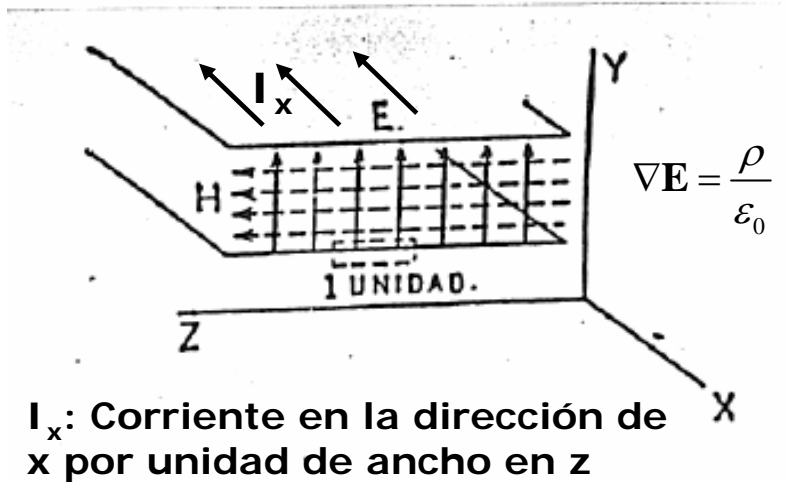


---

# Guia de Onda

Campos y Ondas

FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA  
ARGENTINA



- Las superficies conductoras sirven como contorno para acotar la onda plana???

- Si las hojas fueran paralelas o oblicuas al  $\mathbf{E}$  circularía corriente por las placas y el campo se distorsionaría
- Si las placas se ubican normal al campo eléctrico  $\mathbf{E}$  no se perturba
- $\mathbf{E}$  y  $\mathbf{H}$  deben terminar en las 2 superficies conductoras para acotar la onda

- $\mathbf{E}$  debe **terminar en cargas**, sobre la superficie debe haber una distribución adecuada de cargas.
- $\mathbf{H}$  solo **puede terminar** repentinamente en una superficie por la que circula una corriente  $I$  (**J infinita**) pues de otra manera el rotor sería nulo.
- **Cambia la distribución de carga** necesario para mantener la onda de  $\mathbf{E}$ , su movimiento constituye una **corriente** que produce el límite apropiado de  $\mathbf{H}$ .
- Las cargas no se mueven a la velocidad de la onda, se mueven de las regiones donde la densidad de carga disminuye a donde la densidad de carga aumenta.

- 1) Relación entre E y H  $\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$

Si aplicamos al campo de la figura

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} = -\frac{\partial D_y}{\partial t}$$

- 2) La carga superficial es igual al vector  $D_y$ , cambia en el tiempo

$$\sigma = D_y$$

- Este cambio constituye un cambio de la carga de modo de producir una corriente :

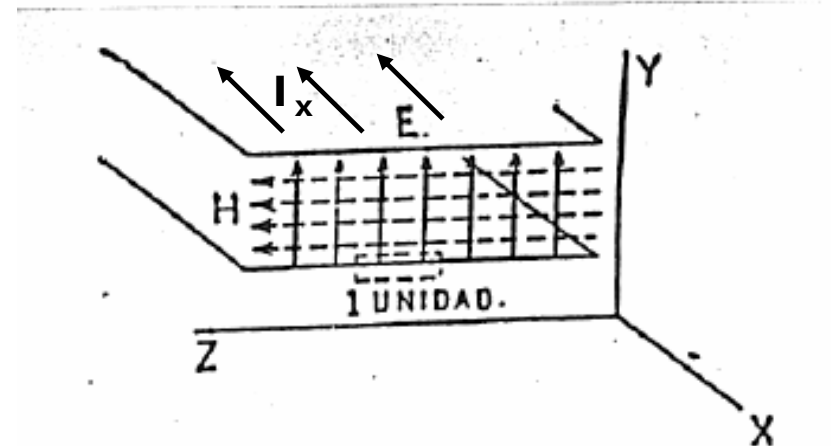
$$\nabla \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad \frac{\partial J_x}{\partial x} \cdot \Delta y = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \Delta y$$

$$\frac{\partial J_x}{\partial x} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad J_x \cdot \Delta y = I_x$$

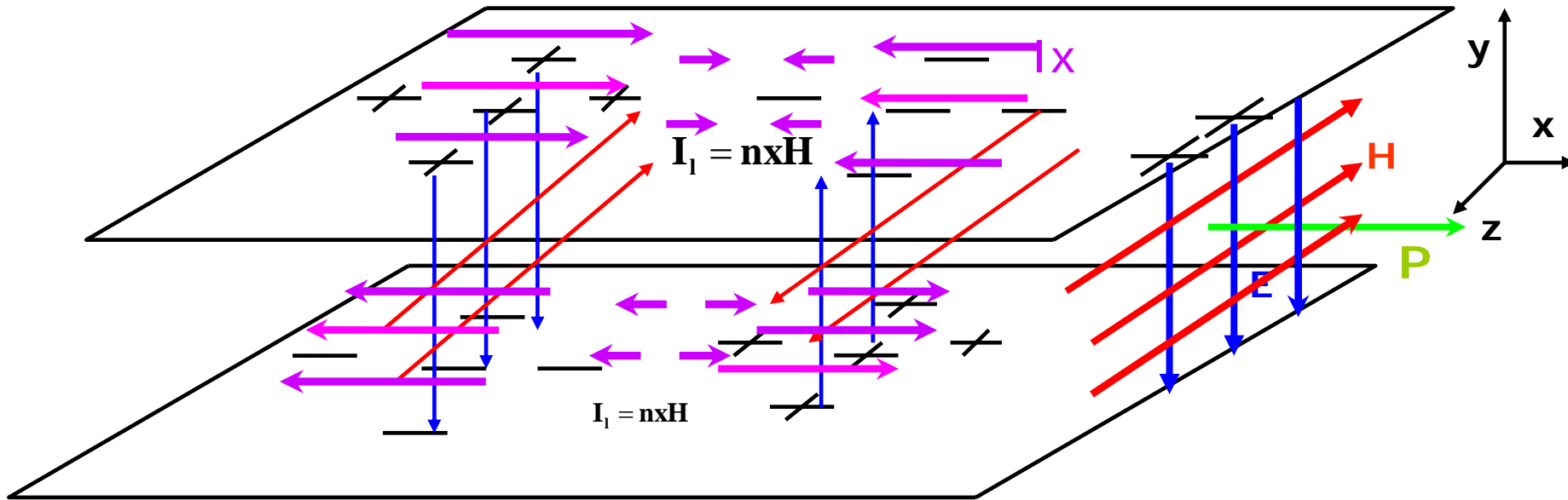
$$\rho \cdot \Delta y = \sigma$$

$$-\frac{\partial I_x}{\partial x} = \frac{\partial \sigma}{\partial t}$$

La intensidad de corriente será un poco menor luego de haber pasado por el punto y depositado algo de carga



$I_x$ : Corriente en la dirección de  $x$  por unidad de ancho en  $z$



Consideremos un punto de la superficie conductora en el cual aumenta la densidad de carga provista por la corriente paralela al eje  $x$ , su intensidad será un poco menor al dejar algo de carga.

- La carga sobre una superficie es positiva y en ese mismo instante en la otra es negativa
- Los sentidos de las corrientes son opuestos ambas superficies.
- La Condición de contorno de  $H$  se indican sobre las superficies conductoras

$$\mathbf{I}_l = n \times \mathbf{H}$$

$$\mathbf{I}_x = \widetilde{\mathbf{y}} \times \mathbf{H}_z$$

Por lo tanto se cumplen ambas condiciones de contorno tanto para  $E$  como para  $H$

En ---→ **cargas**

Ht ----→ **corrientes**

$$\sigma = D_y \left\{ \begin{array}{l} \text{Terminación} \\ \text{del Campo} \\ \text{eléctrico} \end{array} \right.$$

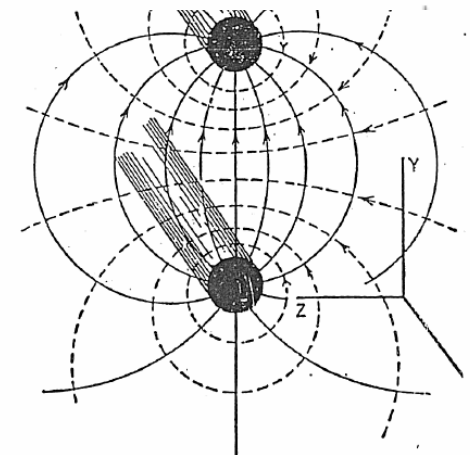
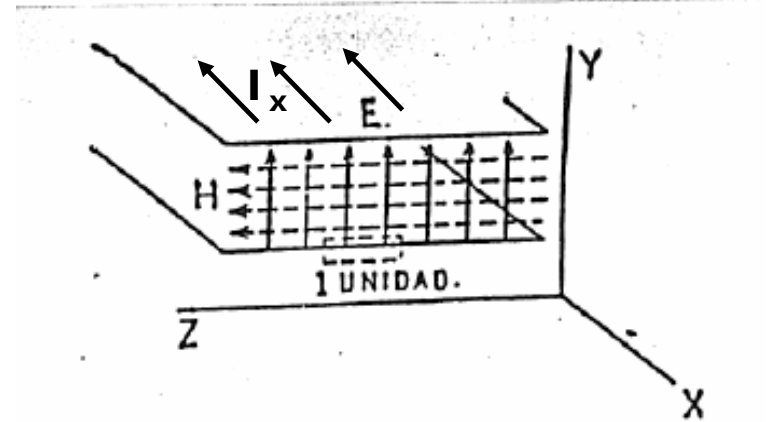
$$\nabla \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

$$\frac{\partial I_x}{\partial t} = -\frac{\partial \sigma}{\partial t} \left\{ \begin{array}{l} \text{Ecuación de} \\ \text{Continuidad} \end{array} \right.$$

