



Tema 2. Análisis modal de guías de ondas. Líneas de Transmisión.

Transmisión por Soporte Físico
Curso 2011-2012

Francisco Javier García Ruiz
Noel Rodríguez Santiago



1. Leyes de Maxwell
2. Análisis modal en ondas guiadas
3. Guías rectangulares
4. Líneas stripline y microstrip

PARTE I

5. Ecuaciones del Telegrafista
6. Líneas de transmisión sin pérdidas
7. Carta de Smith
8. Desadaptación en el generador
9. Líneas de transmisión con pérdidas

PARTE II



2. Análisis modal en ondas guiadas

2.1. Introducción

2.2. Solución general y concepto de modo

2.3. Modos TEM

2.4. Modos TE

2.5. Modos TM

2.6. Pérdidas en el dieléctrico

2.7. Ejemplo de estudio: guías de placas paralelas



2. Análisis modal en guías de ondas: [Introducción](#)

- Transporte de energía electromagnética sin pérdidas por radiación.
 - Estructuras rectilíneas que permiten el guiado de ondas.
 - Preferiblemente que permitan simplificar el análisis de su funcionamiento.

- *Guías de ondas sujetas a un substrato: aplicaciones complejas.*
 - *Stripline, microstrip*
 - *Mayores pérdidas*



2. Análisis modal en guías de ondas: [Introducción](#)

■ Línea bifilar

- ☞ Dos conductores separados por una distancia (d) de dieléctrico
- ☞ No apantallado: Uso solo para baja frecuencia (cables de antena)





■ Cables coaxiales

👍 Apantallados

👉 Interconexión de equipos de RF, generadores, antenas...

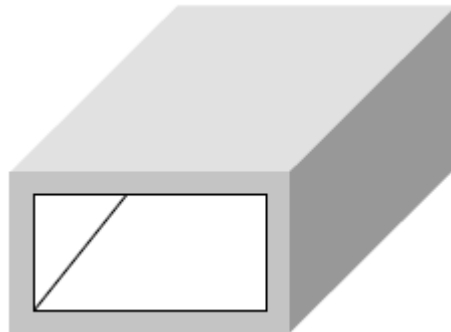
👎 Altas pérdidas si el cable es largo





■ Guía rectangular y circular

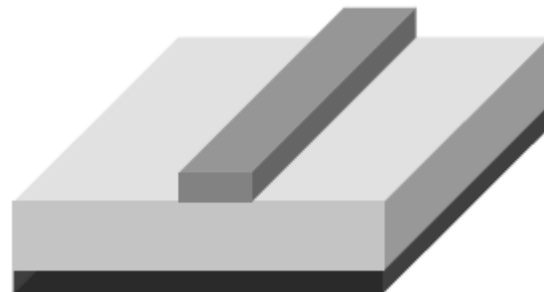
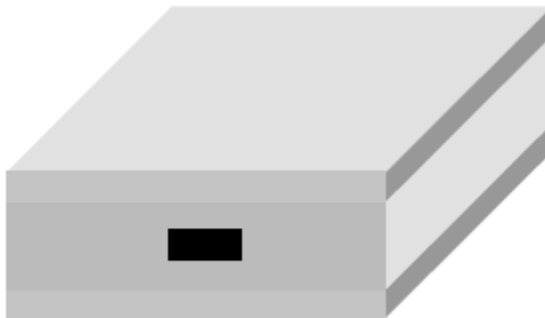
- 👍 Apantalladas
- 👍 No necesitan dieléctrico de relleno (menos pérdidas)
- 👉 Resonadores de cavidad, atenuadores y desfasadores, circuladores, aisladores, desfasadores.
- 👎 Funcionamiento complejo. No flexibilidad.





■ Stripline

- 👉 Evolución del cable coaxial
- 👍 Apantalladas
- 👍 Permite tecnología planar → viable PCBs.
- 👍 Versátil y barata (rutado rígido pero simple).
- 👎 No totalmente compatible con ICs.

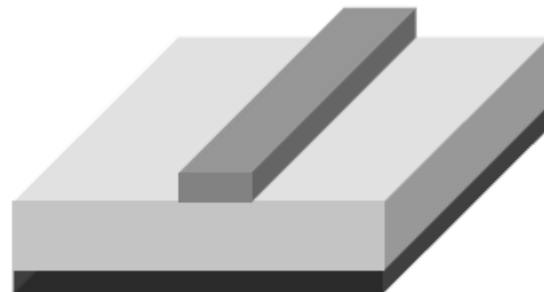
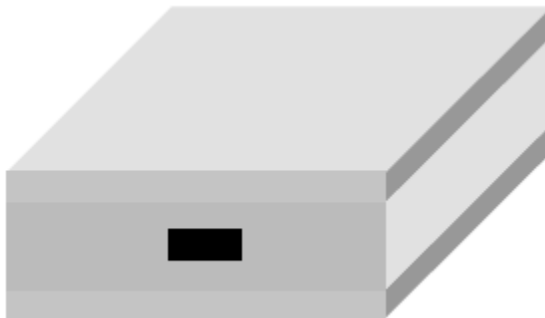




2. Análisis modal en guías de ondas: [Introducción](#)

■ Microstrip

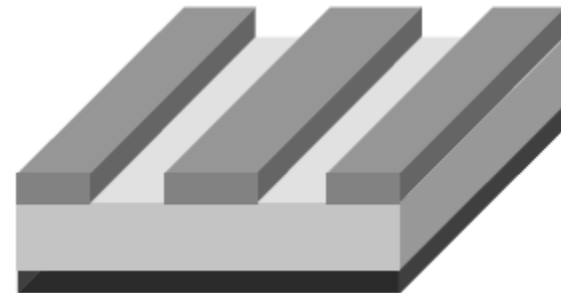
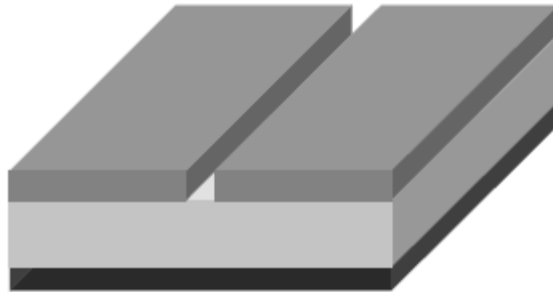
- 👉 Evolución del stripline
- 👍 Gran versatilidad → miniaturización
- 👍 Rutado rígido pero muy simple
- 👎 ¿? No apantallada (aunque puede estarlo si se rodea de metal).
- 👎 ¿? Pérdidas por radiación (microstrip) → dieléctricos de alta permitividad.
- 👎 Conexión a tierra compleja (via-hole)





■ Líneas de Ranura y Coplanar

- 👍 Comparte ventajas de microstrip
- 👍 Conexión directa con el plano de masa sin necesidad de perforar.

