku M. *Elementos de Electromagnetismo*, Alfaomega, Traducción de la tercera edición en inglés, México, 2004.
- [3] Pozar, D.M., *Microwave Engineering*, 3 Ed. Wiley. 2005
- [4] Caspers, F, *Basic Concepts: The Smith Chart*, 2010.

Para más información pueden ingresar a: tec-digital ó <http://www.ie.tec.ac.cr/sarriola/>

Esta presentación se ha basado parcialmente en compilación para semestre anteriores de cursos de Laboratorio de Teoría Electromagnética II y Laboratorio de Comunicaciones Eléctricas por Aníbal Coto-Cortés, Renato Rimolo-Donadio, Sergio Arriola-Valverde y Luis Carlos Rosales.