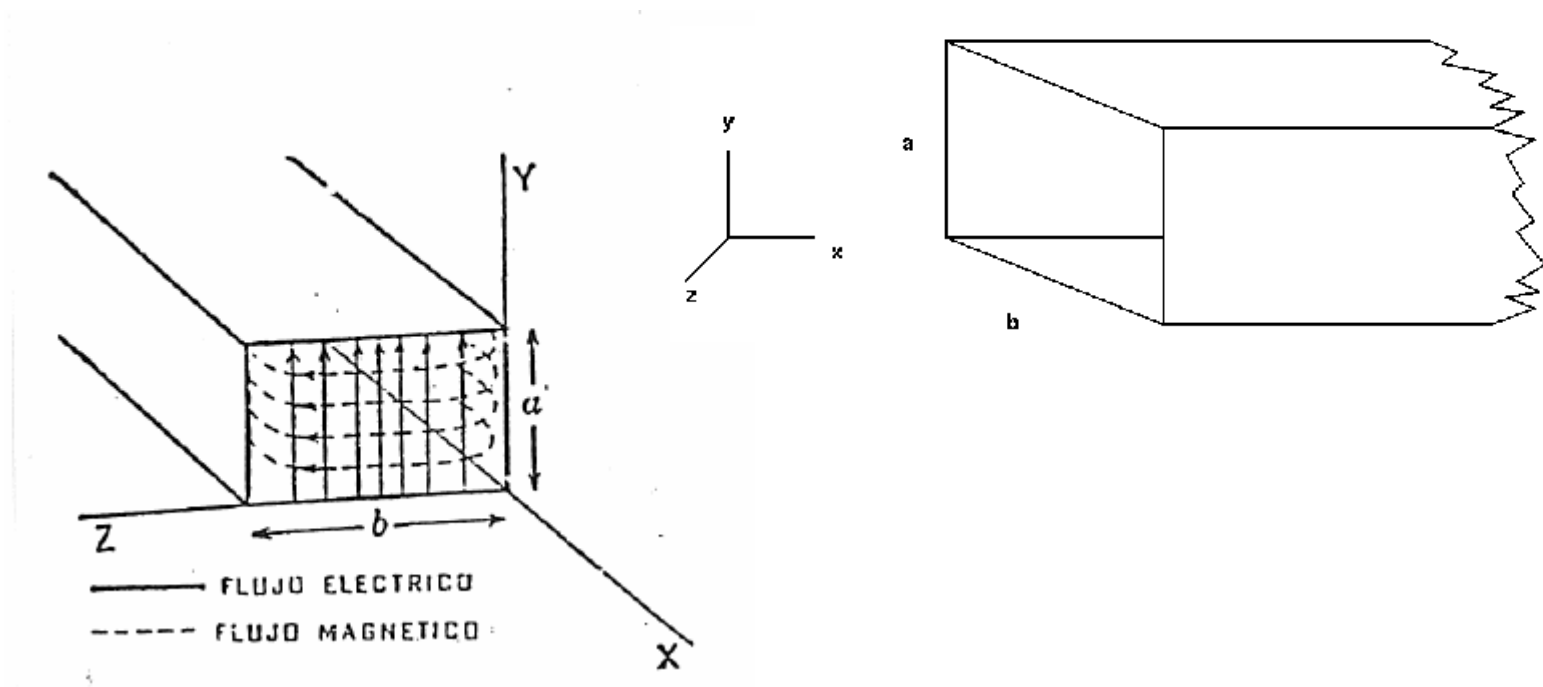
$$\mathbf{J}_s = \mathbf{n} \times \mathbf{H}$$

$$H_z = I_x \left\{ \begin{array}{l} \text{Condición de} \\ \text{Contorno del} \\ \text{Campo Magnético} \end{array} \right.$$

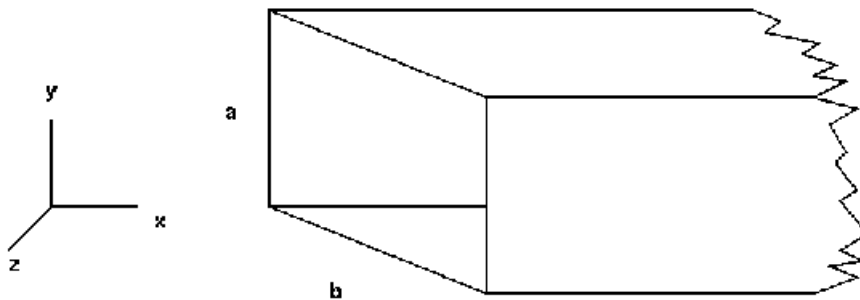
$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \frac{\partial H_z}{\partial x} = -\frac{\partial D_y}{\partial t}$$



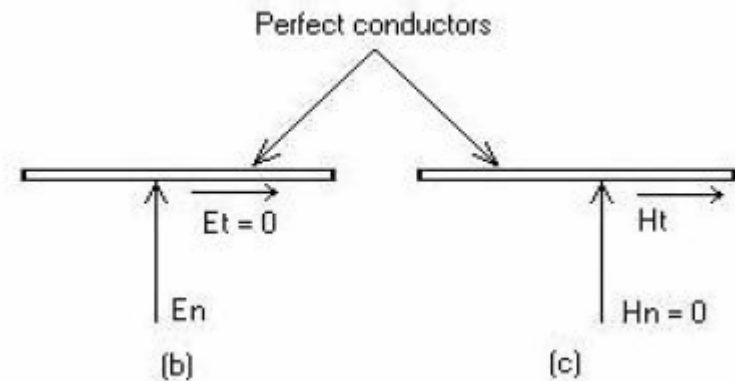
- Que sucede si se trata de acotar la onda cerrando los laterales???

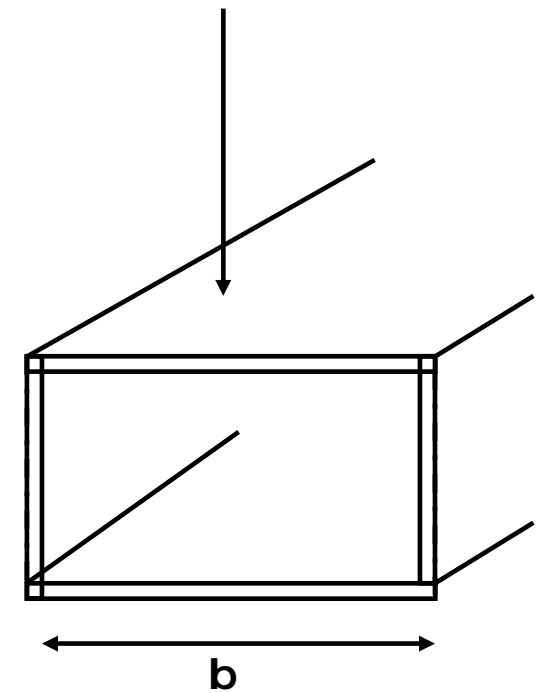
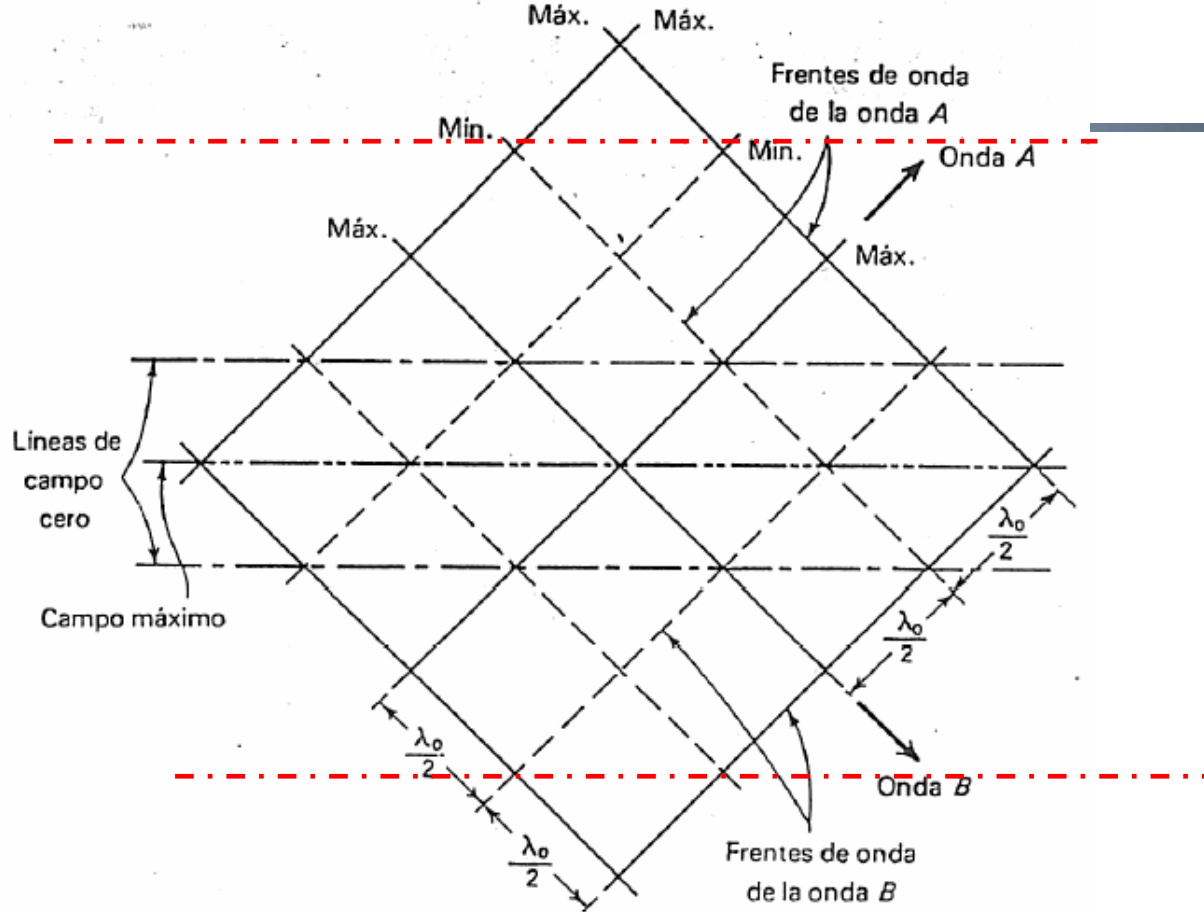


- Los campos eléctricos deben terminar normalmente en el conductor, ya que la componente tangencial del campo eléctrico debe ser cero.
- Los campos magnéticos deben estar enteramente tangenciales a lo largo de la superficie de la pared, esto es, que la componente normal del campo magnético debe ser cero.