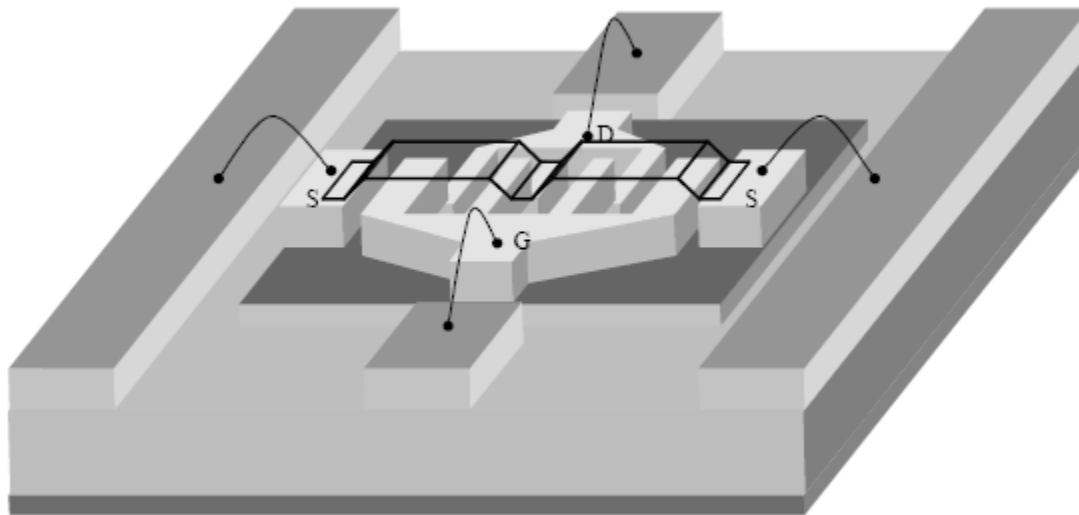




2. Análisis modal en guías de ondas: [Introducción](#)

■ Líneas de Ranura y Coplanar

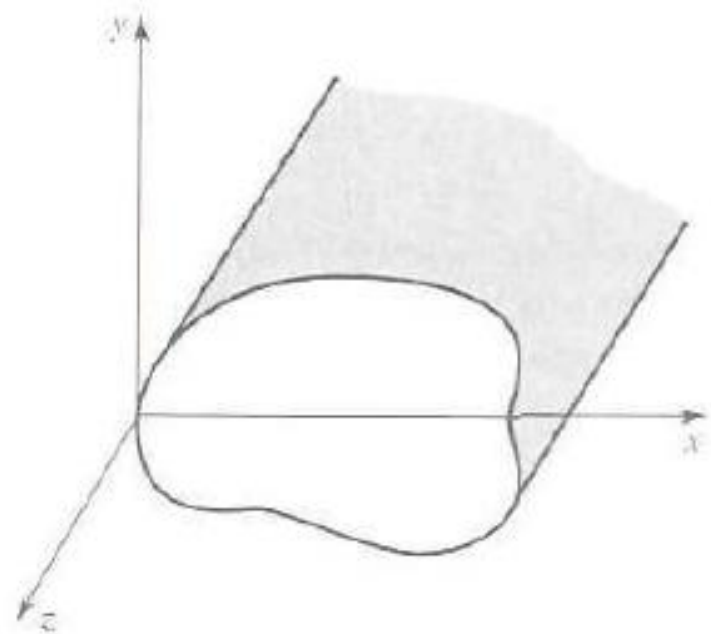
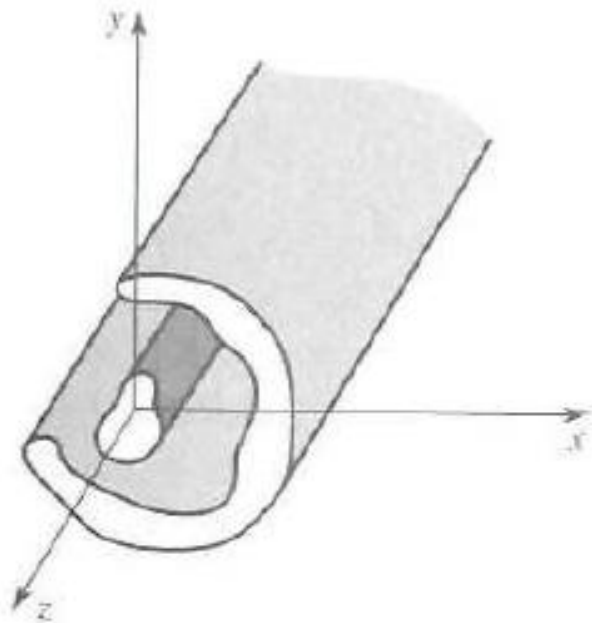
- 👍 Comparte ventajas de microstrip
- 👍 Conexión directa con el plano de masa sin necesidad de perforar.





2. Análisis modal en guías de ondas: Solución general. Modos.

- Ecuaciones de Maxwell para guías de ondas cilíndricas. Propagación en la dirección z .





2. Análisis modal en guías de ondas: [Solución general. Modos.](#)

Suponemos un medio libre de fuentes, y un campo armónico ($e^{j\omega t}$):

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E} &= -j\omega\mu\vec{H} \\ \nabla \times \vec{H} &= j\omega\varepsilon\vec{E}\end{aligned}$$

Se denomina '**modo**' a cualquier solución de las ecuaciones anteriores que suponga una propagación de ondas. Asumiremos dirección de propagación es z , y β es la constante de propagación:

$$\begin{aligned}\vec{E}(x, y, z) &= (\vec{e}_T(x, y) + \hat{z}e_z(x, y)) e^{-j\beta z} \\ \vec{H}(x, y, z) &= (\vec{h}_T(x, y) + \hat{z}h_z(x, y)) e^{-j\beta z}\end{aligned}$$

Si el dieléctrico tiene pérdidas: $j\beta \rightarrow \gamma = \alpha + j\beta$



2. Análisis modal en guías de ondas: [Solución general. Modos.](#)

- Igualando cada componente de la ecuación rotacional:

$$\begin{aligned}\frac{\partial E_z}{\partial y} + j\beta E_y &= -j\omega\mu H_x & \frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta H_y &= j\omega\varepsilon E_x \\ -j\beta E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} &= -j\omega\mu H_y & -j\beta H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} &= j\omega\varepsilon E_y \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} &= -j\omega\mu H_z & \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} &= j\omega\varepsilon E_z\end{aligned}$$

