

EL 3003

Laboratorio de Ingeniería Eléctrica

Clase 4

Modulación y Línea de Transmisión

Profesor: Dr. Carlos Navarro C.
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile

Basado en las clases de la profesora
Dra. Constanza Ahumada.

Contenido

Modulación AM

Modulación

Modulación/Demodulación
AM DSB - LC

Modulación/Demodulación
AM DSB - SC

Modulación AM SSB

Líneas de Transmisión

Modelo

Velocidad Onda

Ondas Reflejadas

Ondas Estacionarias

Contenido

➡ Introducción

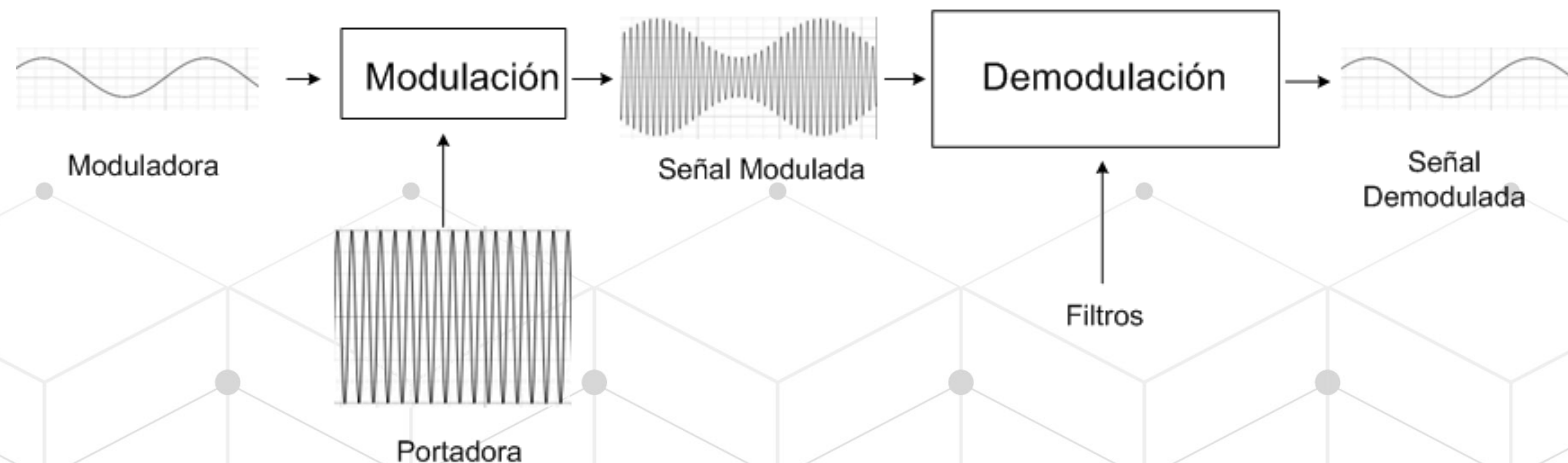
- Modulación de Banda Lateral Doble con Portadora (DSB-LC)
- Modulación de Banda Lateral Doble sin Portadora (DSB-SC)
- Modulación de Banda Lateral Única (SSB)



Introducción

- Proceso de variar una o mas propiedades de una onda/señal periódica (llamada portadora), con una señal moduladora que tiene la información que quiere ser transmitida.
- Ejemplo: Señales de comunicación ya que la atmósfera atenúa la frecuencia audible (10-20kHz).

Medio de Propagación



Introducción

Ventajas: Transmitir señales a distancia

Evita interferencia entre canales.

Protege a la Información del ruido.

Aplicación: Telecomunicaciones: Radio, Modem (Modulator/Demodulator)

Electrónica de Potencia: Conversión digital-análogo (DAC).

Tipos: Análoga

Digital

Introducción – Modulación Análoga

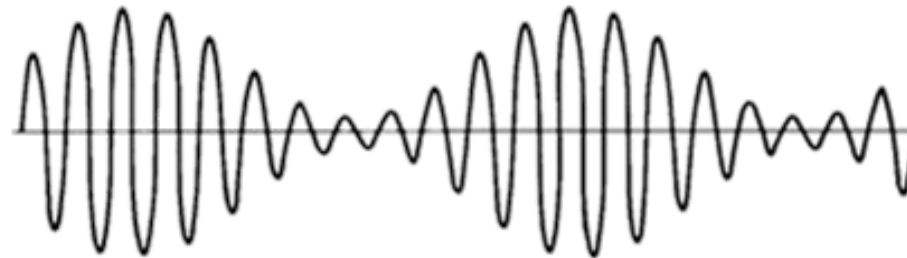
Gelombang Pembawa
(Carrier)



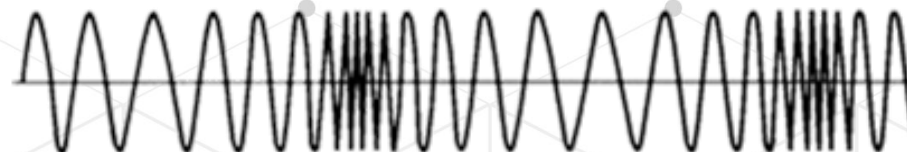
Sinyal Informasi Analog



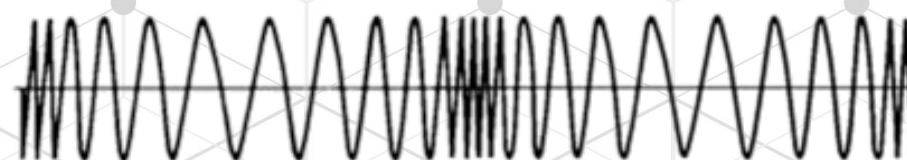
Amplitude Modulation
(AM)



Frequency Modulation
(FM)



Phase Modulation
(PM)



Introducción – Modulación AM

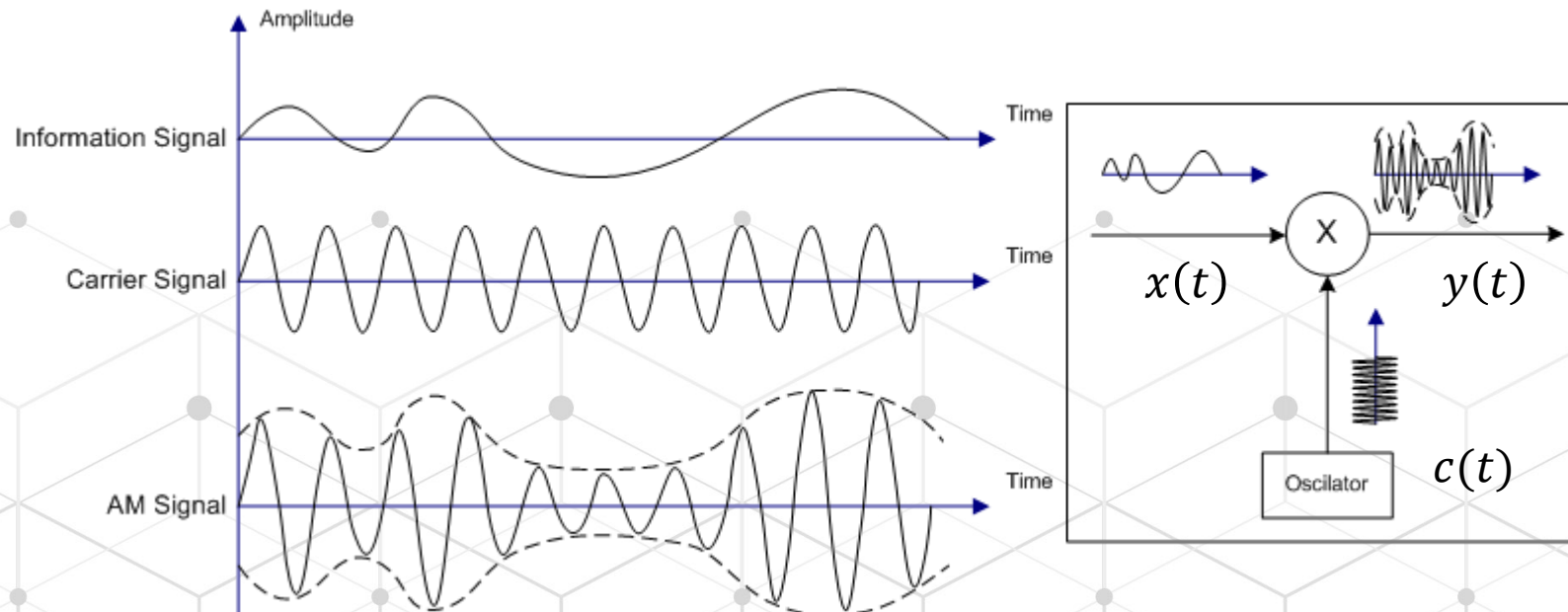
- **Moduladora:** Señal de baja frecuencia, con la información a transmitir.

$$x(t) = V_m \cos(\omega_m t)$$

- **Portadora:** Señal de alta frecuencia.

$$c(t) = V_p \cos(\omega_p t)$$

- **Señal Modulada:** $y(t)$ con $\omega_m \ll \omega_p$



Introducción – Modulación AM



Señal modulada: Es la señal que se transmite por el medio después del proceso de modulación.

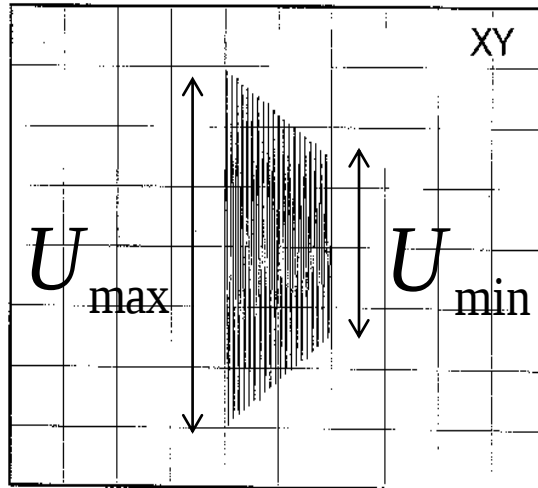
Señal demodulada: Señal que recupera la información que traía la señal modulada. Una de las etapas de la recuperación de la información utiliza filtros.

Modulación AM – Grado de Modulación

- Grado de Modulación (m): Es la relación entre la amplitud de la moduladora (V_m) y la amplitud de la portadora (V_p).

$$m = \frac{V_m}{V_p}$$

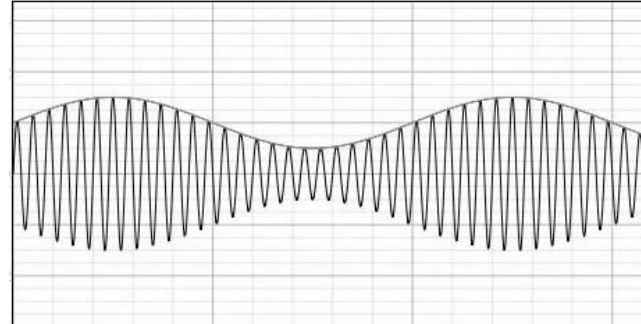
- En un osciloscopio en modo XY el grado de modulación se calcula como:



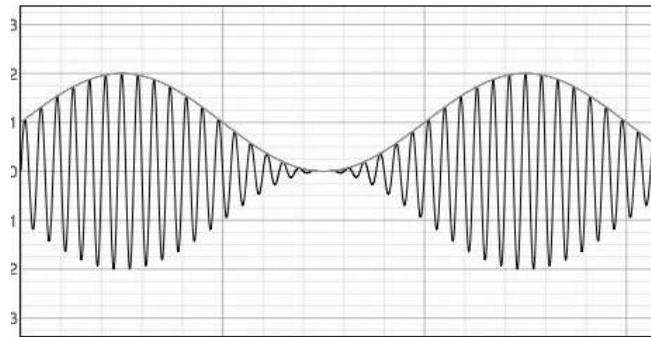
$$m = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}}$$