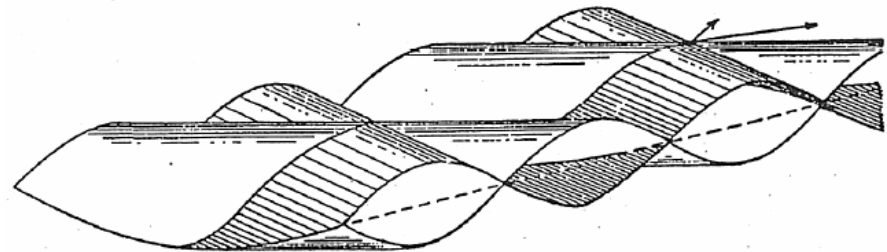
¿ En una cavidad cerrada puede  
Existir el modo de propagación  
TEM ? (onda plana)





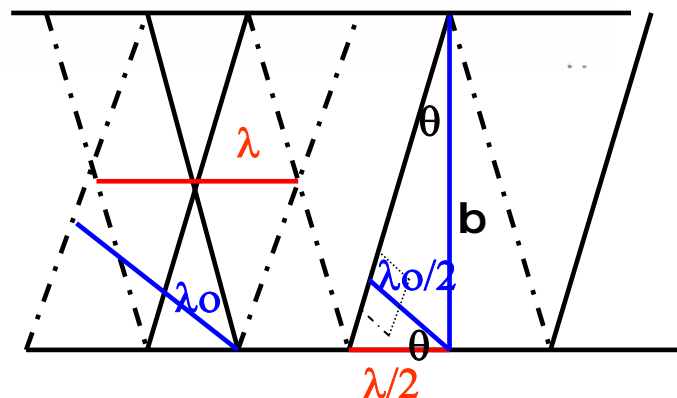
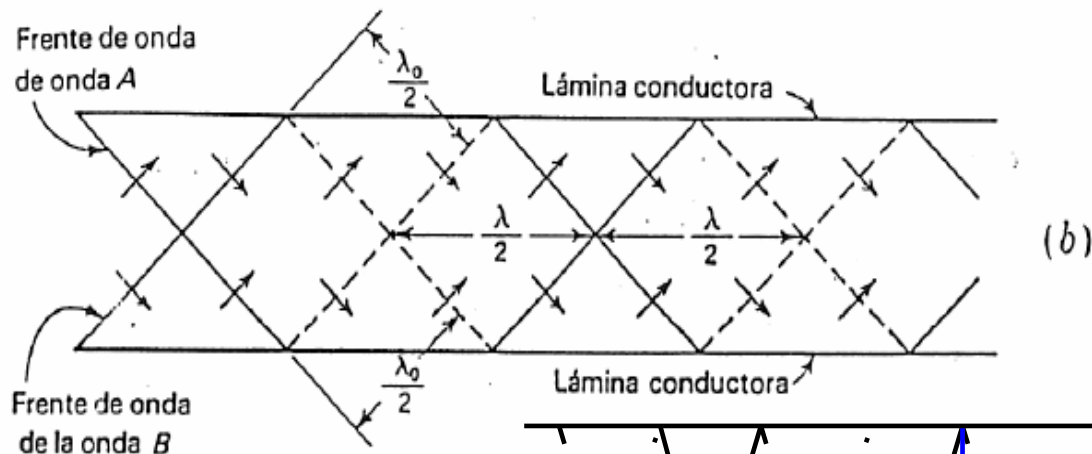
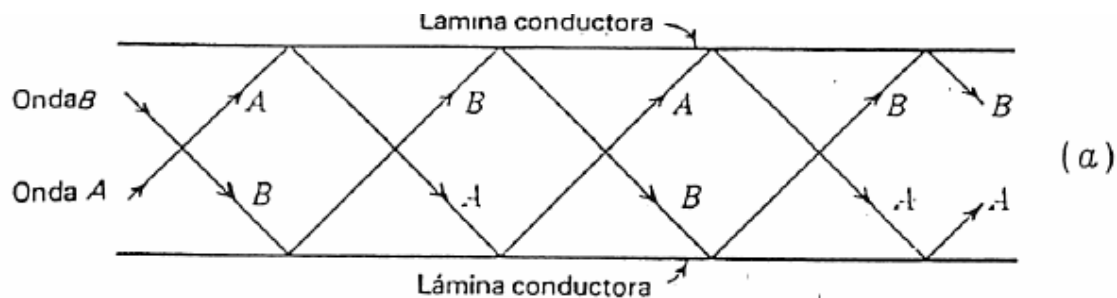
Cada onda individual es del modo **TEM**, pero la resultante de ambas es de un modo superior denominado **TE**.

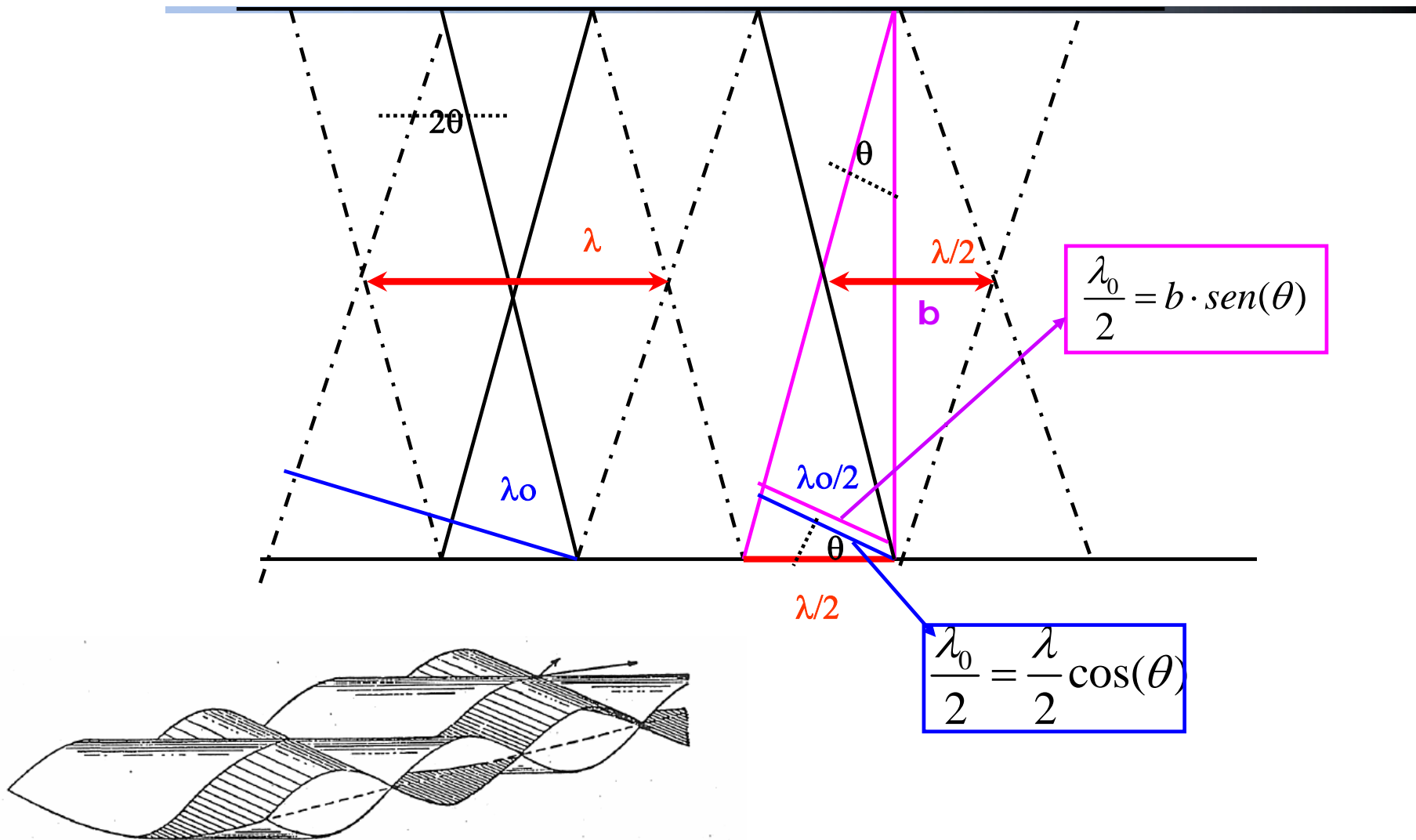
La onda será transmitida para longitudes de onda suficientemente cortas