- Resolviendo para las cuatro componentes transversales:

$$\begin{aligned}H_x &= \frac{j}{k_c^2} \left(\omega\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} - \beta \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) & E_x &= \frac{-j}{k_c^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial x} + \omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \\ H_y &= \frac{-j}{k_c^2} \left(\omega\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} + \beta \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) & E_y &= \frac{j}{k_c^2} \left(-\beta \frac{\partial E_z}{\partial y} + \omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right)\end{aligned}$$



2. Análisis modal en guías de ondas: Solución general. Modos.

- En la ecuación anterior, k_c es el número de ondas de corte, definido como:

$$k_c^2 = k^2 - \beta^2$$

con $k = \omega/c = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} = 2\pi/\lambda$

- A continuación estudiaremos los tres posibles tipos de modos:
 - TEM → Transversal Electro-Magnético
 - TE → Transversal Eléctrico
 - TM → Transversal Magnético



2. Análisis modal en guías de ondas: **Modos TEM**

■ **Modos TEM:**

Campo eléctrico y magnético transversal: $E_z = H_z = 0$

$$\begin{aligned} H_x &= \frac{j}{k_c^2} \left(\omega \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} - \beta \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) & E_x &= \frac{-j}{k_c^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial x} + \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \\ H_y &= \frac{-j}{k_c^2} \left(\omega \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} + \beta \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) & E_y &= \frac{j}{k_c^2} \left(-\beta \frac{\partial E_z}{\partial y} + \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \end{aligned}$$

- Tiene que ser: $k_c^2 = 0$ para que $E_x E_y H_x H_y$ **no** sean cero.

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \varepsilon} = k$$

- Se tiene que cumplir la ecuación de Helmholtz, por ejemplo para E_x :

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) E_x = 0$$



2. Análisis modal en guías de ondas: Modos TEM

Como la dependencia del campo eléctrico con z es $e^{-j\beta z}$,

$$(\partial^2/\partial z^2) E_x = -\beta^2 E_x = -k^2 E_x$$

con lo que la ecuación de Helmholtz se reduce a:

$$\nabla_t^2 \vec{e}_T(x, y) = 0$$

siendo $\nabla_t = \hat{x}\partial/\partial x + \hat{y}\partial/\partial y$ y $\nabla_t^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$

La ecuación del campo magnético también satisface la ecuación de Laplace:

$$\nabla_t^2 \vec{h}_T(x, y) = 0$$



2. Análisis modal en guías de ondas: Modos TEM

- El campo eléctrico puede derivarse de un potencial.

$$\vec{e}_T(x, y) = -\nabla_t \Phi(x, y)$$

- Para que lo anterior sea cierto el campo debe ser irrotacional

$$\nabla_t \times \vec{e}_T(x, y) = 0$$

- Se satisface la ecuación de Laplace para el potencial.

$$\nabla_t^2 \vec{\Phi}(x, y) = 0$$



2. Análisis modal en guías de ondas: Modos TEM

- Como consecuencia se puede definir la diferencia de potencial:

$$V_{12} = \Phi_1 - \Phi_2 = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

- El flujo de corriente se encuentra a través de la ley de Ampere.

$$I = \oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l}$$

- La impedancia característica (relaciona tensiones y corrientes) :

$$Z_0 = \frac{V}{I}$$

- La impedancia de onda (relaciona campos)

$$Z_{\text{TEM}} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{-E_y}{H_x} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \eta$$



2. Análisis modal en guías de ondas: Modos TEM

Pasos para analizar el modo TEM

1. Resolver la ecuación de Laplace: $\nabla_t^2 \Phi(x, y) = 0$

2. Calcular \mathbf{e} y \mathbf{E} :
 $\vec{e}_T(x, y) = -\nabla_t \Phi(x, y)$
 $\vec{E}(x, y, z) = \vec{e}_T(x, y)e^{-j\beta z}$

3. Calcular \mathbf{h} y \mathbf{H} :
 $\vec{h}(x, y) = \frac{1}{Z_{\text{TEM}}} \hat{z} \times \vec{e}(x, y)$
 $\vec{H}(x, y, z) = \vec{h}_T(x, y)e^{-j\beta z}$

4. Calcular V e I

5. La **constante de propagación** y la **impedancia característica** vienen dadas por:

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \qquad Z_0 = \frac{V}{I}$$



2. Análisis modal en guías de ondas: **Modos TE**

■ **Modos TE:**

Campo eléctrico transversal ($E_z=0$) y magnético no transversal: $H_z \neq 0$

$$\begin{aligned} H_x &= \frac{j}{k_c^2} \left(\omega \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} - \beta \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) & E_x &= \frac{-j}{k_c^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial x} + \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \\ H_y &= \frac{-j}{k_c^2} \left(\omega \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} + \beta \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) & E_y &= \frac{j}{k_c^2} \left(-\beta \frac{\partial E_z}{\partial y} + \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \end{aligned}$$

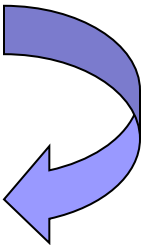
■ Las ecuaciones generales se reducen a:

$$\begin{aligned} H_x &= -\frac{j\beta}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} & E_x &= -\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \\ H_y &= -\frac{j\beta}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} & E_y &= \frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \end{aligned}$$



2. Análisis modal en guías de ondas: **Modos TE**

- Resolvemos la ecuación de onda de Helmholtz para H_z

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) H_z = 0$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_c^2 \right) h_z = 0$$
$$H_z(x, y, z) = h_z(x, y)e^{-j\beta z}$$
$$k_c^2 = k^2 - \beta^2$$

- Impedancia de onda (en este caso depende de la frecuencia)

$$Z_{\text{TE}} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{-E_y}{H_x} = \frac{\omega\mu}{\beta} = \frac{k\eta}{\beta}$$



2. Análisis modal en guías de ondas: **Modos TM**

■ **Modos TM:**

Campo magnético transversal ($H_z=0$) y eléctrico no transversal: $E_z \neq 0$

$$\begin{aligned} H_x &= \frac{j}{k_c^2} \left(\omega \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} - \beta \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) & E_x &= \frac{-j}{k_c^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial x} + \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \\ H_y &= \frac{-j}{k_c^2} \left(\omega \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} + \beta \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) & E_y &= \frac{j}{k_c^2} \left(-\beta \frac{\partial E_z}{\partial y} + \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \end{aligned}$$

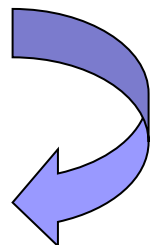
■ Las ecuaciones generales se reducen a:

$$\begin{aligned} H_x &= \frac{j\omega\varepsilon}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} & E_x &= -\frac{j\beta}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \\ H_y &= -\frac{j\omega\varepsilon}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} & E_y &= -\frac{j\beta}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} \end{aligned}$$



2. Análisis modal en guías de ondas: **Modos TE**

- Resolvemos la ecuación de onda de Helmholtz para e_z (nuevamente, la dependencia con 'z' da lugar a la aparición de k_c)