Modulación AM – Grado de Modulación

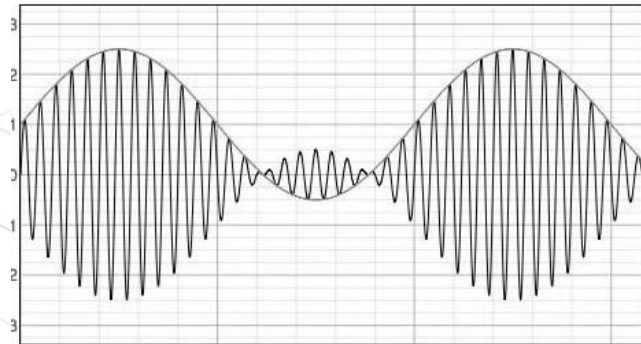
$m < 1$



$m = 1$



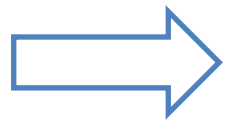
$m > 1$



Sobre-modulación

Contenido

- Introducción



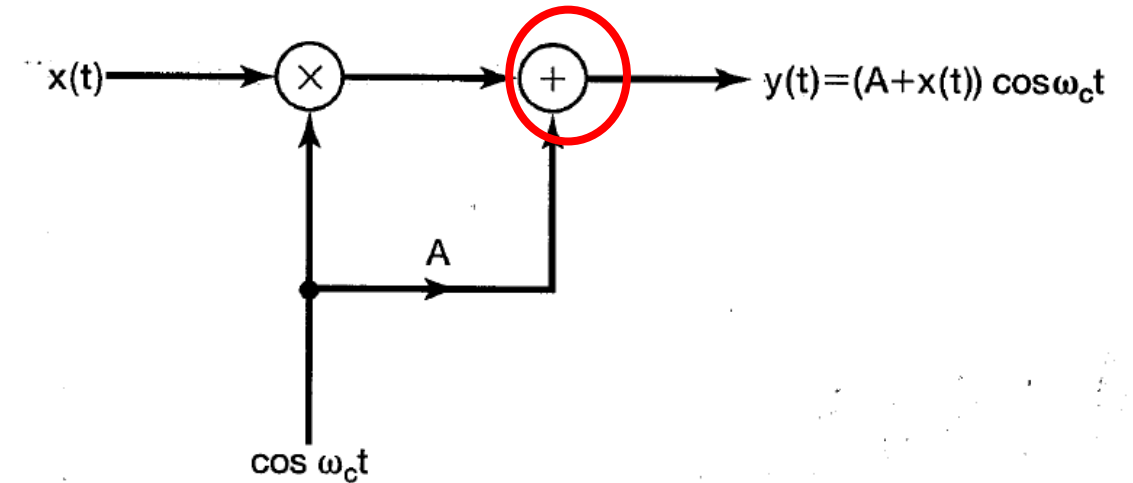
Modulación de Banda Lateral Doble con Portadora (DSB-LC)

- Modulación de Banda Lateral Doble sin Portadora (DSB-SC)
- Modulación de Banda Lateral Única (SSB)



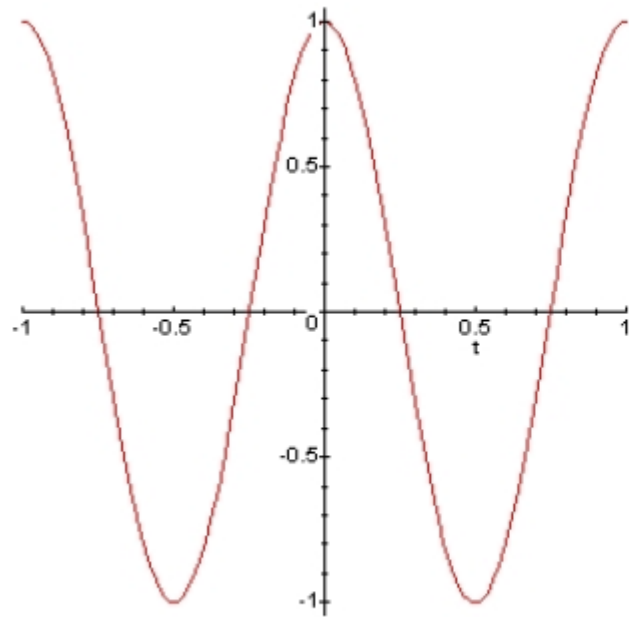
DSB-LC – Modulación

- Modulación de Banda Lateral Doble con Portadora (DSB – LC)
- También llamada modulación AM simple o modulación asíncrona.
- Moduladora: $x(t) = V_m \cos(\omega_m t)$
- Portadora: $c(t) = V_p \cos(\omega_p t)$
- Señal Modulada:



$$y(t) = (V_p + x(t)) \cos(\omega_p t)$$
$$y(t) = V_p \cos(\omega_p t) + V_m \cos(\omega_m t) \cos(\omega_p t)$$
$$y(t) = V_p \cos(\omega_p t) + \frac{1}{2} V_m \cos((\omega_p + \omega_m)t) + \frac{1}{2} V_m \cos((\omega_p - \omega_m)t)$$
$$y(t) = V_p \cos(\omega_p t) + \frac{1}{2} V_m \cos((\omega_p + \omega_m)t) + \frac{1}{2} V_m \cos((\omega_p - \omega_m)t)$$

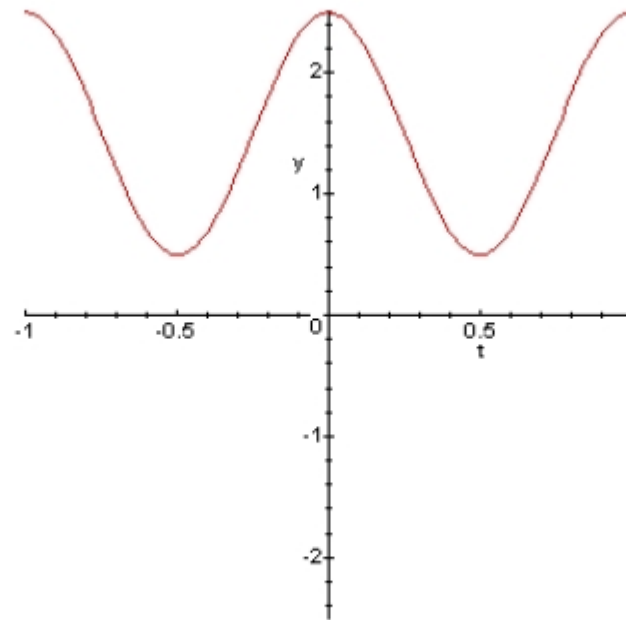
DSB-LC – Modulación



$f(t)$

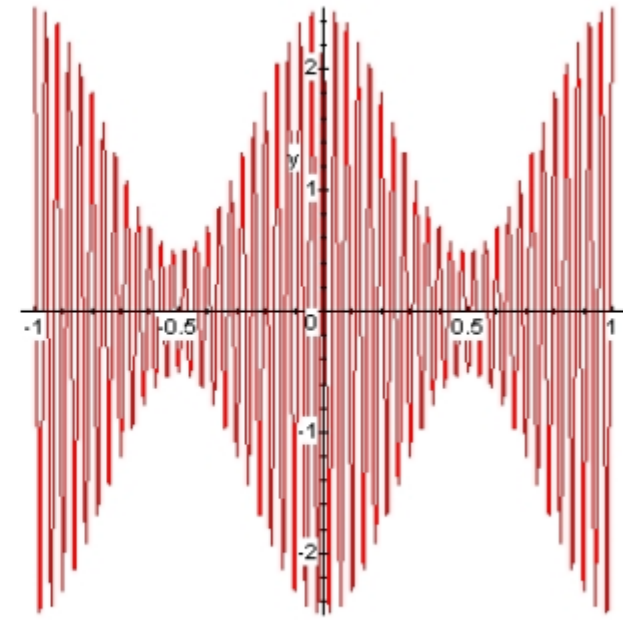
Moduladora

$$x(t) = V_m \cos(\omega_m t)$$



$A + f(t)$

$$V_p + x(t)$$



$(A + f(t))\cos(\omega_c t)$

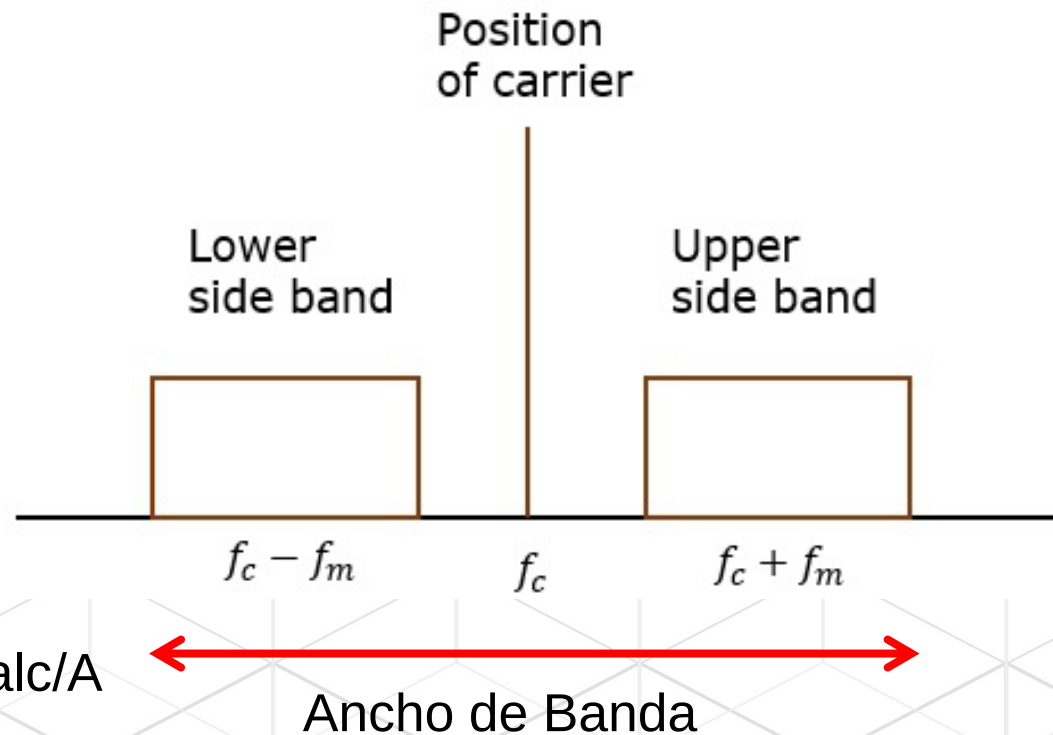
Modulada

$$y(t) = (V_p + x(t)) \cos(\omega_p t)$$

DSB-LC – Modulación

- Dominio de frecuencia:

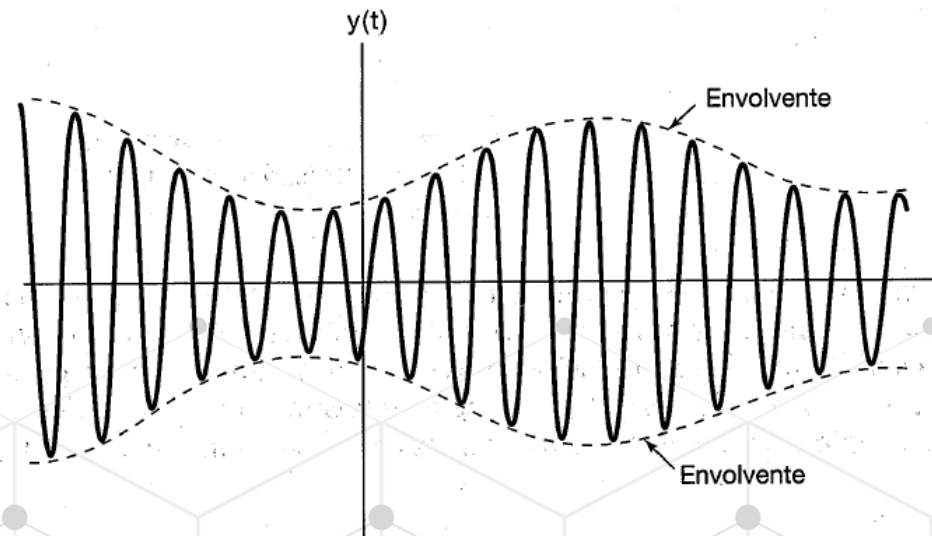
$$y(t) = V_p \cos(\omega_p t) + \frac{1}{2} V_p m \cos((\omega_p + \omega_m)t) + \frac{1}{2} V_p m \cos((\omega_p - \omega_m)t)$$