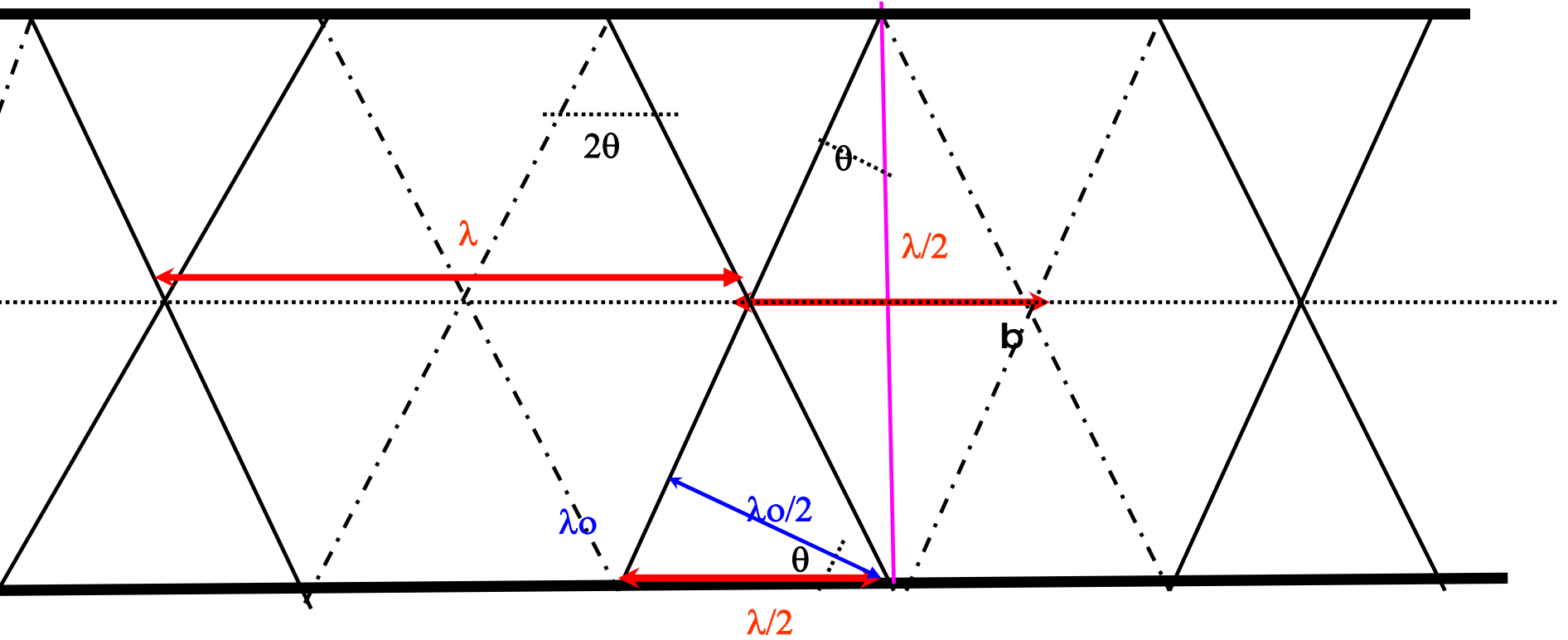




***Cuales son las  $\lambda_0$  que pueden transmitirse en una guía de dimensiones determinadas***

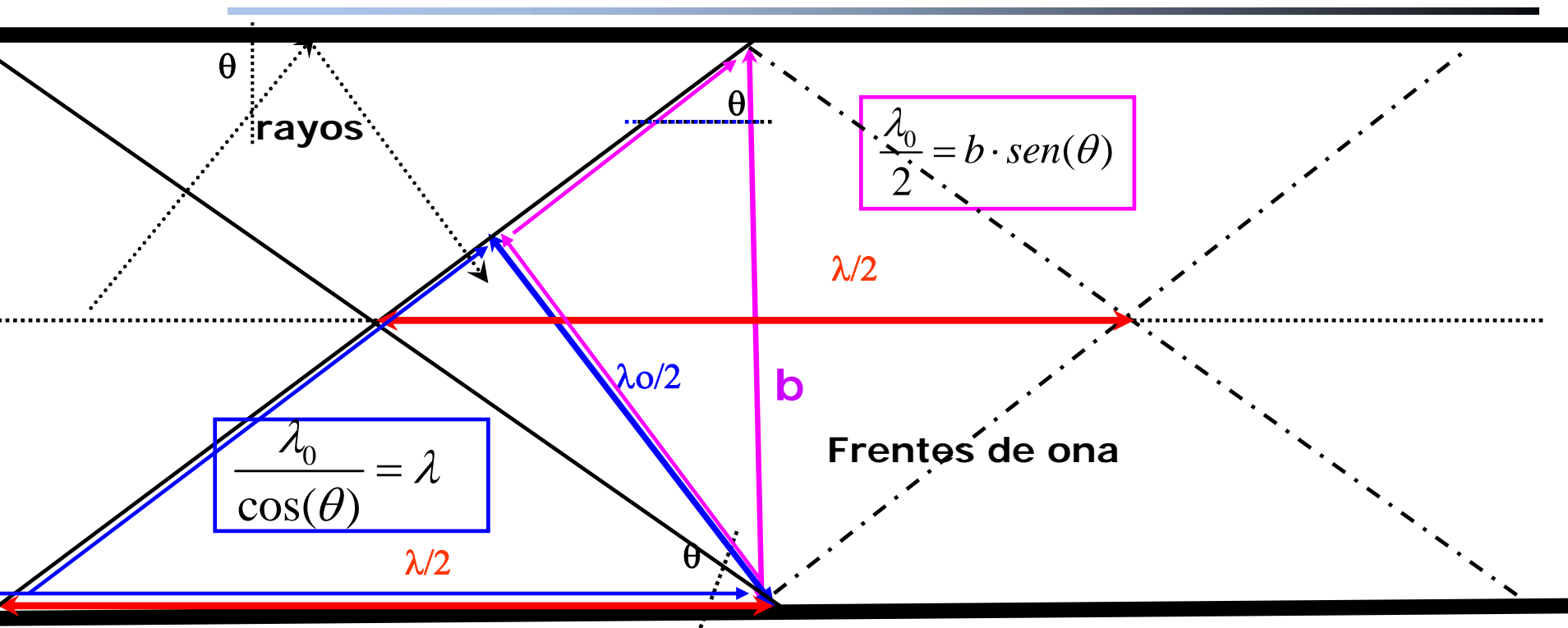






$$\frac{\lambda_0}{2} = b \cdot \sin(\theta)$$

$$\frac{\lambda_0}{\cos(\theta)} = \lambda$$



La longitud de onda de mayor magnitud está dada por

$$\lambda_{0_{corte}} = 2 \cdot b \cdot \sin(90^\circ) \rightarrow \lambda_{0_{corte}} = 2 \cdot b$$

Para longitudes de onda mayores es imposible anular el campo sobre las paredes!!!!

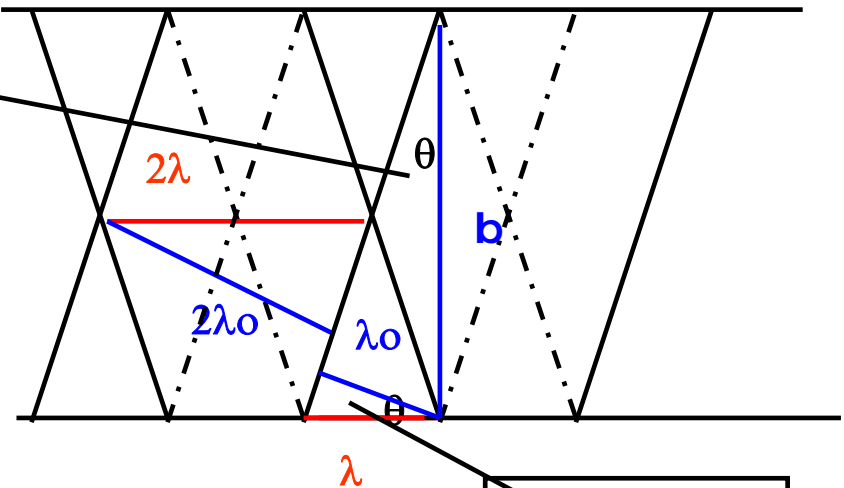
$$n \cdot \frac{\lambda_0}{2} = b \cdot \text{sen}(\theta)$$

$$n = 1, 2, 3 \dots$$

La longitud de onda de mayor magnitud está dada por

$$\lambda_{0\text{corte}} = 2 \cdot b \cdot \text{sen}(90^\circ)$$

$$\lambda_{0\text{corte}} = 2 \cdot b$$

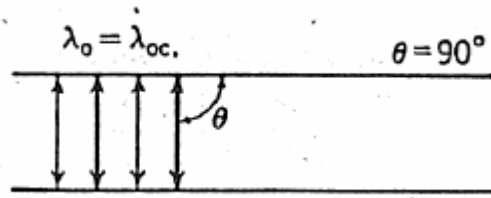


$$2 \frac{\lambda_0}{2} = 2 \frac{\lambda}{2} \cos(\theta)$$

Para una determinada separación **b** se obtiene la longitud mayor que puede transmitirse, con  $n=1$  longitud de onda de CORTE.

Para valores mayores de  $\lambda_0$  no Hay propagación las ondas se atenúan rápidamente.

Para valores mayores de  $n$  se tienen los modos de orden superior.



$$\lambda_{oc} = \frac{2b}{n}$$

*n cantidad de semilongitudes*

$$n = 2$$

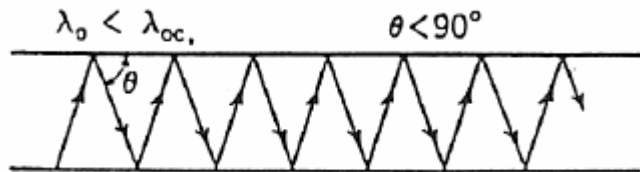
$$n = 3$$

$$\lambda_{oc} = b$$

$$\lambda_{oc} = \frac{2}{3} \cdot b$$

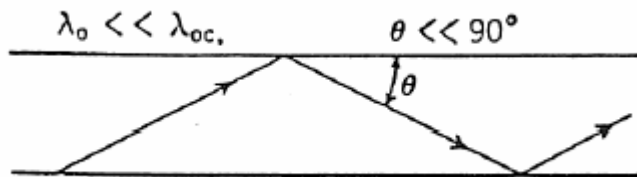
$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{\lambda_o}{\lambda_{oc}} \right)$$

Para el ángulo  $\theta=90^\circ$ , se establece una onda estacionaria, la onda no avanza



$$f_o = \frac{v_o}{\lambda_o}$$

$$f_{ocorte} = \frac{v_o}{\lambda_{0corte}}$$



$$f_o > \frac{v_o}{\lambda_{0corte}}$$

Para  $f < f_{ocorte}$  no es posible la propagación de ondas entre dos placas .