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) E_z = 0$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_c^2 \right) e_z = 0$$

- Impedancia de onda (en este caso depende de la frecuencia)

$$Z_{TM} = \frac{E_x}{H_y} = -\frac{E_y}{H_x} = \frac{\beta}{\omega\epsilon} = \frac{\beta\eta}{k}$$



2. Análisis modal en guías de ondas: Pérdidas en el dieléctrico

- Pérdidas en el dieléctrico (homogéneo)
- Usando la constante dieléctrica compleja la constante de propagación puede escribirse:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r (1 - j \tan \delta)$$

$$\gamma = \alpha_d + j\beta = \sqrt{k_c^2 - k^2} = \sqrt{k_c^2 - \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r (1 - j \tan \delta)}$$

- Para la mayoría de los materiales:

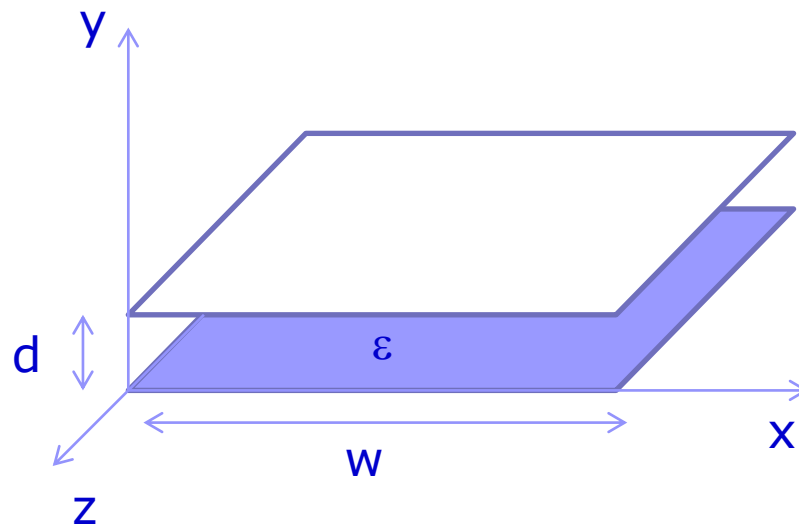
$$\tan \delta \ll 1 \quad \longrightarrow \quad \gamma = \frac{k^2 \tan \delta}{2\beta} + j\beta$$

- Modos TE y TM: $\alpha_d = \frac{k^2 \tan \delta}{2\beta} \text{ (Np/m)}$
- Modo TEM: $\alpha_d = \frac{k \tan \delta}{2} \text{ (Np/m)}$



2. Análisis modal en guías de ondas: [Guía de placas paralelas](#)

- Ejemplo de diseño: **guía de placas paralelas**
- Útil como punto de partida para guía rectangular y para líneas stripline y microstrip
- Puede soportar TEM, TE, TM
- $w \gg d$

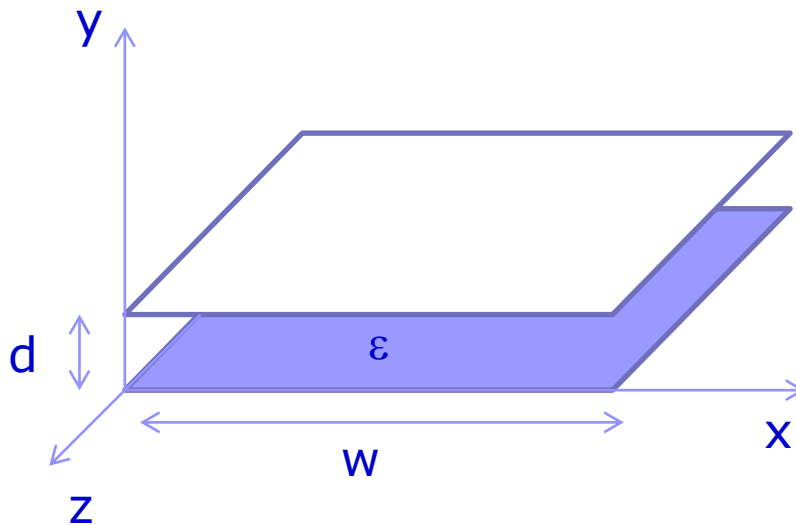




2. Análisis modal en guías de ondas: Guía de placas paralelas

- Modos **TEM** → Solución de la ecuación de Laplace

$$\nabla_t^2 \Phi(x, y) = 0 \quad \left\{ \begin{array}{ll} 0 \leq x \leq w & \Phi(x, 0) = 0 \\ 0 \leq y \leq d & \Phi(x, d) = V_0 \end{array} \right.$$



La solución es:

$$\Phi(x, y) = A + By$$

Aplicando las condiciones de frontera:

$$\Phi(x, y) = V_0 \frac{y}{d}$$



2. Análisis modal en guías de ondas: Guía de placas paralelas

Modos **TEM**

- Campo eléctrico transversal:

$$\vec{e}(x, y) = -\nabla_t \Phi(x, y) = -\hat{y} \frac{V_0}{d}$$

- Teniendo en cuenta la variación con 'z':

$$\vec{E}(x, y, z) = -\hat{y} \frac{V_0}{d} e^{-jkz}$$

- Y el campo magnético se calcula a partir del eléctrico como:

$$\vec{H}(x, y, z) = \frac{1}{\eta} \hat{z} \times \vec{E}(x, y, z) = \hat{x} \frac{V_0}{\eta d} e^{-jkz}$$

con $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$



2. Análisis modal en guías de ondas: Guía de placas paralelas

Modos **TEM**

- Caída de potencial:

$$V = - \int_{y=0}^d E_y dy = V_0 e^{-jkz}$$

- Cálculo de la corriente:

$$I = \int_{x=0}^w \vec{J}_s \cdot \hat{z} dx = \int_{x=0}^w \left(-\hat{y} \times \vec{H} \right) \cdot \hat{z} dx = \int_{x=0}^w H_x dx = \frac{wV_0}{\eta d} e^{-jkz}$$

- Por último, cálculo de la impedancia característica:

$$Z_0 = \frac{V}{I} = \frac{\eta d}{w}$$

Solo depende de la geometría
y el material, no de V_0



2. Análisis modal en guías de ondas: Guía de placas paralelas

Modos **TM**

- Modos **TM** → Se caracterizan por $H_z=0$
- Resolvemos la ecuación de Helmholtz, haciendo uso de la geometría del problema ($\partial/\partial x = 0$)