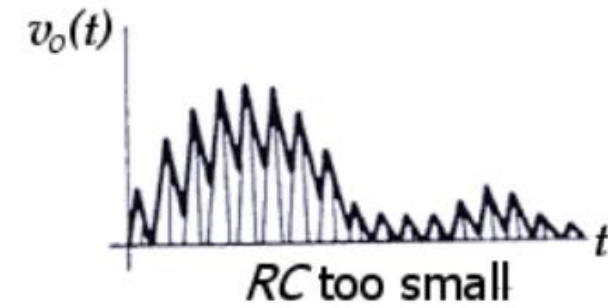
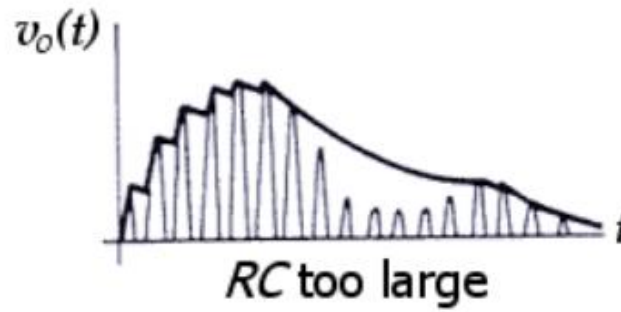
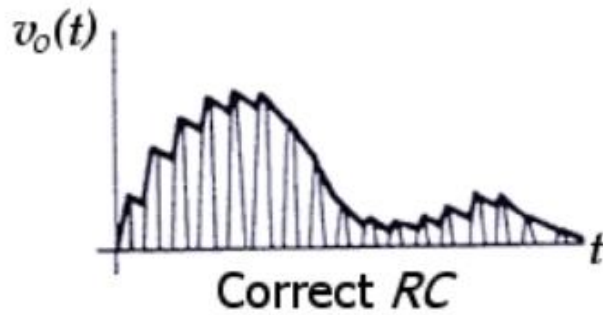
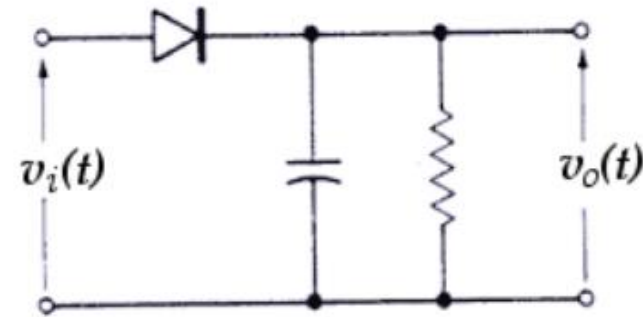
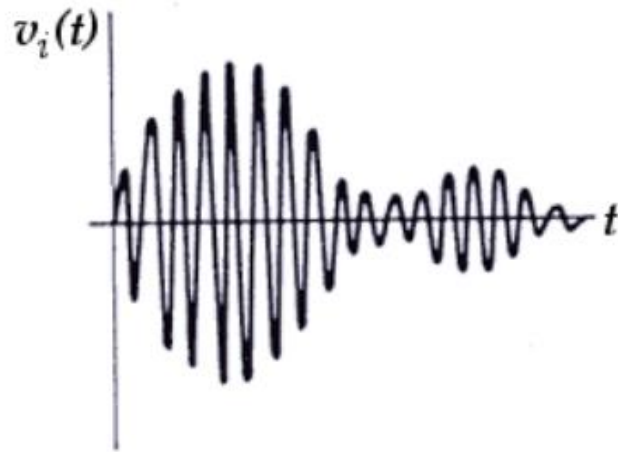
Animación:
<http://rftoolbox.dtu.dk/rfcalc/AMtime.html>

DSB-LC – Demodulación

- Recupera la información de $x(t)$ a través de la envolvente.
- Requisitos: $\omega_p > \omega_m$ y $x(t)$ positiva
- Se usa un filtro pasabajos para reducir las variaciones que aparecen en la frecuencia portadora.



DSB-LC – Demodulación



DSB-LC – Potencia

- La potencia de la señal modulada viene dada por:

$$P = \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) P_p$$

- Donde P_p es la potencia de la portadora.

Como esta forma de modulación transmite la portadora también, se pierde potencia innecesaria.

DSB-LC

Ventajas	Desventajas
Barata	Baja Calidad
Simple Demodulación	Pérdida de Potencia Innecesaria
Receptores Sencillos	Gran Ancho de Banda

Aplicación: Primeras Radios

Contenido

- Introducción
- Modulación de Banda Lateral Doble con Portadora (DSB-LC)
- ➔ Modulación de Banda Lateral Doble sin Portadora (DSB-SC)
- Modulación de Banda Lateral Única (SSB)

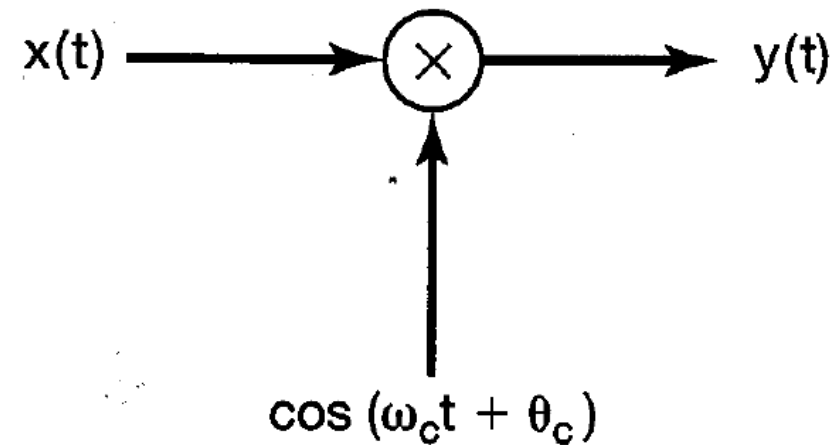


DSB-SC - Modulación AM

- Standard AM
- También llamado Síncrono (o DSB en la experiencia)
- La modulación en doble banda lateral equivale a una modulación AM, pero sin reinserción de la portadora.
- La señal modulada en DSB responde a la siguiente ecuación:

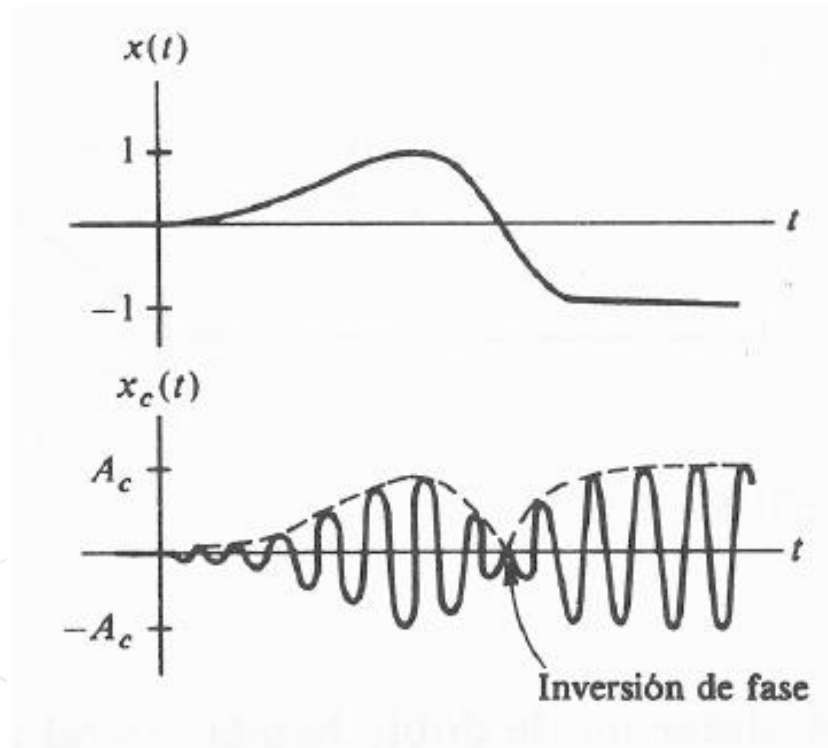
$$y(t) = x(t)c(t)$$

$$y(t) = V_p \cos(\omega_p t) x(t)$$



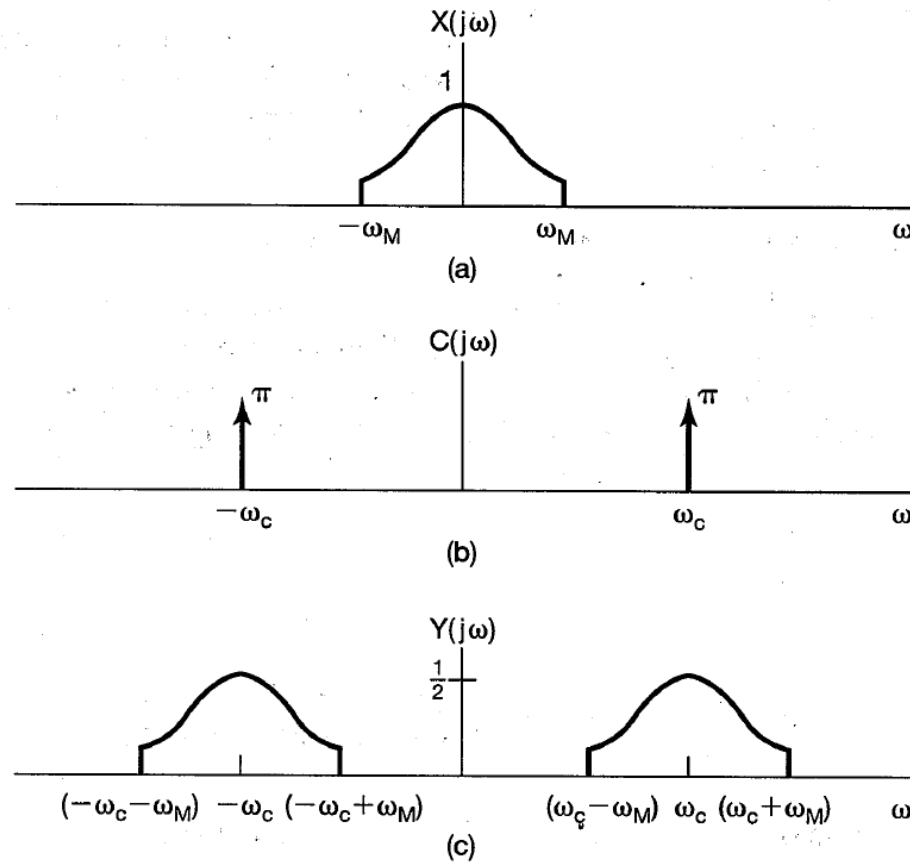
DSB-SC - Modulación AM

- Dominio del tiempo

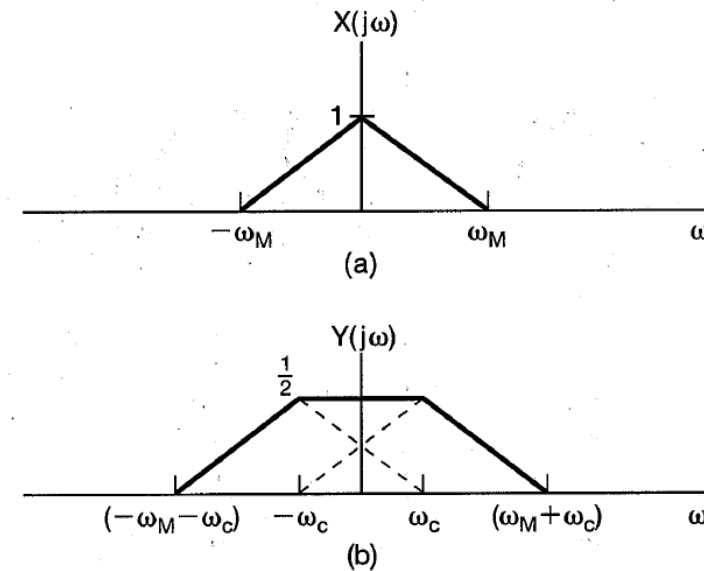


Detección de
envolvente no es
suficiente

DSB-SC - Modulación AM

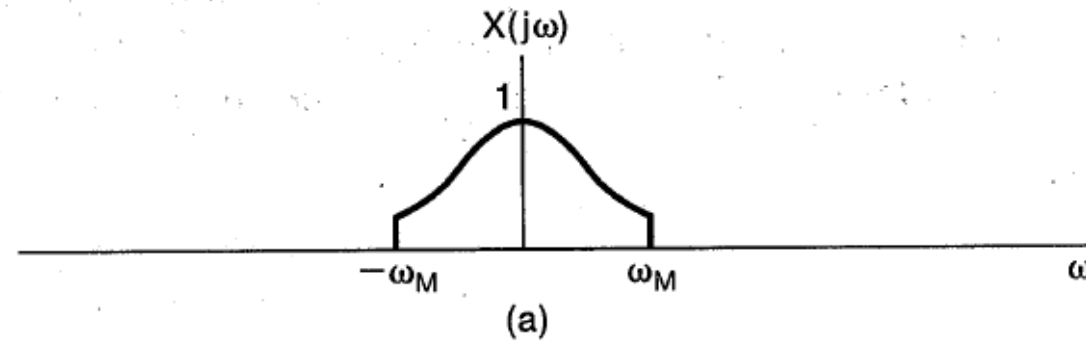


Si $\omega_p < \omega_m$ sucede:

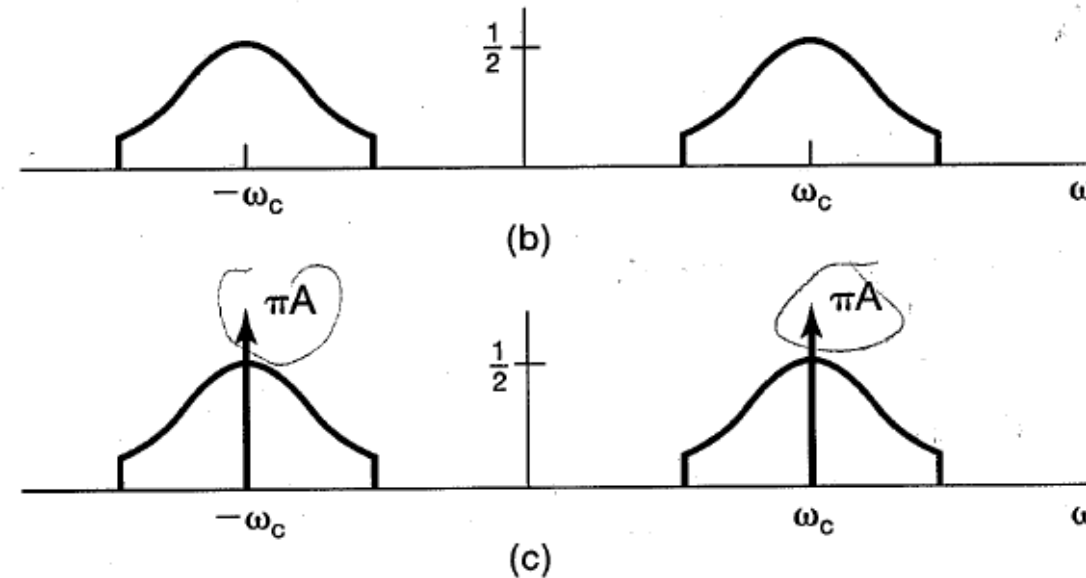


Comparación de DSB LC y DSB SC

DSB SC



DSB LC

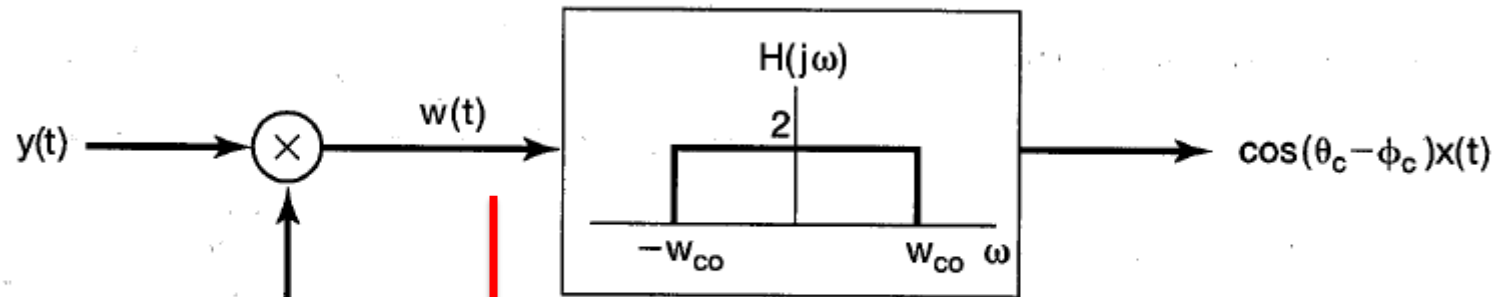


DSB-SC - Demodulación AM

1. Se multiplica la señal DSB SC $y(t)$ con el coseno de misma frecuencia ω_p y fase ϕ_p que la portadora:

$$x_D(t) = y(t) \cos(\omega_p t + \phi_p)$$

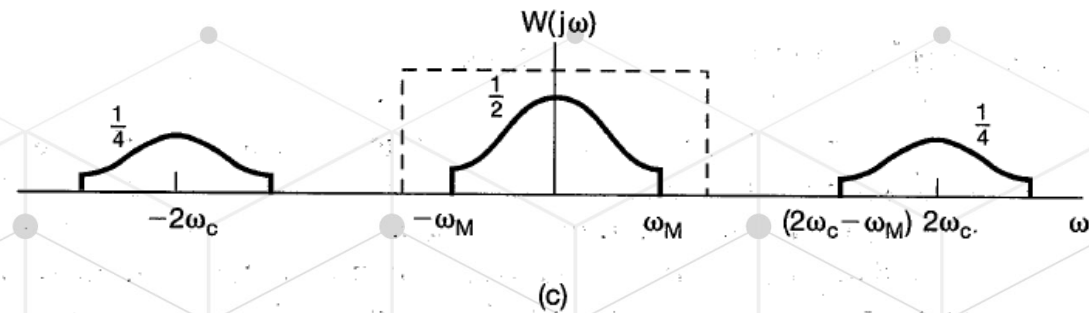
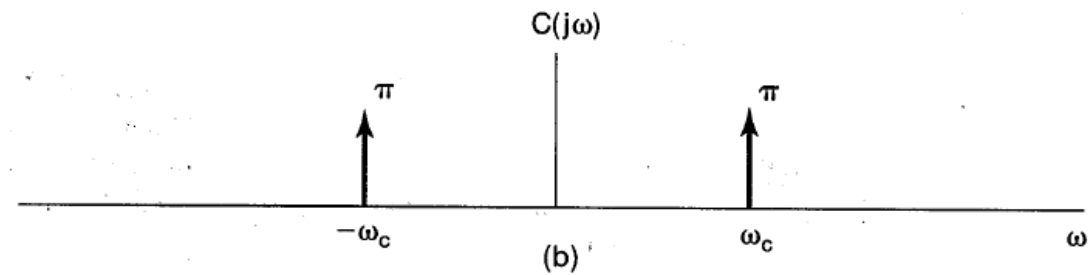
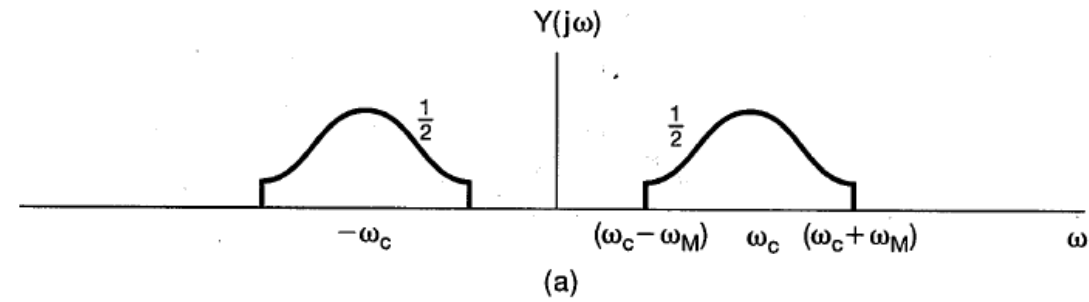
2. Se filtra la señal



$$\begin{aligned} w(t) &= y(t) \cos(\omega_c t) \\ &= x(t) \cos^2(\omega_c t) \\ &= \frac{1}{2} x(t) + \frac{1}{2} x(t) \cos(2\omega_c t) \end{aligned}$$

DSB-SC - Demodulación AM

- Receptor y transmisor se sincronizan en fase.
- Es difícil sintonizar las fases.



DSB-SC - Potencia Modulación AM

- La potencia viene dada por:

$$P = \frac{1}{2} V_p^2 P_x$$

- Dónde P_x es la potencia de la señal moduladora y V_p la amplitud de la portadora.
- Es decir, toda la potencia en la transmisión es proveniente de la señal moduladora.

DSB SC

Ventajas	Desventajas
No hay pérdida de potencia	No se puede usar detector envolvente.
	Gran Ancho de Banda

Aplicaciones:

- Comunicación punto a punto donde hay un solo receptor ya que este sería más complejo que en AM
- Sistemas de telemetría

Contenido

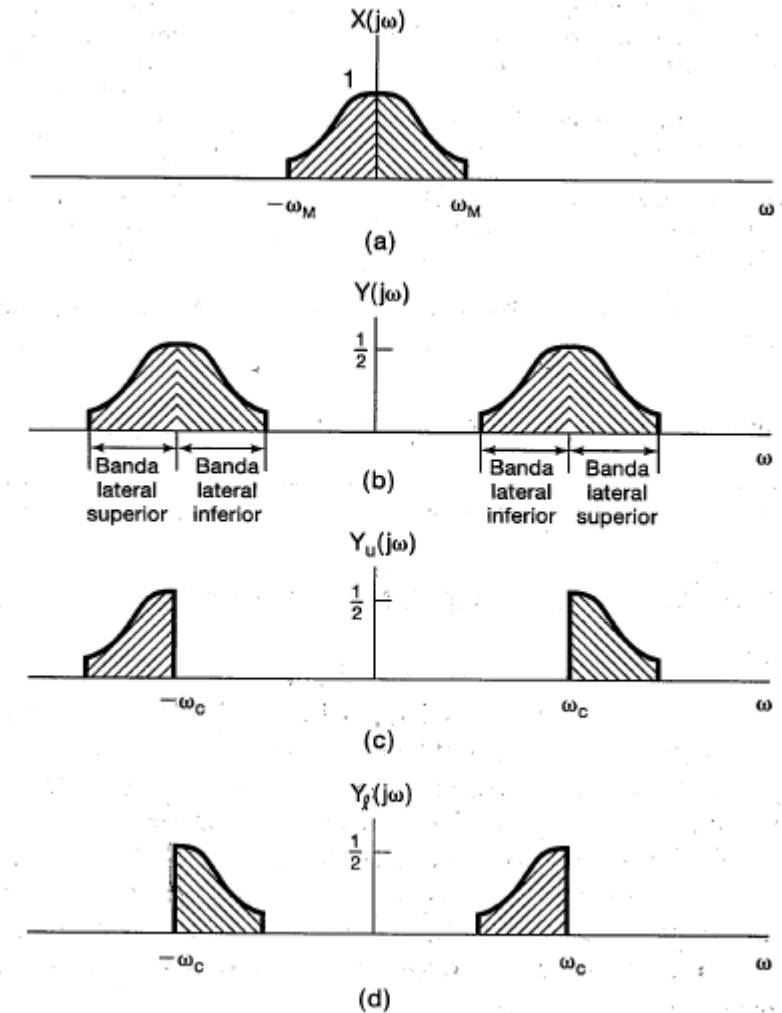
- Introducción
- Modulación de Banda Lateral Doble con Portadora (DSB-LC)
- Modulación de Banda Lateral Doble sin Portadora (DSB-SC)