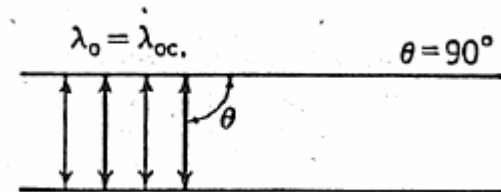
**Filtro pasa Alto**

- Velocidad de fase de la onda compuesta

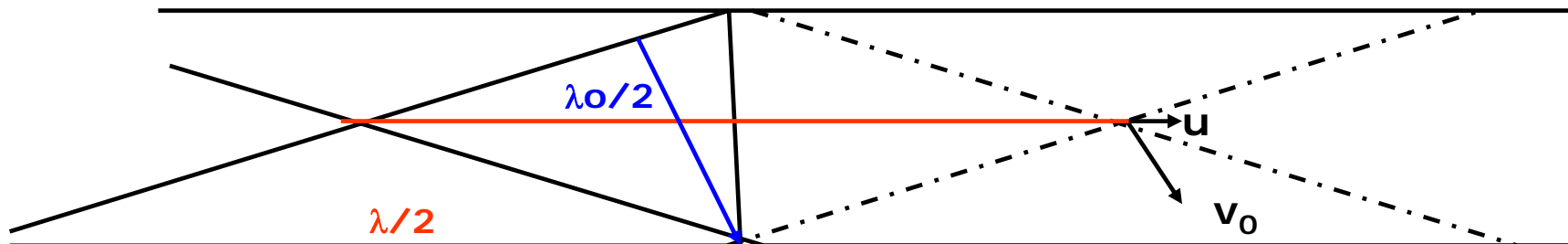
$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$$

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\cos \theta}$$

$$v = \lambda \cdot f = \frac{\lambda_0}{\cos(\theta)} \cdot f = \frac{v_0}{\cos(\theta)}$$



- La velocidad de fase mide la velocidad con que se mueve un punto de igual fase, se aproxima a infinito cuando la longitud de onda se aproxima a la de corte ( $\theta$  se aproxima a  $90^\circ$ ). En este caso la onda NO avanza, se reflejan a un lado y otro

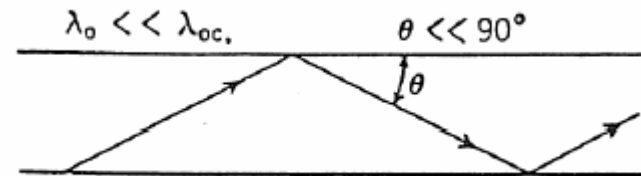


- **Vfase se aproxima a Vo cuando  $\lambda_o$  se hace muy corta**

$$v_{fase} = \frac{v_o}{\cos(\theta)} \quad v_f = \frac{c}{\sqrt{1 - \sin^2(\theta)}}$$

$$n \cdot \frac{\lambda_o}{2} = b \cdot \sin(\theta) \quad \sin(\theta) = \frac{\lambda_o}{2b} = \frac{\lambda_o}{\lambda_{oc}}$$

$$v_f = \frac{v_o}{\sqrt{1 - \left( \frac{\lambda_o}{\lambda_{oc}} \right)^2}}$$



- **V fase siempre es mayor que la velocidad de las ondas individuales**



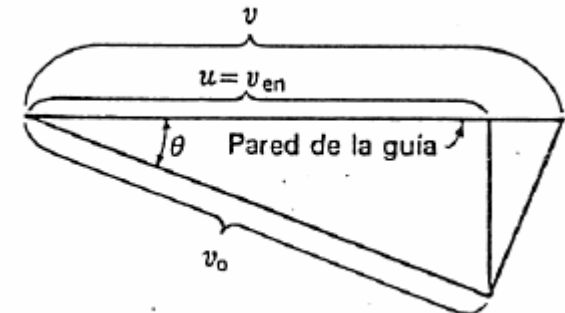
- Velocidad de transporte de la energía, velocidad de grupo de la onda compuesta

$$u = v_g = v_o \cdot \cos(\theta)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda_o} \cdot \cos(\theta)$$

$$v_f = \frac{v_o}{\sqrt{1 - \left( \frac{\lambda_o}{\lambda_{oc}} \right)^2}}$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda_o} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda_o}{\lambda_{oc}} \right)^2}$$



$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda_o} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{\omega_{oc}}{\omega} \right)^2}$$

$$v_g = v_f - \lambda_o \frac{dv_f}{d\lambda_o}$$

$$\beta = \frac{\omega}{v_o} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{\omega_{oc}}{\omega} \right)^2}$$

La Guía se comporta como un medio dispersor sin pérdidas

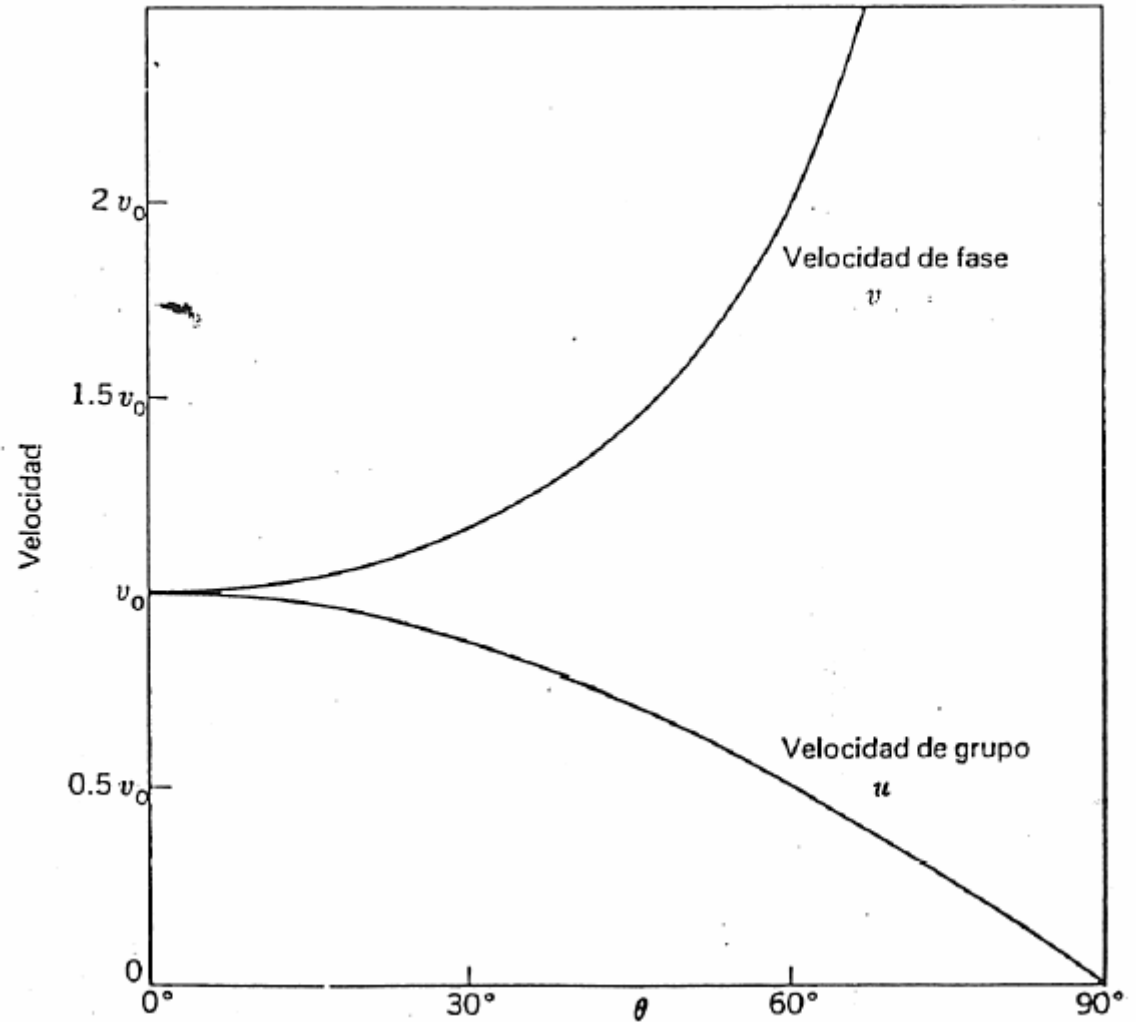
$$v_{fase} = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2\pi f}{\frac{2\pi}{\lambda_o} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{\omega_{oc}}{\omega} \right)^2}} = \frac{f \lambda_o}{\sqrt{1 - \left( \frac{\omega_{oc}}{\omega} \right)^2}} = \frac{v_o}{\sqrt{1 - \left( \frac{\omega_{oc}}{\omega} \right)^2}}$$