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_c^2 \right) e_z(x, y) = 0$$

con

$$k_c^2 = k^2 - \beta^2$$

- La solución general del problema es:

$$e_z(x, y) = A \sin(k_c y) + B \cos(k_c y)$$

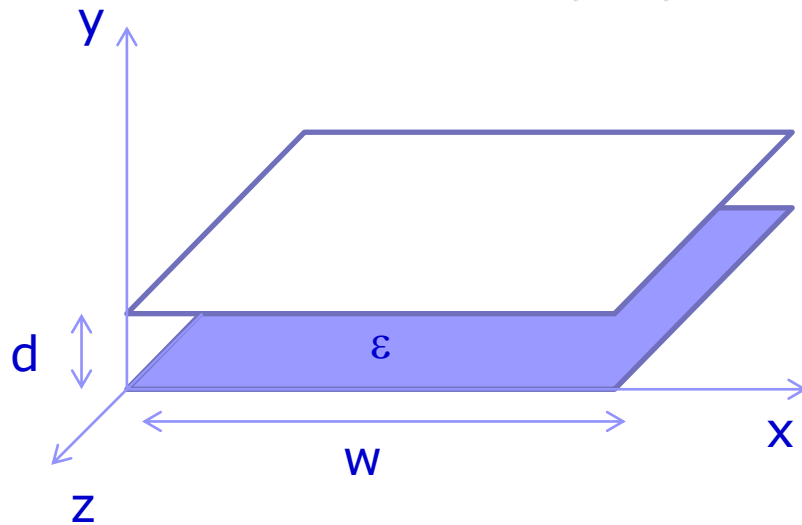


2. Análisis modal en guías de ondas: Guía de placas paralelas

Modos **TM**

- Aplico las condiciones de frontera:

$$e_z(x, y) = 0 \text{ para } y = 0, d$$



$$e_z(x, y) = A \sin(k_c y) + B \cos(k_c y)$$

$$B = 0 \text{ para } k_c d = \frac{n\pi}{d} \quad n=0, 1, 2, 3, \dots$$

$$k_c = \frac{n\pi}{d}$$

- Numero de corte limitado a valores discretos

$$\beta_n = \sqrt{k^2 - k_c^2} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{n\pi}{d}\right)^2} \rightarrow n \text{ indica el orden del modo TM: TM}_n$$



2. Análisis modal en guías de ondas: Guía de placas paralelas

Modos **TM**

- Incluyendo la dependencia con z :

$$E_z(x, y, z) = A_n \sin\left(\frac{n\pi y}{d}\right) e^{-j\beta z}$$

- El resto de componentes

$$H_x = \frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} \longrightarrow H_x = \frac{j\omega\epsilon}{k_c} A_n \cos\left(\frac{n\pi y}{d}\right) e^{-j\beta z}$$

$$E_y = -\frac{j\beta}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} \longrightarrow E_y = \frac{-j\beta}{k_c} A_n \cos\left(\frac{n\pi y}{d}\right) e^{-j\beta z}$$

$$E_x = -\frac{j\beta}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \longrightarrow E_x = 0 \quad H_y = -\frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \longrightarrow H_y = 0$$



2. Análisis modal en guías de ondas: Guía de placas paralelas

Modos **TM**

■ Vector de Poynting

$$P_0 = \frac{1}{2} \Re \left[\int_0^w \int_0^d \vec{E} \times \vec{H}^* \cdot \hat{z} dx dy \right] = \frac{wd\omega\epsilon \Re [\beta_n]}{4k_c^2}$$

Indica que si β_n es real, se transmite potencia. En caso de que β_n sea imaginaria, la potencia $P_0 = 0$

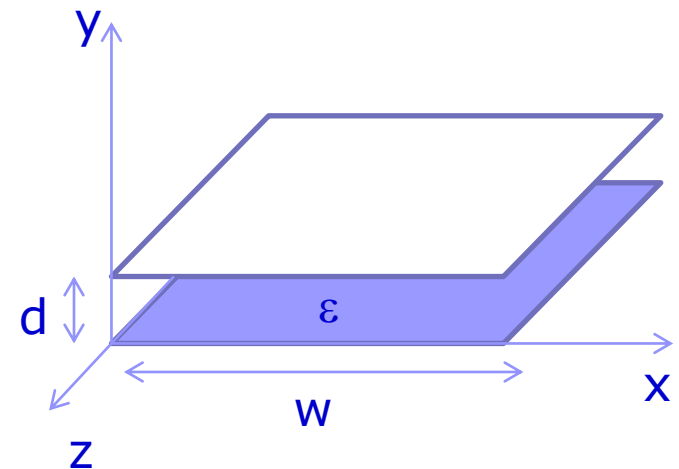
$$\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{n\pi}{d}\right)^2}$$

→ Frecuencia de corte del modo TM_n

$$k > k_c = \frac{n\pi}{d}$$



$$f > f_c = \frac{k_c}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{nc}{2d}$$





2. Análisis modal en guías de ondas: Guía de placas paralelas

Modos **TM**

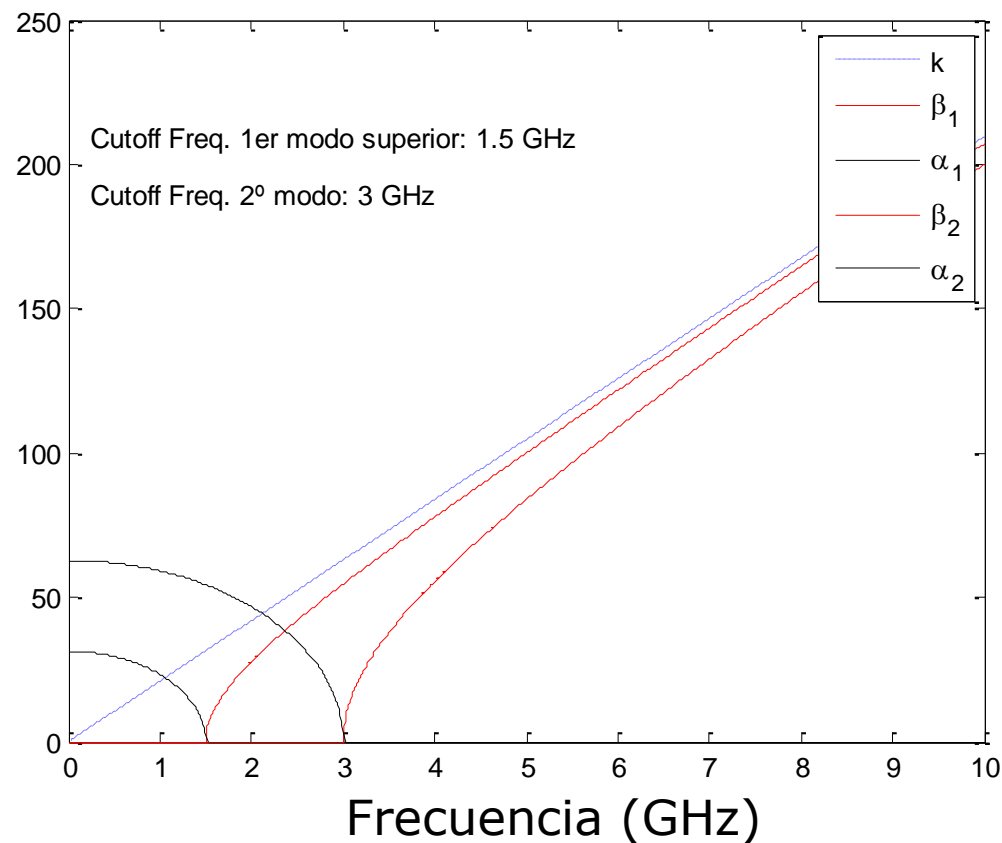
- Frecuencia de corte del modo TM_n :
frecuencia a la que β es real

$$f_c = \frac{k_c}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{n}{2d\sqrt{\mu\epsilon}}$$