➔ Modulación de Banda Lateral Única (SSB)



SSB - Modulación AM

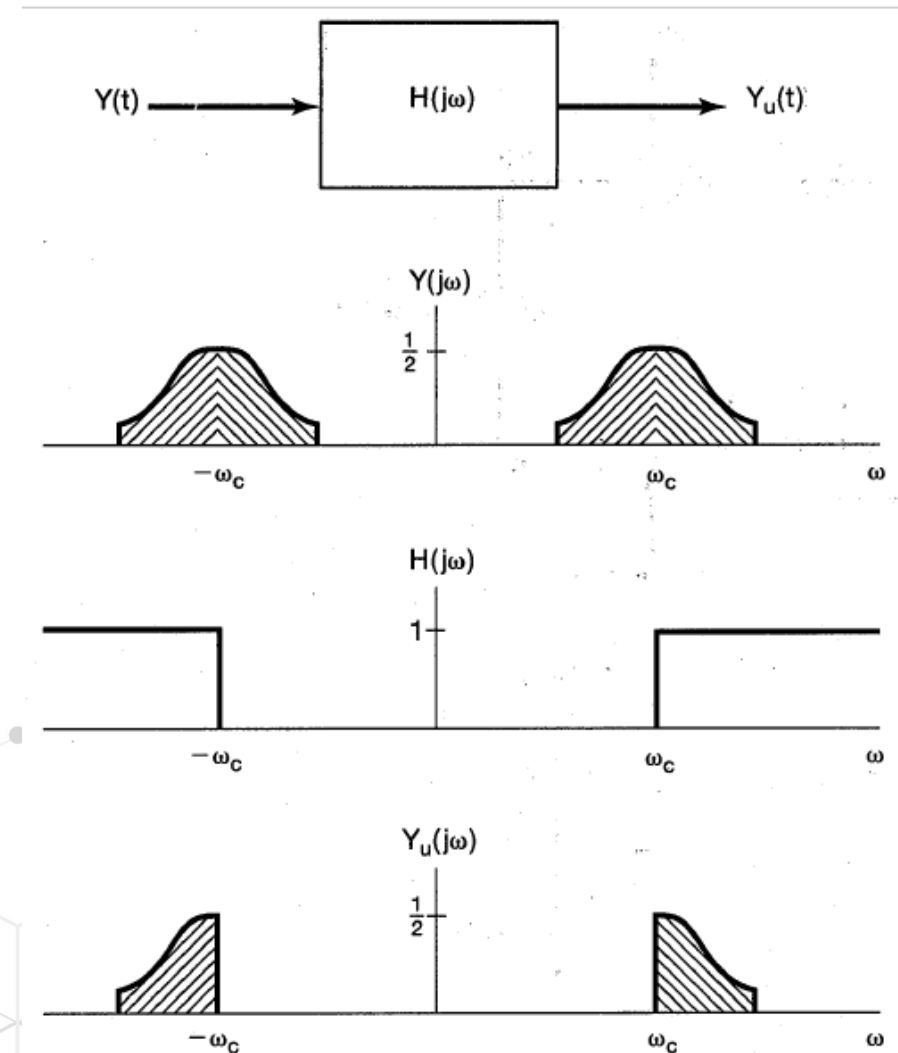
- Corresponde a una mejora de la modulación DSB.
- DSB LC: portadora y las 2 bandas laterales.
- DSB SC: las 2 bandas laterales.
- **En SSB solo se transmite una banda lateral.**
- 2 métodos para encontrarla:
 - Filtro pasa banda.
 - Desfasador.



SSB - Modulación AM

Mediante uso de filtro

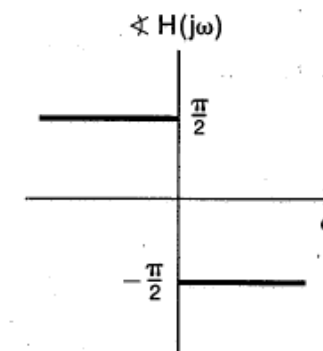
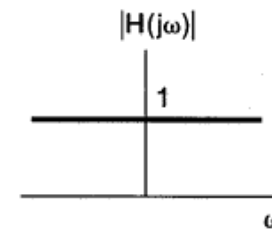
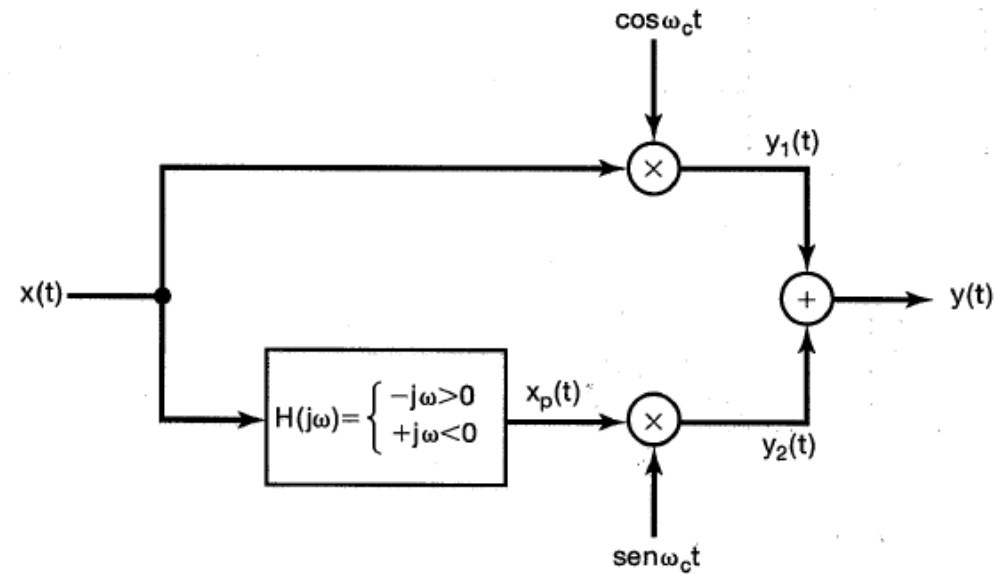
- Se puede utilizar indistintamente la banda lateral superior (USB) o inferior (LSB).
- La más utilizada es la USB.
- Es inevitable que se distorsionen las bajas frecuencias



SSB - Modulación AM

Mediante uso de desfasador

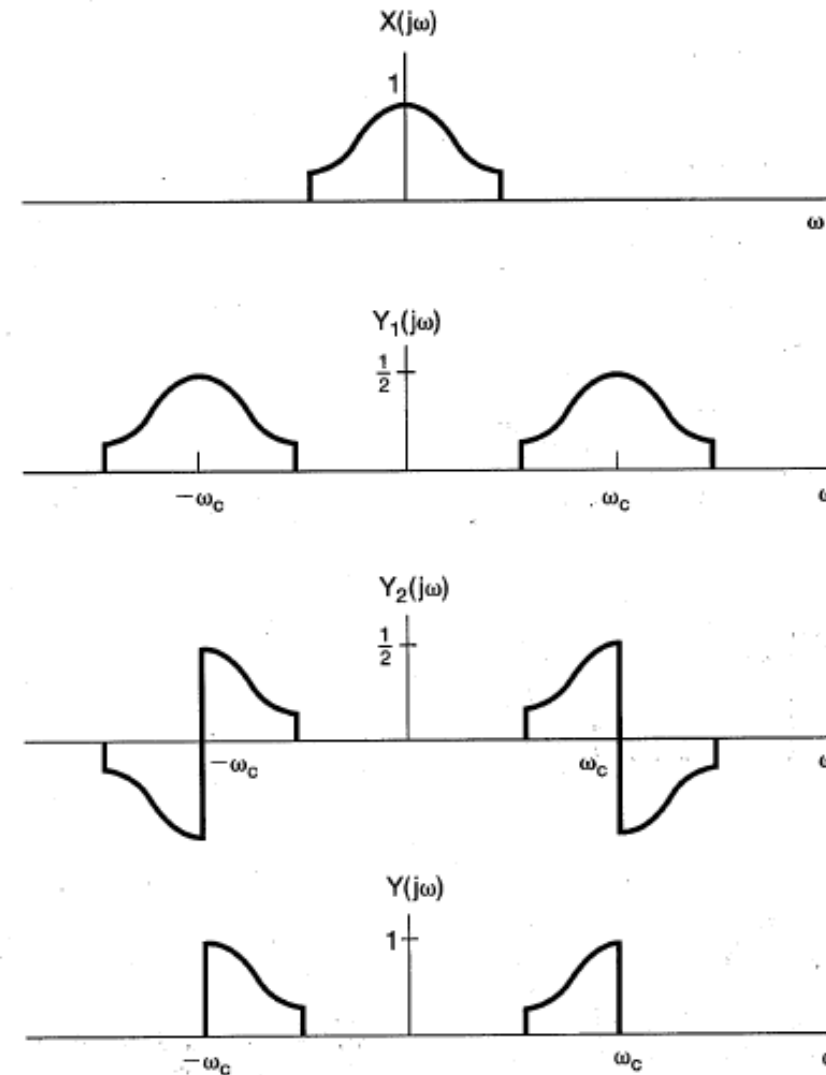
- Red de desplazamiento de fase en 90 grados.
- Luego se pasa por pasabajos.



SSB - Modulación AM

Mediante uso de desfasador

- Red de desplazamiento de fase en 90 grados.



SSB

Ventajas	Desventajas
Menor consumo de potencia ($1/4$ de la energía que en DSB LC)	Mas cara
Menor ancho de banda	La producción de la onda es complicada (se necesitan mas equipos)

Aplicaciones

- Comunicaciones telefónicas.
- Fue popular en los tiempos de la válvula de vacío (tecnología previa al transistor). La válvula de vacío posibilitó desarrollos como el radar o el televisor.
- En radios no comerciales.