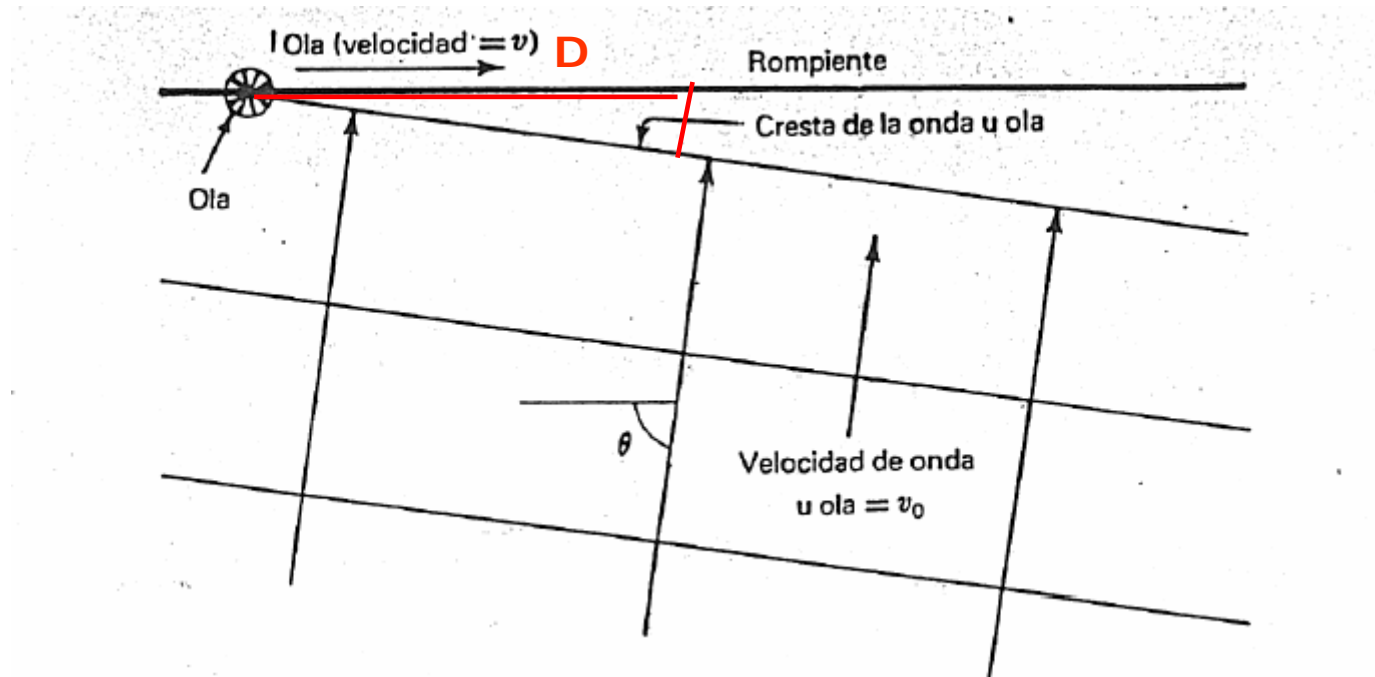
$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta} = v_o \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{\omega_{oc}}{\omega} \right)^2}$$

$$v_f = \frac{v_o}{\sqrt{1 - \left( \frac{\omega_{ocorte}}{\omega} \right)^2}}$$

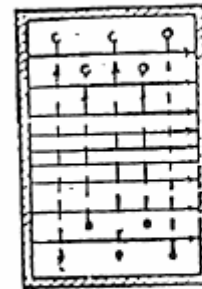
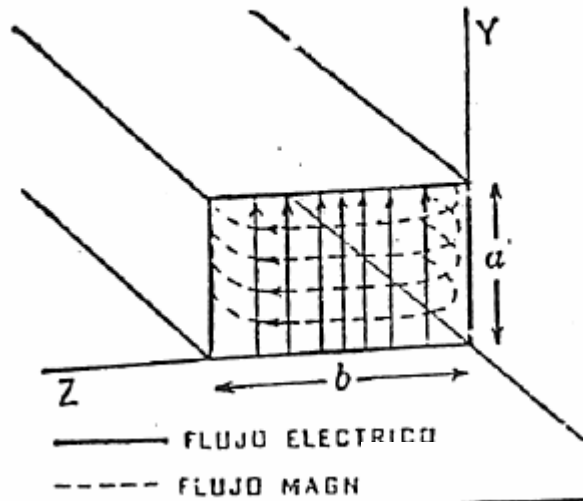
$$u = \frac{d\omega}{d\beta} = v_o \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{\omega_{ocorte}}{\omega} \right)^2}$$

$$u \cdot v_f = v_o^2$$

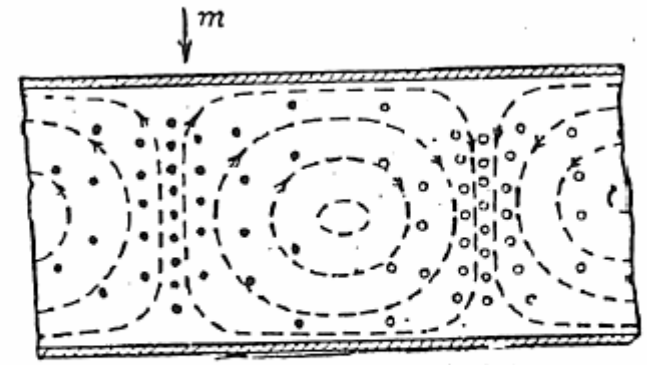




# Modo $TE_{10}$



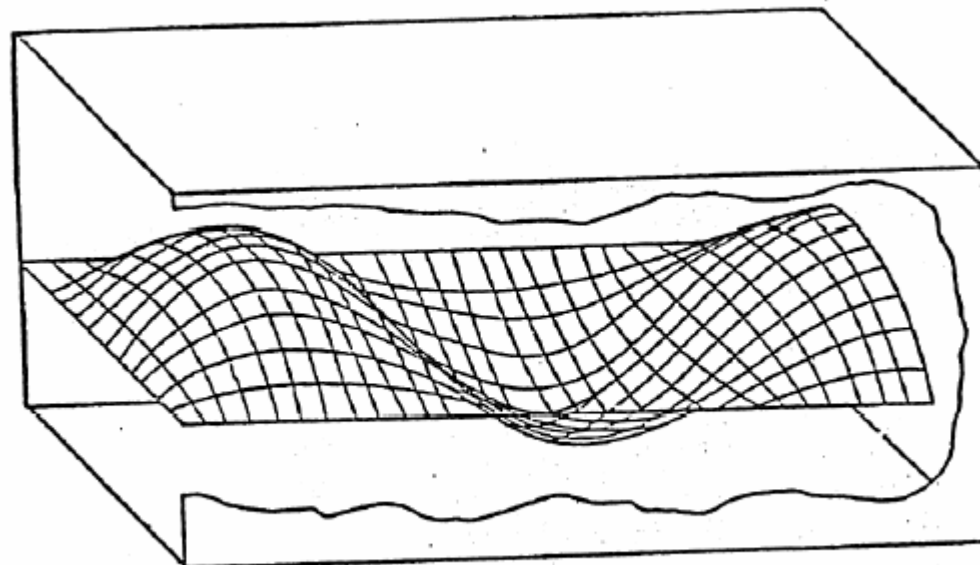
SECCION  $m \ n$



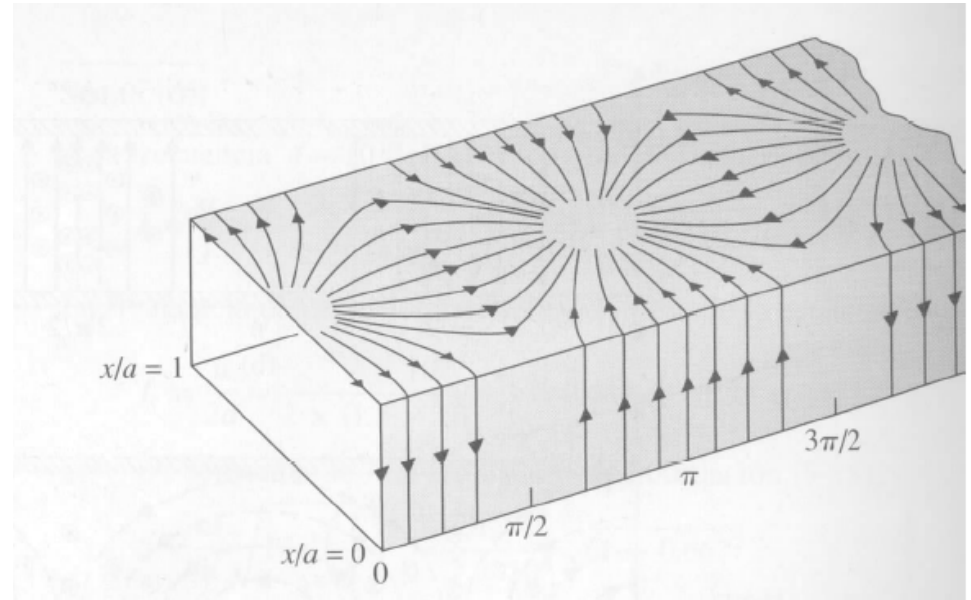
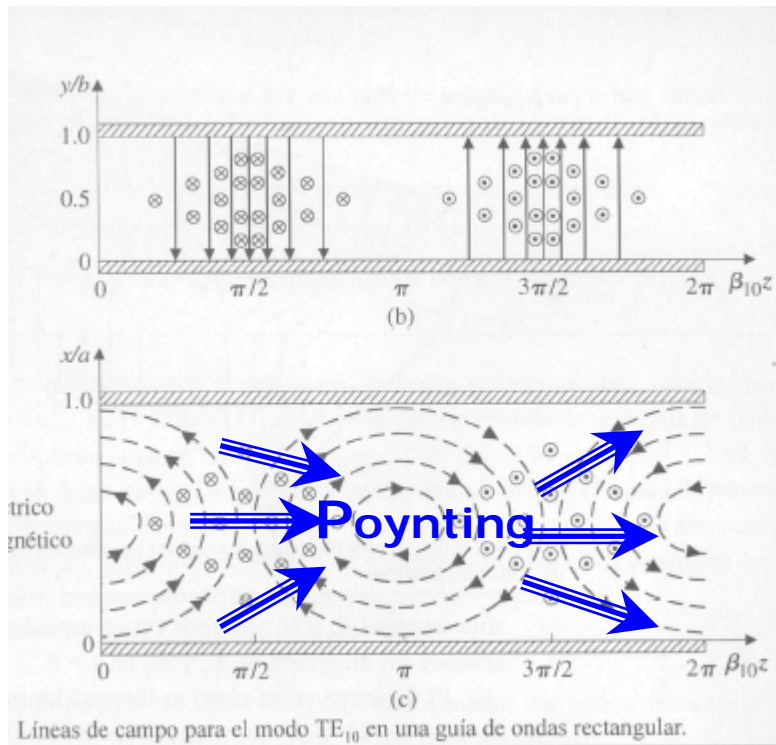
CORTE LONGITUDINAL

— FLUJO ELECTRICOO  
 ---- FLUJO MAGNETICO

HACIA FUERA  
 DE LA PAGINA  
 ° HACIA DENTRO



*modo TE<sub>10</sub>*



*Corriente en la superficie conductora*

## Resolución de la Ecuación diferencial de la Guía Rectangular Hueca

1. Se inicia con las ecuaciones de Maxwell.
2. Se aplica la restricción de variación armónica con respecto al tiempo.
3. Se aplica la restricción de variación armónica y atenuación con respecto a  $x$ .
4. Se selecciona el tipo o modo de onda de transmisión (TE en este caso; de manera que  $E_x = 0$  y  $H_x \neq 0$ ).
5. Se encuentran las ecuaciones para otras cuatro componentes de campo ( $E_y$ ,  $E_z$ ,  $H_y$  y  $H_z$ ) en términos de  $H_x$ .
6. Se desarrolla la ecuación de onda escalar para  $H_x$ .
7. Se resuelve esta ecuación de onda para  $H_x$  sujeta a condiciones en la frontera de la guía de onda.
8. Se sustituye de nuevo  $H_x$  en las ecuaciones del paso 5, dando un conjunto de ecuaciones que expresan cada componente de campo en función del espacio y del tiempo. Esto constituye la solución completa del problema.