- Cuando β imaginaria \rightarrow Pérdidas por corte: α

β (rad/m)

α (Np/m)





2. Análisis modal en guías de ondas: Guía de placas paralelas

Modos **TM**


- La velocidad de fase y la longitud de onda son función de la frecuencia

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} \qquad \lambda_g = \frac{2\pi}{\beta}$$

Además, se observa un hecho curioso: la velocidad de fase puede ser mayor que la velocidad de la luz.

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} \rightarrow v_p = \frac{\omega}{\sqrt{k^2 - k_c^2}} > \frac{\omega}{k} = c$$

$$E_z(x, y, z) = A_n \sin\left(\frac{n\pi y}{d}\right) e^{-j\beta_n z}$$


$$E_z = \frac{A_n}{2j} \left\{ e^{j[n\pi y/d - \beta_n z]} - e^{-j[n\pi y/d + \beta_n z]} \right\}$$

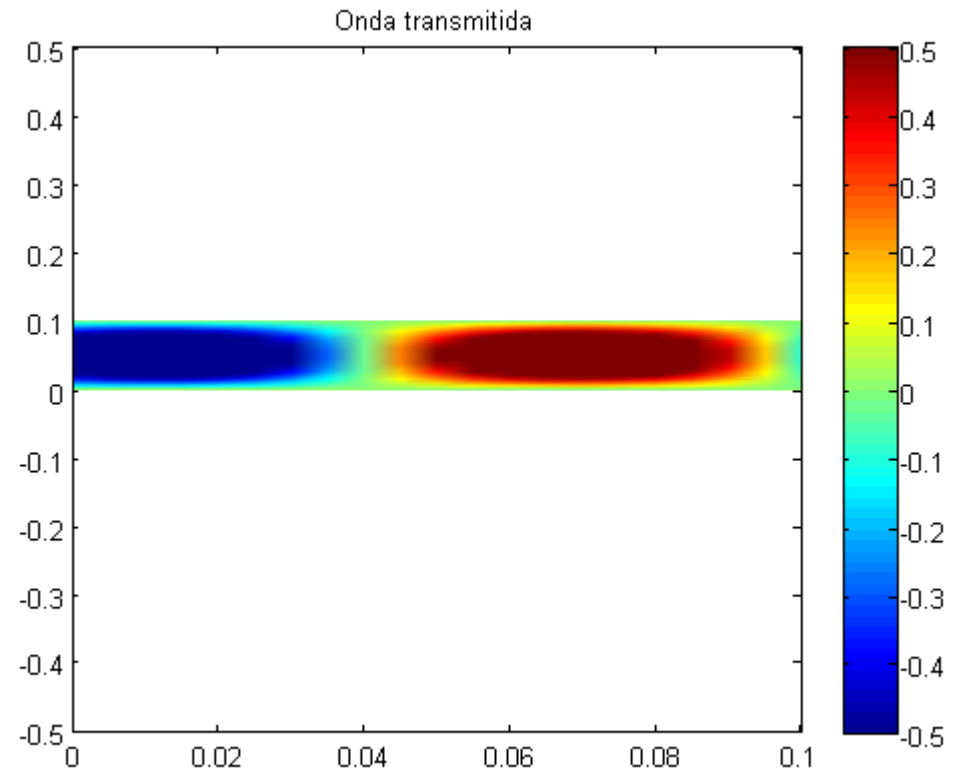
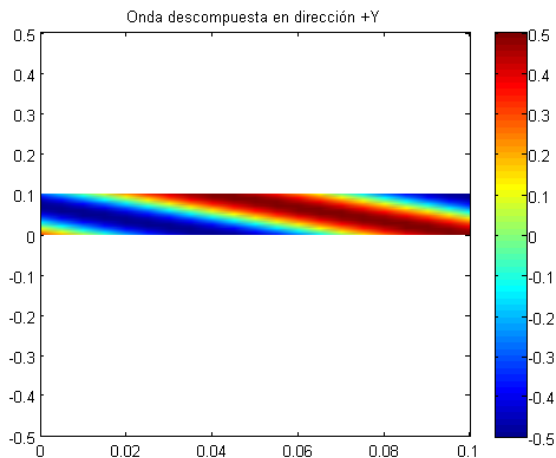
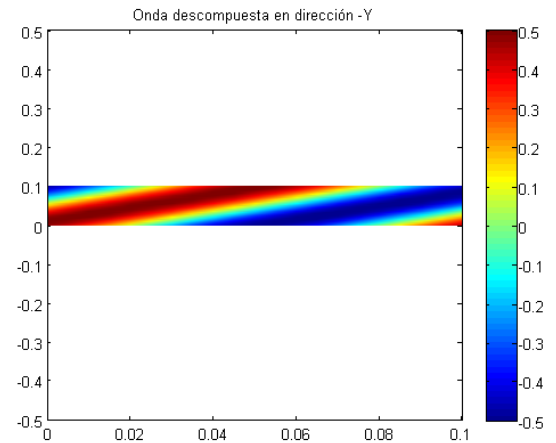
Se trata de dos ondas planas en direcciones oblicuas.