Contenido

Modulación AM

Modulación

Modulación/Demodulación
AM DSB - LC

Modulación/Demodulación
AM DSB - SC

Modulación AM SSB

Líneas de Transmisión

Modelo

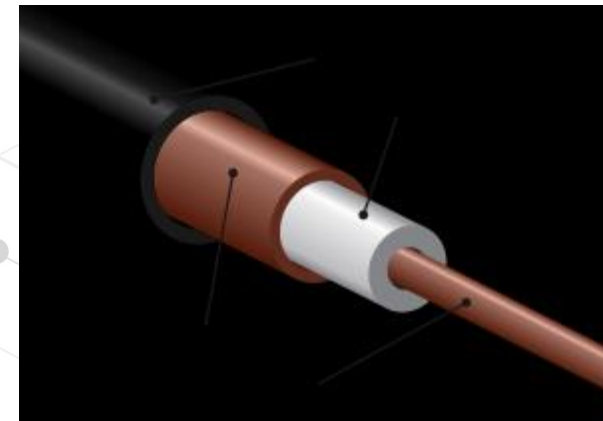
Velocidad Onda

Ondas Reflejadas

Ondas Estacionarias

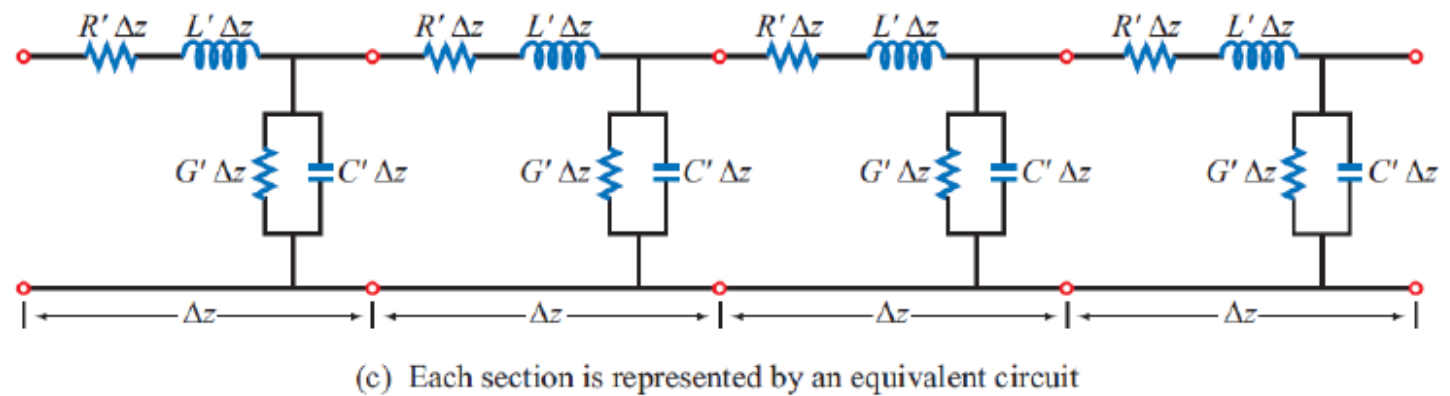
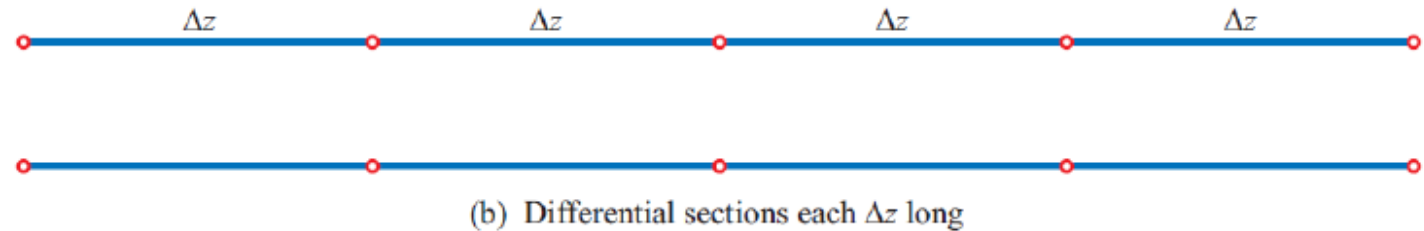
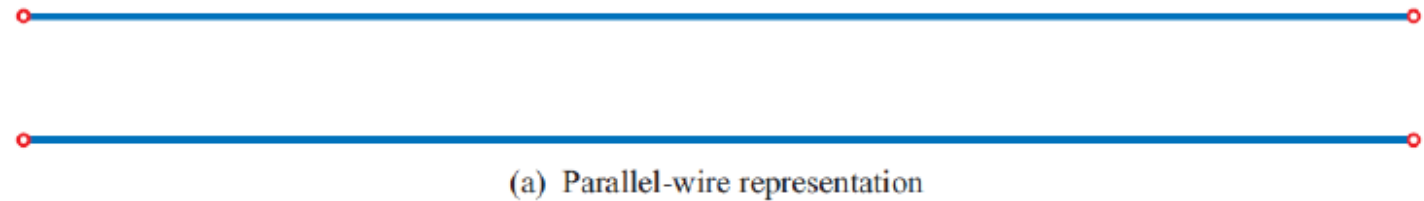
Modelo línea de transmisión

- Uso:
 - Transportar energía y ondas electromagnéticas (información)
- Para transmitir potencia de forma eficiente se usan líneas de transmisión.
- Pérdidas:
 - Materiales imperfectos: pérdidas en el dieléctrico de la línea, pérdidas en los conductores, etc.
- Cargas y corrientes variables en el tiempo son fuentes de campos y ondas electromagnéticas.
- Tipos:
 - Dos alambres
 - Coaxial: transmisión información.



Modelo línea de transmisión

- Modelo Concentrado



- Modelo Distribuido

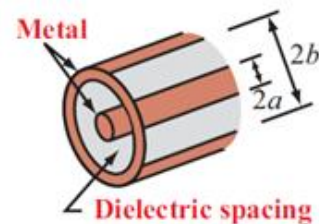


Modelo línea de transmisión

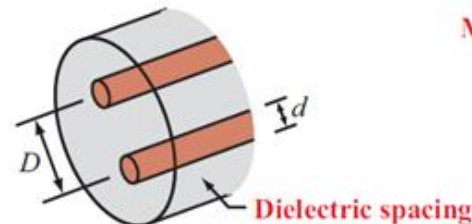
Parameter	Coaxial	Two-Wire	Parallel-Plate	Unit
R'	$\frac{R_s}{2\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$	$\frac{2R_s}{\pi d}$	$\frac{2R_s}{w}$	Ω/m
L'	$\frac{\mu}{2\pi} \ln(b/a)$	$\frac{\mu}{\pi} \ln \left[(D/d) + \sqrt{(D/d)^2 - 1} \right]$	$\frac{\mu h}{w}$	H/m
G'	$\frac{2\pi\sigma}{\ln(b/a)}$	$\frac{\pi\sigma}{\ln \left[(D/d) + \sqrt{(D/d)^2 - 1} \right]}$	$\frac{\sigma w}{h}$	S/m
C'	$\frac{2\pi\epsilon}{\ln(b/a)}$	$\frac{\pi\epsilon}{\ln \left[(D/d) + \sqrt{(D/d)^2 - 1} \right]}$	$\frac{\epsilon w}{h}$	F/m

Notes:

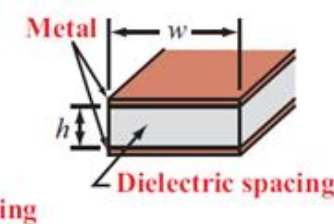
(1) $R_s = \sqrt{\pi f \mu_c / \sigma_c}$. (2) μ , ϵ , and σ pertain to the insulating material between the conductors. (3) $R_s = \sqrt{\pi f \mu_c / \sigma_c}$. (4) μ_c and σ_c pertain to the conductors. (5) If $(D/d)^2 \gg 1$, then $\ln \left[(D/d) + \sqrt{(D/d)^2 - 1} \right] \simeq \ln(2D/d)$.



(a) Coaxial line



(b) Two-wire line

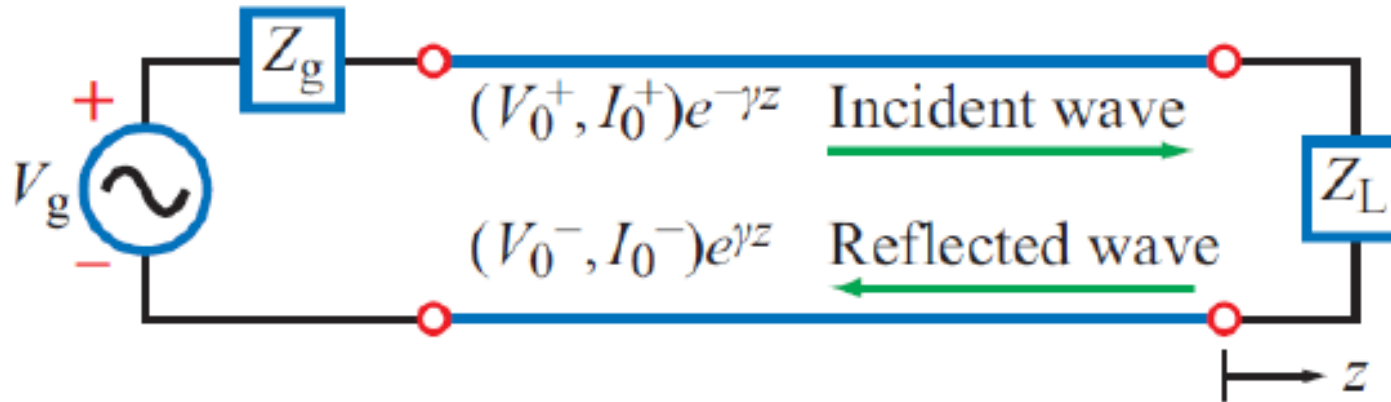


(c) Parallel-plate line

Modelo línea de transmisión

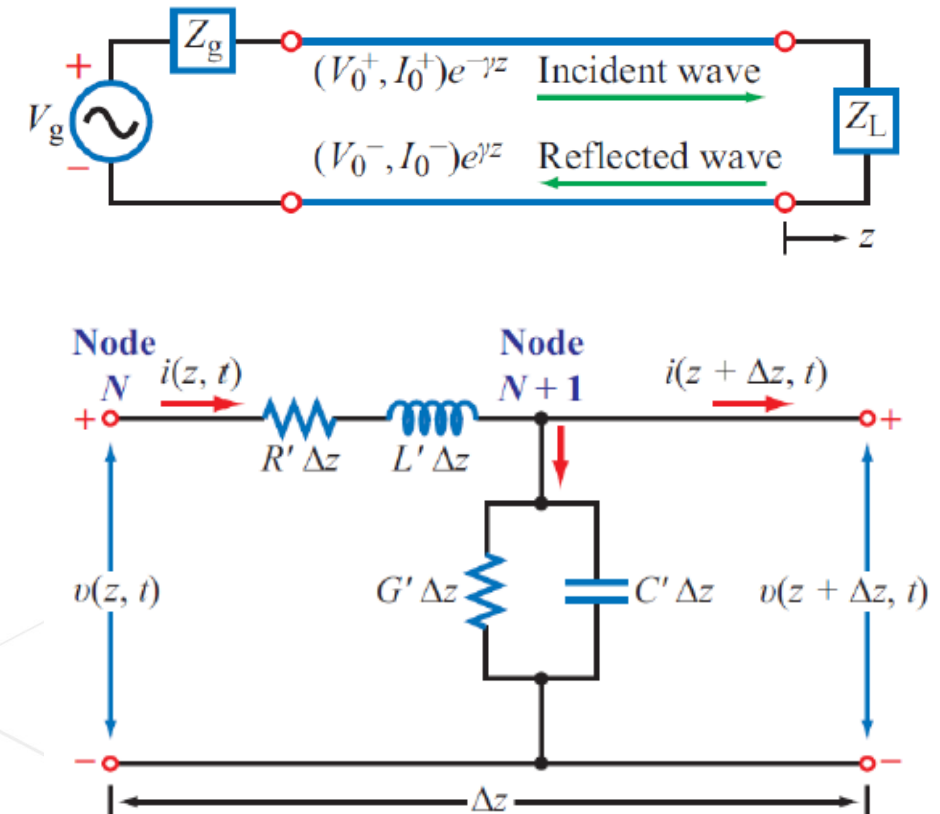
- Si se aplica un voltaje alterno a lo largo de la línea infinita de dos alambres, fluirá en la línea una corriente alterna.
- La corriente y el voltaje se relacionan a través de la ley de Ohm:

$$V = I * Z$$



Modelo línea de transmisión

- Resistencia R en serie por unidad de longitud en $[\Omega/m]$.
- Inductancia L en serie por unidad de longitud en $[H/m]$.
- Capacitancia C en paralelo por unidad de longitud en $[F/m]$.
- Conductancia G en paralelo por unidad de longitud en $[S/m]$.