• Paso 1. ecuaciones de Maxwell

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x - \epsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} &= 0 \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y - \epsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} &= 0 \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z - \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} + \mu \frac{\partial H_x}{\partial t} &= 0 \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} + \mu \frac{\partial H_y}{\partial t} &= 0 \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} + \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

**Rotacionales**

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0 \quad \frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0$$

**Divergencias**

• Paso 2 y 3: Variación Armónica en t y x

$$E_y = E_1 e^{j\omega t - \gamma x}$$

donde  $\gamma$  = constante de propagación =  $\alpha + j\beta$

$\alpha$  = constante de atenuación

$\beta$  = constante de fase

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - (\sigma + j\omega\epsilon)E_x &= 0 \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} + \gamma H_z - (\sigma + j\omega\epsilon)E_y &= 0 \\ -\gamma H_y - \frac{\partial H_x}{\partial y} - (\sigma + j\omega\epsilon)E_z &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} + j\omega\mu H_x &= 0 \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} + \gamma E_z + j\omega\mu H_y &= 0 \\ -\gamma E_y - \frac{\partial E_x}{\partial y} + j\omega\mu H_z &= 0 \end{aligned}$$

$$-\gamma E_x + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0$$

$$-\gamma H_x + \frac{\partial H_y}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0$$

$$Z = -j\omega\mu \quad (\Omega \text{ m}^{-1})$$

$$Y = \sigma + j\omega\epsilon \quad (\text{S m}^{-1})$$



$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - Y E_x = 0$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} + \gamma H_z - Y E_y = 0$$

$$-\gamma H_y - \frac{\partial H_x}{\partial y} - Y E_z = 0$$

$$-\gamma E_x + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} - Z H_x = 0$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} + \gamma E_z - Z H_y = 0$$

$$-\gamma E_y - \frac{\partial E_x}{\partial y} - Z H_z = 0$$

$$-\gamma H_x + \frac{\partial H_y}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0$$

- Paso 4. Selección del modo de propagación (TE, TM)
- En este caso TE,  $E_x=0$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_x}{\partial z} + \gamma H_z - Y E_y &= 0 \\ -\gamma H_y - \frac{\partial H_x}{\partial y} - Y E_z &= 0 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} - Z H_x = 0$$

$$\begin{aligned} \gamma E_z - Z H_y &= 0 \\ -\gamma E_y - Z H_z &= 0 \end{aligned}$$

$$-\gamma H_x + \frac{\partial H_y}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0$$

- Paso 5. Cada componente se expresa en función componente en la dirección de propagación,  $H_x$

$$\frac{E_z}{H_y} = -\frac{E_y}{H_z} = \frac{Z}{\gamma} \quad (\Omega) \quad Z_{yz} = \frac{E_y}{H_z} = -\frac{E_z}{H_y} = -\frac{Z}{\gamma} = \frac{j\omega\mu}{\gamma}$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} + \gamma H_z - Y E_y = 0$$

$$-\gamma H_y - \frac{\partial H_x}{\partial y} - Y E_z = 0$$

$$E_y = \frac{-Z_{yz}}{\gamma - Y Z_{yz}} \frac{\partial H_x}{\partial z}$$

$$E_z = \frac{Z_{yz}}{\gamma - Y Z_{yz}} \frac{\partial H_x}{\partial y}$$

$$H_y = \frac{-1}{\gamma - Y Z_{yz}} \frac{\partial H_x}{\partial y}$$

$$H_z = \frac{-1}{\gamma - Y Z_{yz}} \frac{\partial H_x}{\partial z}$$

• Paso 6. Ecuación de Onda de  $H_x$

$$-\gamma H_x + \frac{\partial H_y}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0$$

$$-\gamma H_x - \frac{1}{\gamma - YZ_{yz}} \left( \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2} \right) = 0$$

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2} + \gamma(\gamma - YZ_{yz})H_x = 0$$

$$H_y = \frac{-1}{\gamma - YZ_{yz}} \frac{\partial H_x}{\partial y}$$

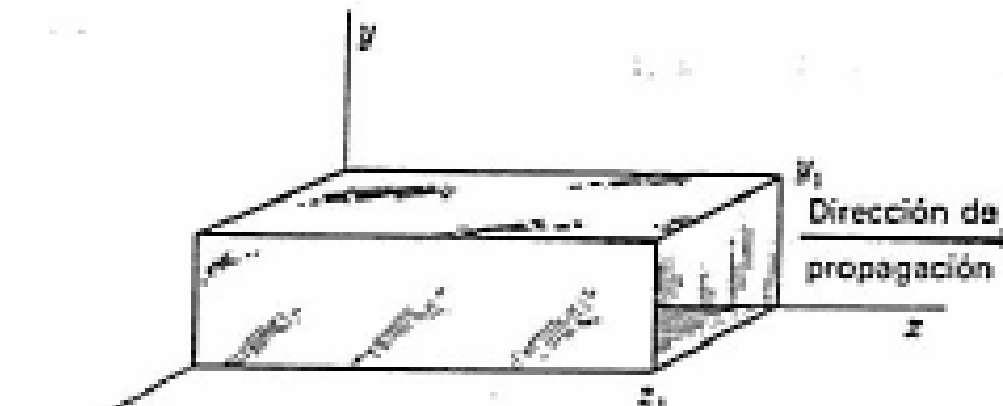
$$H_z = \frac{-1}{\gamma - YZ_{yz}} \frac{\partial H_x}{\partial z}$$

Haciendo  $k^2 = \gamma(\gamma - YZ_{yz})$  se reduce

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2} + k^2 H_x = 0$$

**Ecuación diferencial de segundo orden y primer grado**

- **Paso 7.** Solución de la ecuación, que satisfaga las condiciones de contorno.
- Conductor perfecto  $E_t=0$
- $E_y=0$  paredes laterales;  $E_z=0$  paredes superior e inferior
- Método de Separación de Varianles



$$H_x = YZ$$

donde  $Y$  = una función sólo de  $y$   
 $Z$  = una función sólo de  $z$

$$Z \frac{d^2 Y}{dy^2} + Y \frac{d^2 Z}{dz^2} + k^2 YZ = 0$$

$$\frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} + \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = -k^2$$

$$\frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} = -A_1$$

$$\frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = -A_2$$

$$A_1 + A_2 = k^2$$

- Soluciones posibles**

$$Y = c_1 \sin b_1 y$$

$$b_1 = \sqrt{A_1}$$

$$Y = c_2 \cos b_1 y$$

$$Y = c_1 \sin \sqrt{A_1} y + c_2 \cos \sqrt{A_1} y$$

$$Z = c_3 \sin \sqrt{A_2} z + c_4 \cos \sqrt{A_2} z$$

$$H_x = c_1 c_3 \sin \sqrt{A_1} y \sin \sqrt{A_2} z + c_2 c_3 \cos \sqrt{A_1} y \sin \sqrt{A_2} z \\ + c_1 c_4 \sin \sqrt{A_1} y \cos \sqrt{A_2} z + c_2 c_4 \cos \sqrt{A_1} y \cos \sqrt{A_2} z$$

- Condiciones de Contorno

$$H_x = c_1 c_3 \sin \sqrt{A_1} y \sin \sqrt{A_2} z + c_2 c_3 \cos \sqrt{A_1} y \sin \sqrt{A_2} z + c_1 c_4 \sin \sqrt{A_1} y \cos \sqrt{A_2} z + c_2 c_4 \cos \sqrt{A_1} y \cos \sqrt{A_2} z$$

$$E_y = 0 \text{ en } z = 0 \text{ y } z = z_1, \text{ y } E_z = 0 \text{ en } y = 0 \text{ y } y = y_1$$

$$E_y = \frac{-Z_{yz}}{\gamma - YZ_{yz}} \frac{\partial H_x}{\partial z}$$

$$\sqrt{A_1} = \frac{n\pi}{y_1}$$

$$\sqrt{A_2} = \frac{m\pi}{z_1}$$

$$E_z = \frac{Z_{yz}}{\gamma - YZ_{yz}} \frac{\partial H_x}{\partial y}$$

$$H_x(y, z) = H_0 \cos \frac{n\pi y}{y_1} \cos \frac{m\pi z}{z_1}$$

$$H_x(y, z, x, t) = H_0 \cos \frac{n\pi y}{y_1} \cos \frac{m\pi z}{z_1} e^{-\gamma x}$$

- Paso 8. Se expresa cada componente en función de  $H_x$

$$H_y = \frac{\gamma H_0}{k^2} \frac{n\pi}{y_1} \sin \frac{n\pi y}{y_1} \cos \frac{m\pi z}{z_1} e^{-\gamma x}$$

$$H_z = \frac{\gamma H_0}{k^2} \frac{m\pi}{z_1} \cos \frac{n\pi y}{y_1} \sin \frac{m\pi z}{z_1} e^{-\gamma x}$$

$$E_y = \frac{\gamma Z_{yz} H_0}{k^2} \frac{m\pi}{z_1} \cos \frac{n\pi y}{y_1} \sin \frac{m\pi z}{z_1} e^{-\gamma x}$$

$$E_z = - \frac{\gamma Z_{yz} H_0}{k^2} \frac{n\pi}{y_1} \sin \frac{n\pi y}{y_1} \cos \frac{m\pi z}{z_1} e^{-\gamma x}$$



Modo  $TE_{10}$ .