2. Análisis modal en guías de ondas: Guía de placas paralelas

Representación de ondas planas oblicuas (ver Matlab):

Modos **TM**





2. Análisis modal en guías de ondas: Guía de placas paralelas

Modos **TE**

- Modos **TE** → Se caracterizan por $E_z=0$
- Resolvemos la ecuación de Helmholtz, haciendo uso de la geometría del problema ($\partial/\partial x = 0$)

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_c^2 \right) h_z(x, y) = 0$$

con

$$k_c^2 = k^2 - \beta^2$$

- La solución general del problema es:

$$h_z(x, y) = A \sin(k_c y) + B \cos(k_c y)$$



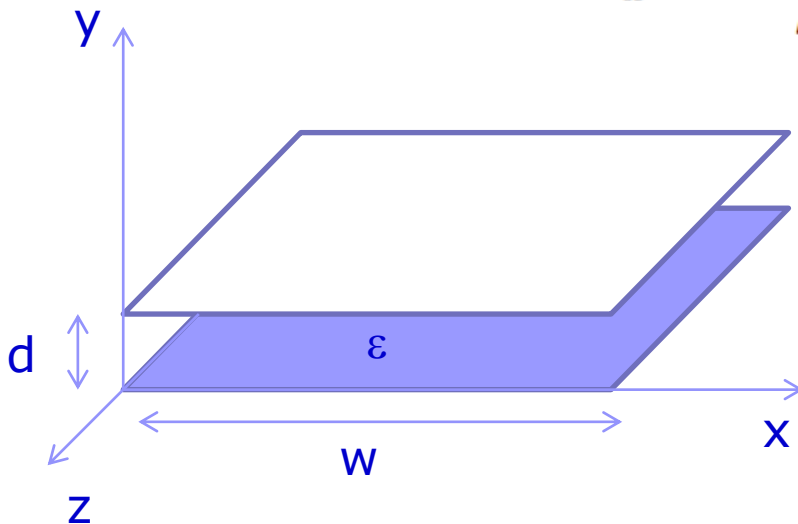
2. Análisis modal en guías de ondas: Guía de placas paralelas

Modos **TE**

- No se pueden aplicar las condiciones de frontera directamente sobre h_z

$$E_x = -\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y}$$

$$E_x = \frac{-j\omega\mu}{k_c} [A \cos(k_c y) - B \sin(k_c y)] e^{-j\beta z}$$



$$\text{para } y = 0, d \quad E_x = 0$$

$$A_n = 0 \quad k_c = \frac{n\pi}{d}$$



2. Análisis modal en guías de ondas: Guía de placas paralelas

Modos **TE**

- Numero de corte limitado a valores discretos (igual que en TM)

$$\beta_n = \sqrt{k^2 - k_c^2} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{n\pi}{d}\right)^2} \rightarrow n \text{ indica el orden del modo TE: TE}_n$$

- Campo magnético longitudinal:

$$H_z(x, y, z) = B_n \cos\left(\frac{n\pi y}{d}\right) e^{-j\beta_n z}$$

- Campos transversales

$$E_x = \frac{j\omega\mu}{k_c} B_n \sin\left(\frac{n\pi y}{d}\right) e^{-j\beta_n z}$$

$$H_y = \frac{j\beta}{k_c} B_n \sin\left(\frac{n\pi y}{d}\right) e^{-j\beta_n z}$$

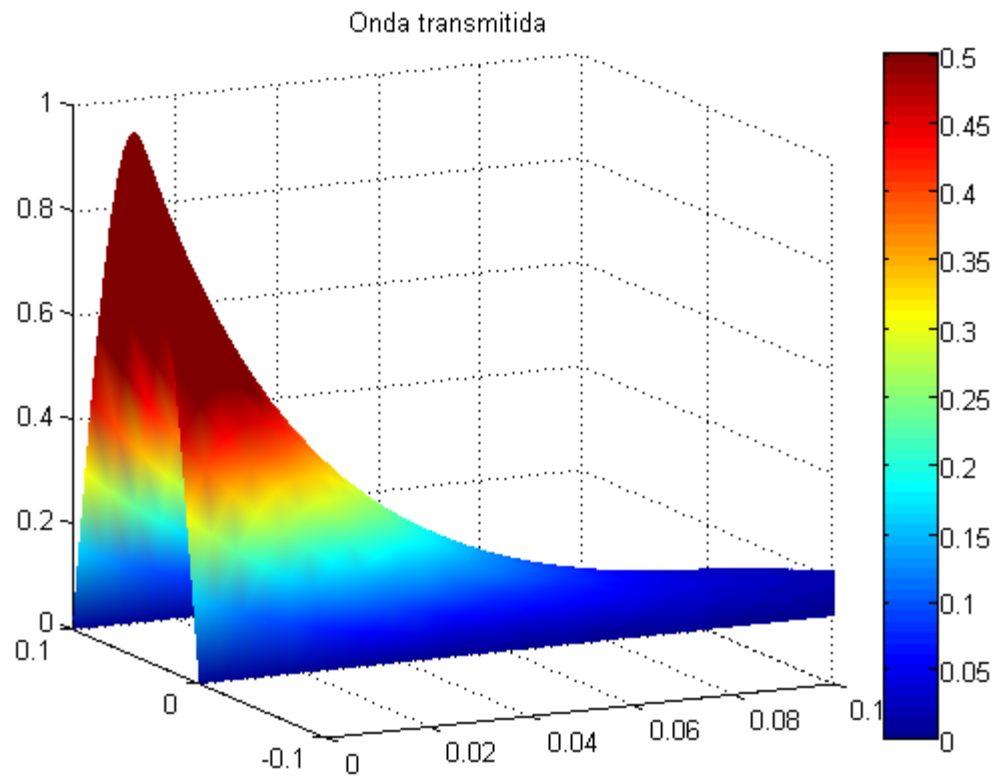
$$E_y = H_x = 0$$



2. Análisis modal en guías de ondas: Guía de placas paralelas

Modos **TE**

- Comportamiento cerca de la frecuencia de corte



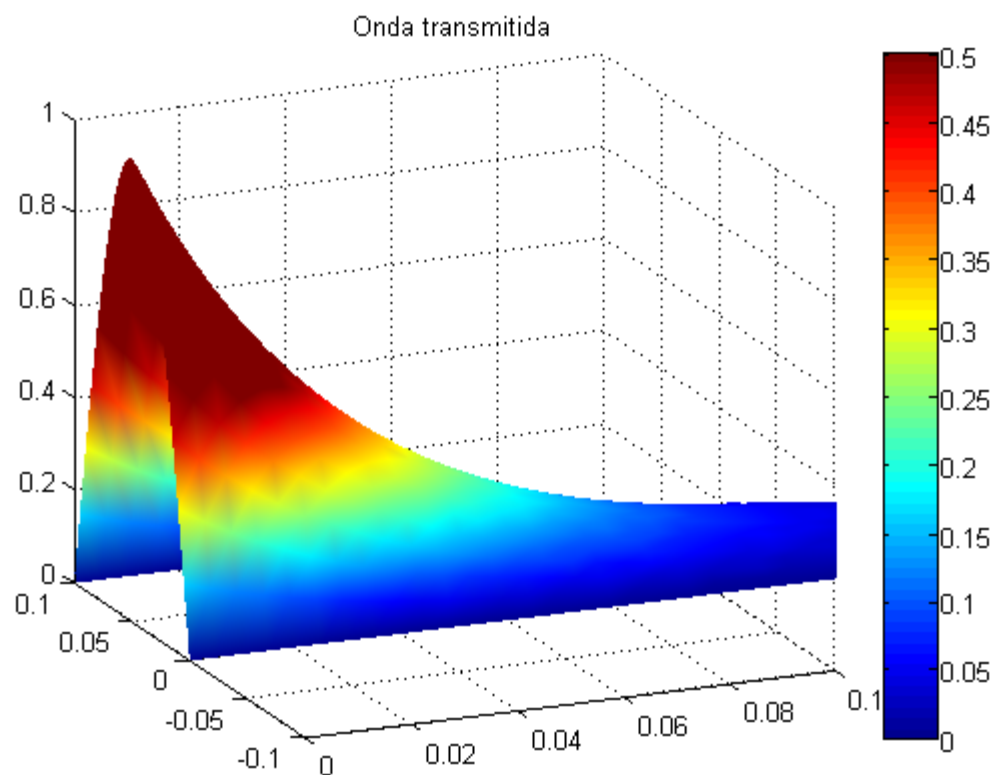
$f = 500 \text{ MHz}$
 $f_c = 1.5 \text{ GHz}$