Modelo línea de transmisión

- Ecuaciones de Voltaje:

$$v(z, t) = R' \Delta z i(z, t) + L' \Delta z \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} + v(z + \Delta z, t)$$

$$-\left[\frac{v(z + \Delta z, t) - v(z, t)}{\Delta z} \right] = R' i(z, t) + L' \frac{\partial i(z, t)}{\partial t}$$

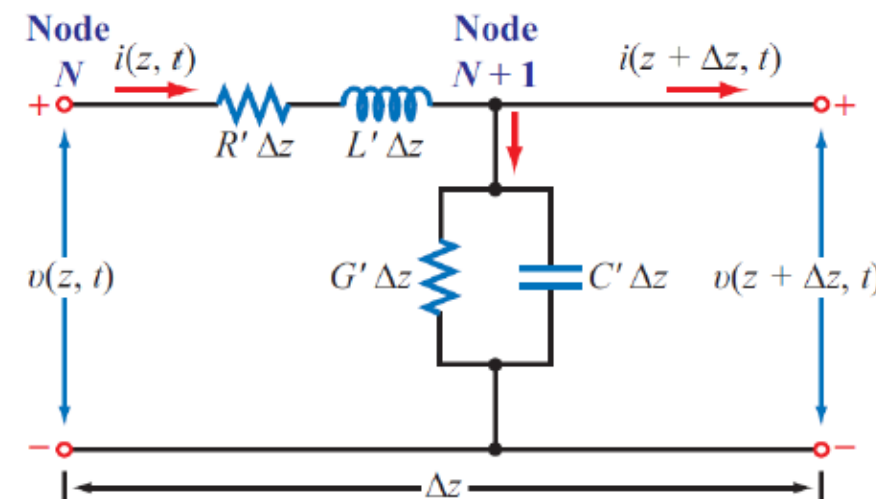
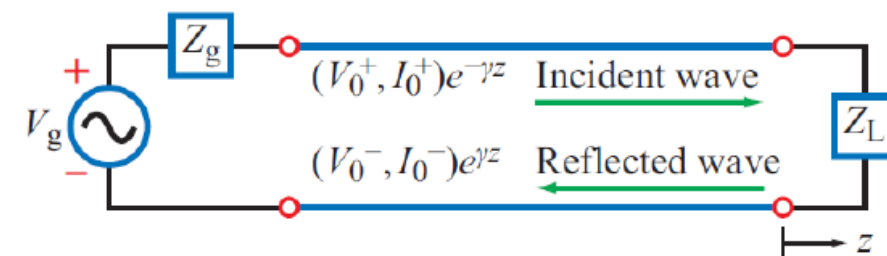
$$\Delta z \rightarrow 0 \Rightarrow -\frac{\partial v(z, t)}{\partial z} = R' i(z, t) + L' \frac{\partial i(z, t)}{\partial t}$$

- Ecuaciones de Corriente:

$$i(z, t) - G' \Delta z v(z + \Delta z, t) - C' \Delta z \frac{\partial v(z + \Delta z, t)}{\partial t} - i(z + \Delta z, t) = 0$$

$$-\left[\frac{i(z + \Delta z, t) - i(z, t)}{\Delta z} \right] = G' v(z + \Delta z, t) + C' \frac{\partial v(z + \Delta z, t)}{\partial t}$$

$$\Delta z \rightarrow 0 \Rightarrow -\frac{\partial i(z, t)}{\partial z} = G' v(z + \Delta z, t) + C' \frac{\partial v(z + \Delta z, t)}{\partial t}$$



Modelo línea de transmisión

- Escribiendo las ecuaciones en fasores:

$$-\frac{dV(z)}{dz} = (R' + j\omega L')I(z)$$

$$-\frac{dI(z)}{dz} = (G' + j\omega C')V(z)$$

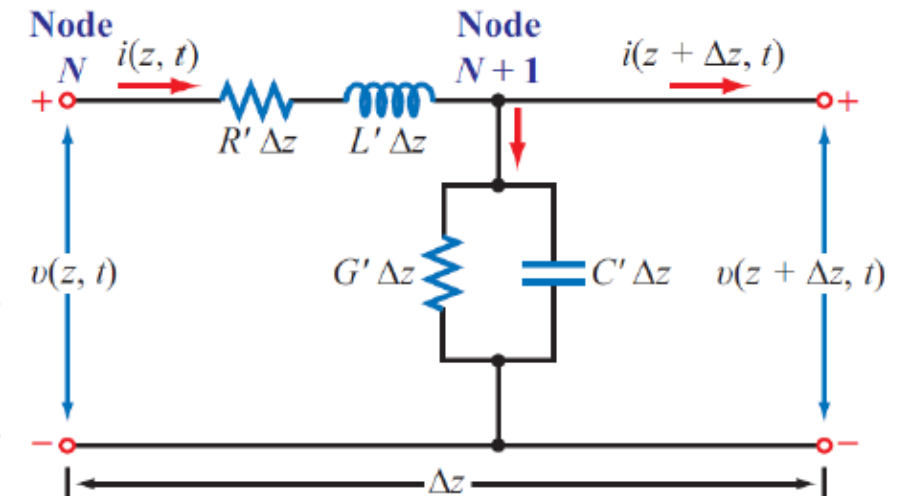
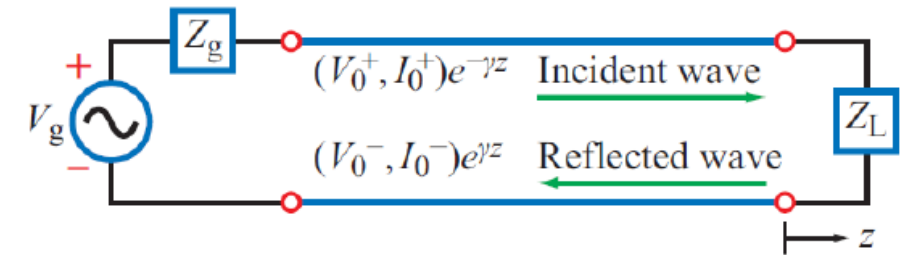
- Juntando las ecuaciones se obtiene:

$$\frac{d^2V(z)}{dz^2} - \underbrace{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')}_{\gamma^2} V(z) = 0$$

- Luego, la solución del sistema es:

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

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



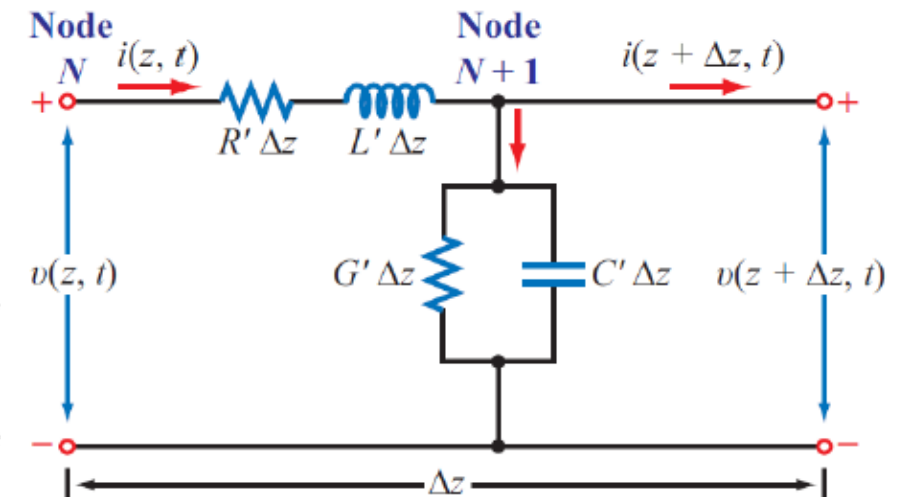
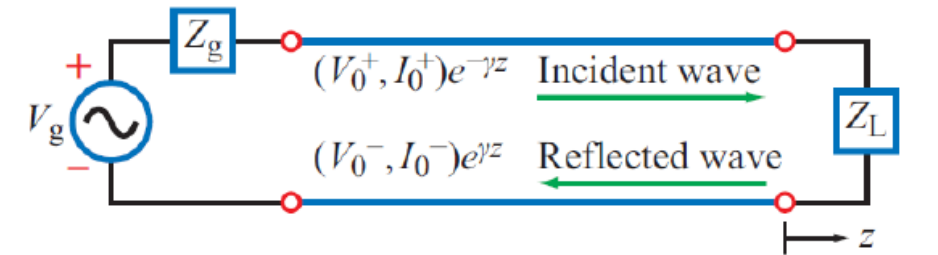
Modelo línea de transmisión

- De aquí se obtiene la impedancia de la línea como:

$$Z_0 = \frac{V_0^+}{I_0^+} = -\frac{V_0^-}{I_0^-}$$

- Reemplazando:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$$



Modelo línea de transmisión

Impedancia característica: $Z_0 = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}$

Buen aislante (no hay pérdidas): $R \ll \omega L$ y $G \ll \omega C \rightarrow Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} [\Omega]$

No depende de la frecuencia, solo de L y C distribuidas y C depende de la permitividad del dieléctrico.

En líneas sin pérdidas y de baja frecuencia: L, C son calculados a partir de las dimensiones del cable.

En líneas coaxiales (alta frecuencias ($>10\text{MHz}$)), L, C son calculados a partir de las dimensiones del cable y de la constante dieléctrica ε

Reflexión de las Ondas – Línea Infinita

Línea Infinita: No hay reflexión.