2. Análisis modal en guías de ondas: Guía de placas paralelas

Modos **TE**

- Comportamiento cerca de la frecuencia de corte



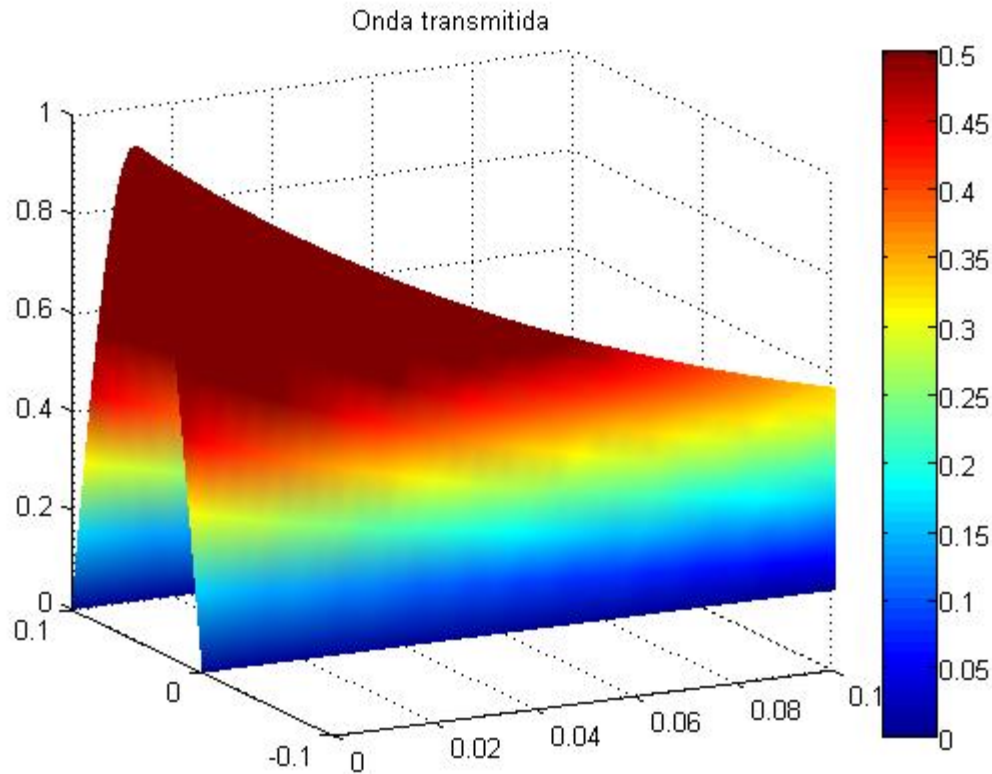
$$f = 1 \text{ GHz}$$
$$f_c = 1.5 \text{ GHz}$$



2. Análisis modal en guías de ondas: Guía de placas paralelas

Modos **TE**

- Comportamiento cerca de la frecuencia de corte



$$f = 1.45 \text{ MHz}$$
$$f_c = 1.5 \text{ GHz}$$

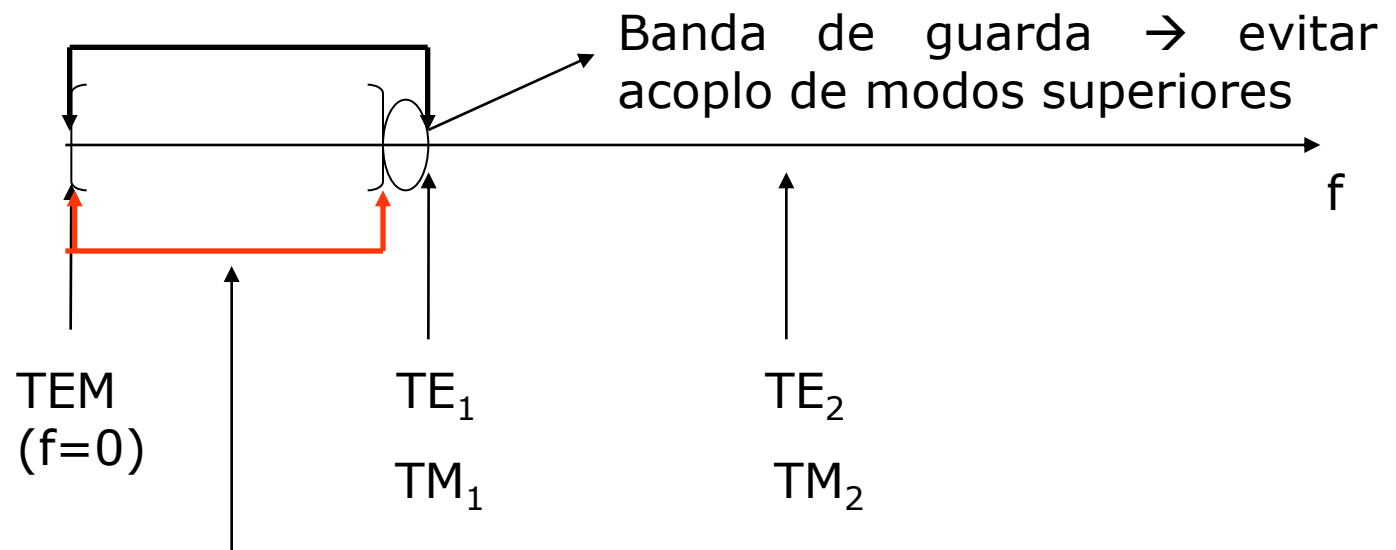


2. Análisis modal en guías de ondas: Guía de placas paralelas

Modos **TE**

- Ancho de banda útil de la guía

FUNCIONAMIENTO MONOMODO



Ancho de banda útil