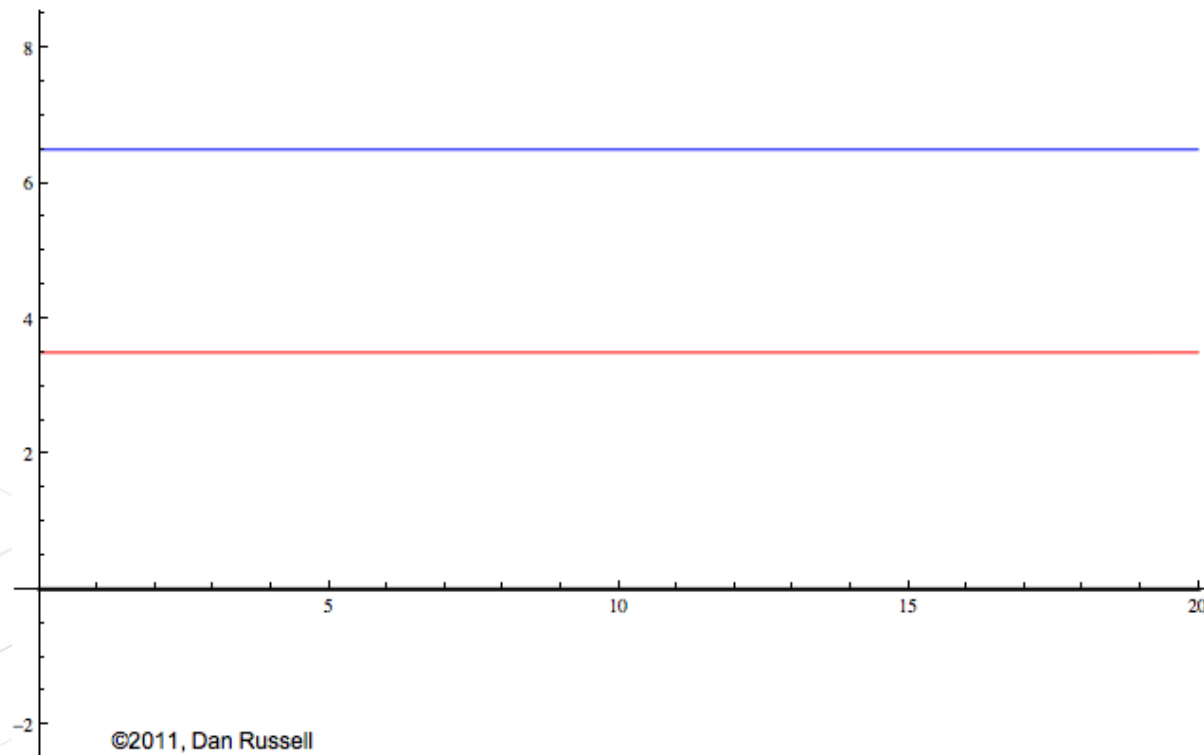


©2011, Dan Russell

Reflexión de las Ondas – Línea con Carga



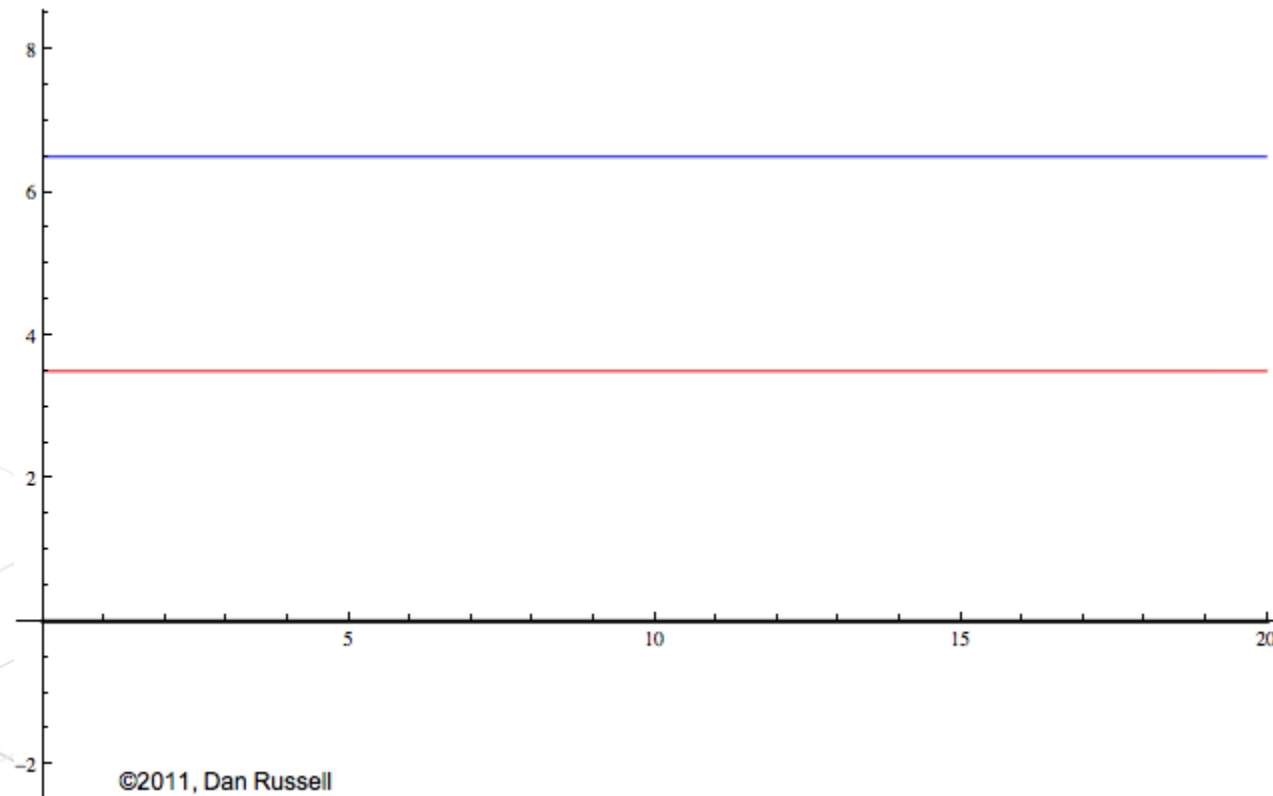
Diferencia de impedancias entre carga, línea y generador: La línea no es infinita y hay ondas reflejadas que provoca interferencias, pérdida de información y de potencia.



Reflexión de las Ondas – Línea con Carga

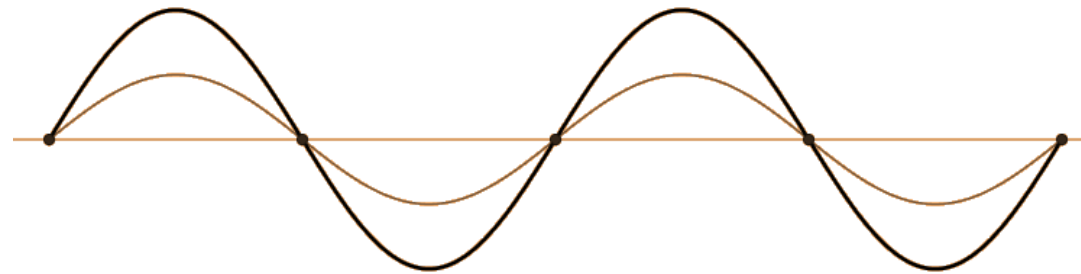


Cuando dos ondas de igual amplitud, longitud y velocidad se propagan en sentido contrario, se forman ondas estacionarias.



Ondas estacionarias

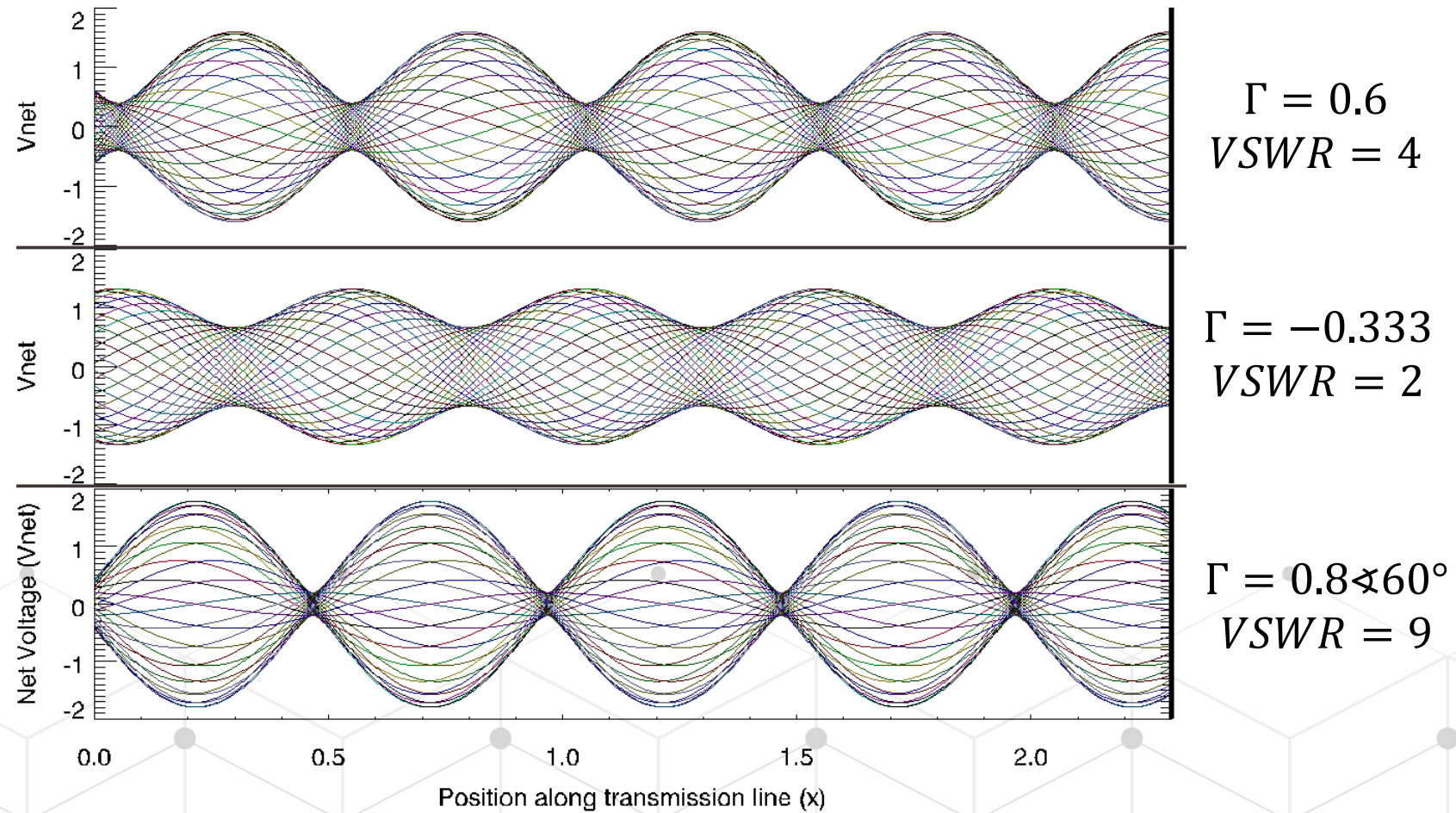
- Para tensiones o corrientes sinusoidales, existe un “continuo” de ondas emitidas y reflejadas.
- Son interferencia entre las ondas incidentes y reflejadas. Si $\Gamma = 0$, no hay ondas estacionarias
- Se pueden producir ondas estacionarias en caso que no exista un acoplamiento de impedancias.



- Las ondas estacionarias tienen un máximo y un mínimo, que definen la razón de onda estacionaria como: $VSWR = V_{max}/V_{min}$
- El coeficiente de reflexión se calcula: $\Gamma = \frac{VSWR-1}{VSWR+1}$

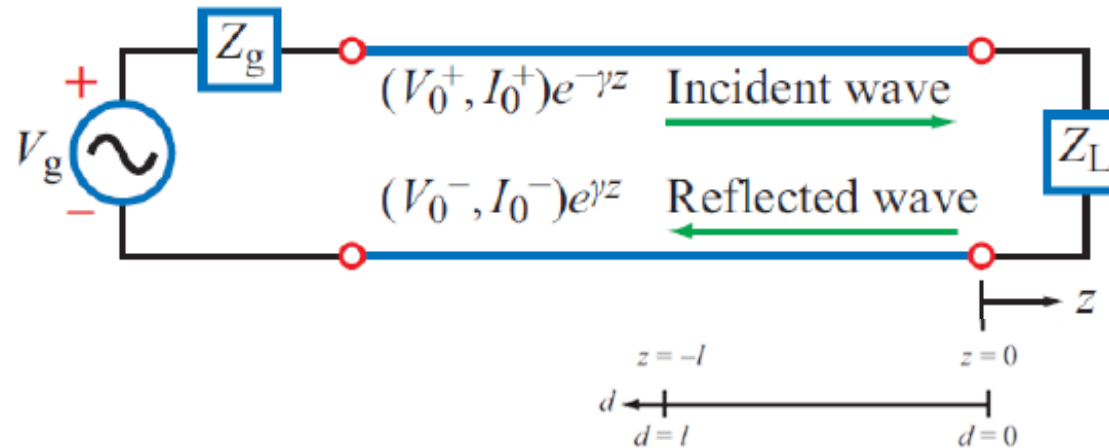
Ondas Estacionarias

- Ejemplo:



Ondas Estacionarias – Coeficiente de Reflexión

- Línea o cable monofásico sin pérdidas que conecta una batería de impedancia interna resistiva R_s a una resistencia de carga R_L .



El voltaje y la corriente vienen dados por:

$$V(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z}$$
$$I(z) = I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{\gamma z}$$

Ondas Estacionarias – Coeficiente de Reflexión

- En la posición de la carga, $z = 0$, se cumple que:

$$V_L = V(z = 0) = V_0^+ + V_0^-$$

$$I_L = I(z = 0) = \frac{V_0^+}{Z_0} - \frac{V_0^-}{Z_0}$$

- Además, en la carga se tiene que:

$$Z_L = \frac{V_L}{I_L}$$

- Reemplazando, se llega a:

$$Z_L = \left(\frac{V_0^+ + V_0^-}{V_0^+ - V_0^-} \right) Z_0$$

- El coeficiente de reflexión en la carga: $\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$

Mientras menor es el coeficiente, mejores son los resultados

Ondas Estacionarias – Coeficiente de Reflexión

Carga	$ \Gamma $	Fase
$Z_L = (r + jx)Z_0$	$\sqrt{\frac{(r-1)^2 + x^2}{(r+1)^2 + x^2}}$	$\tan^{-1}\left(\frac{x}{r-1}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x}{r+1}\right)$
$Z_L = Z_0$	0	No influye
Corto circuito	1	$\pm 180^\circ$
Circuito Abierto	1	0° (en fase)
$Z_L = j\omega L$	1	$\pm 180^\circ - 2 \tan^{-1} x$
$Z_L = -\frac{j}{\omega C}$	1	$\pm 180^\circ + 2 \tan^{-1} x$

EL 3003

Laboratorio de Ingeniería Eléctrica

Clase 4

Modulación y Línea de Transmisión

Profesor: Dr. Carlos Navarro C.
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile

Basado en las clases de la profesora
Dra. Constanza Ahumada.