$E_x = 0$  requisito del modo TE

$$E_y = \frac{\gamma Z_{yz} H_0}{k^2} \frac{\pi}{z_1} \sin \frac{\pi z}{z_1} e^{-\gamma x}$$

$$E_z = 0$$

$$H_x = H_0 \cos \frac{\pi z}{z_1} e^{-\gamma x}$$

$$H_y = 0$$

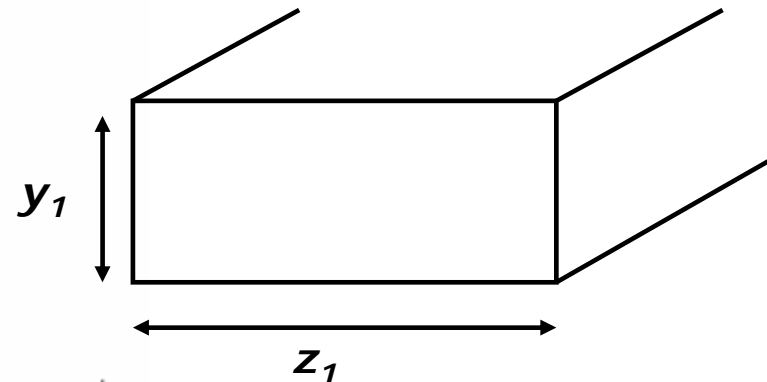
$$H_z = \frac{\gamma H_0}{k^2} \frac{\pi}{z_1} \sin \frac{\pi z}{z_1} e^{-\gamma x}$$

$TE_{mn}$

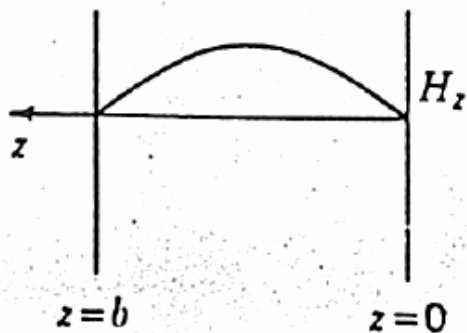
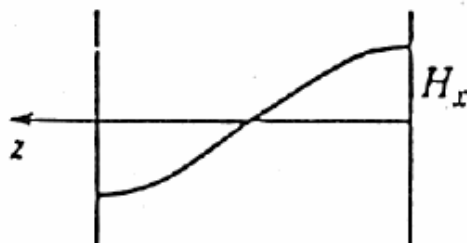
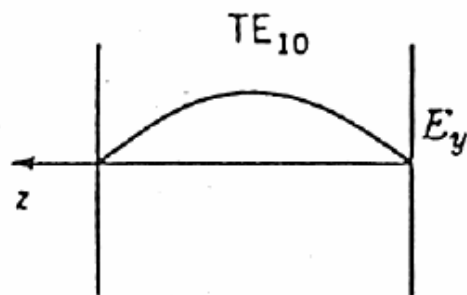
$TE_{10}$   $m=1, n=0$

$m$ : cantidad de  $\frac{1}{2}$  ciclos en  $z$

$n$ : cantidad de  $\frac{1}{2}$  ciclos en  $y$

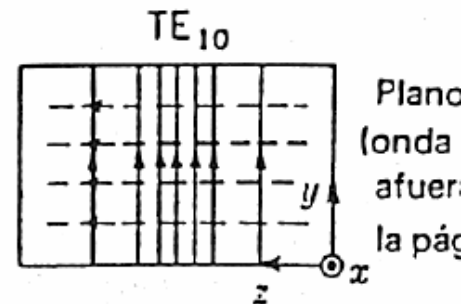


**Solo hay tres componentes, que no tienen variación sobre el eje  $y$ , pero cada una tiene variación de  $\frac{1}{2}$  ciclo en  $z$**

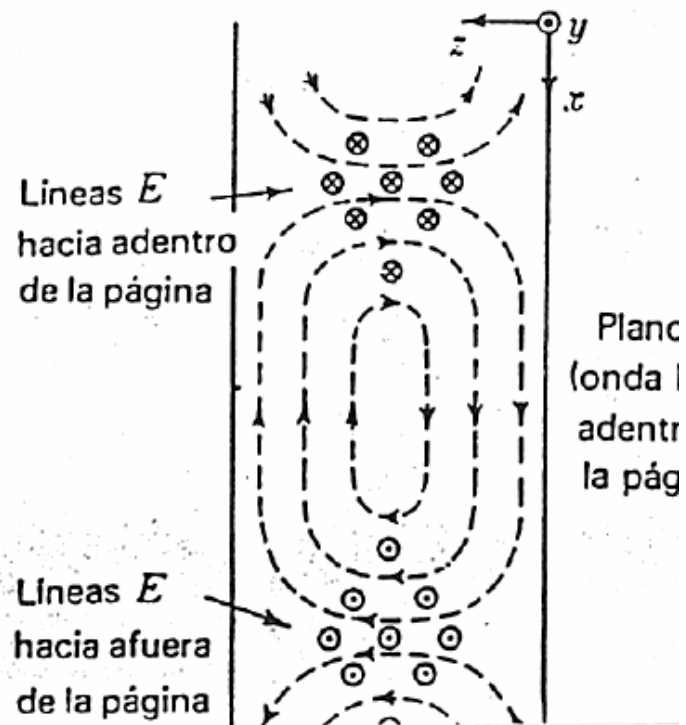


$$m=1$$

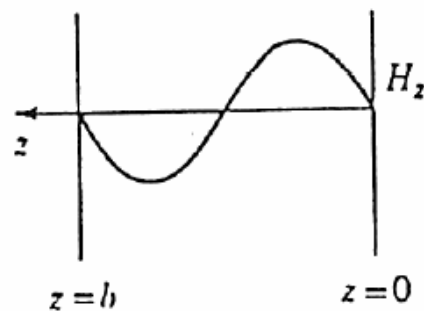
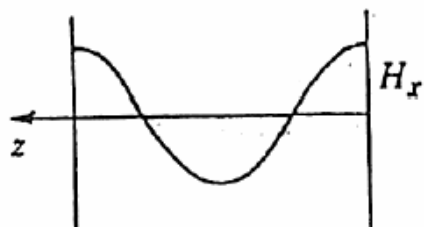
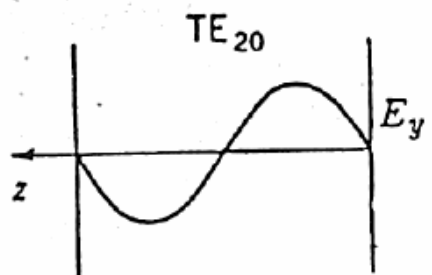
$$n=0$$



(a)

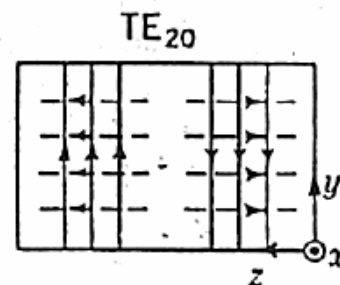


Modo  $TE_{20}$

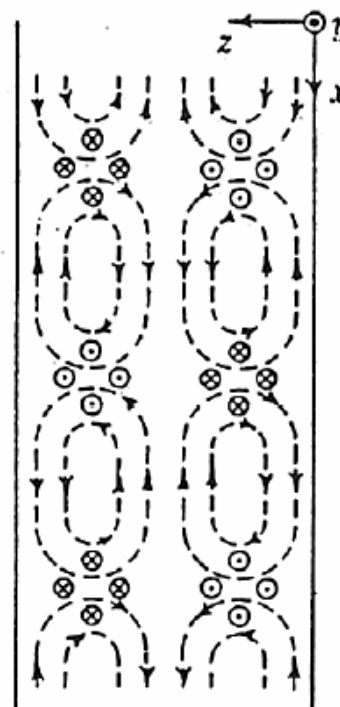


$$m=2$$

$$n=0$$



(c)



E líneas continuas  
H líneas discontinuas

Modo TE<sub>11</sub>

$E_x = 0$  requisito para el modo TE

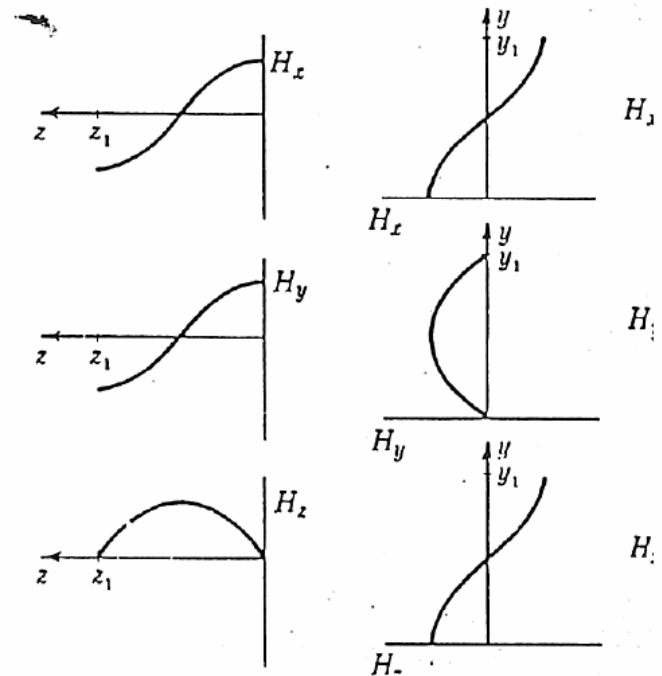
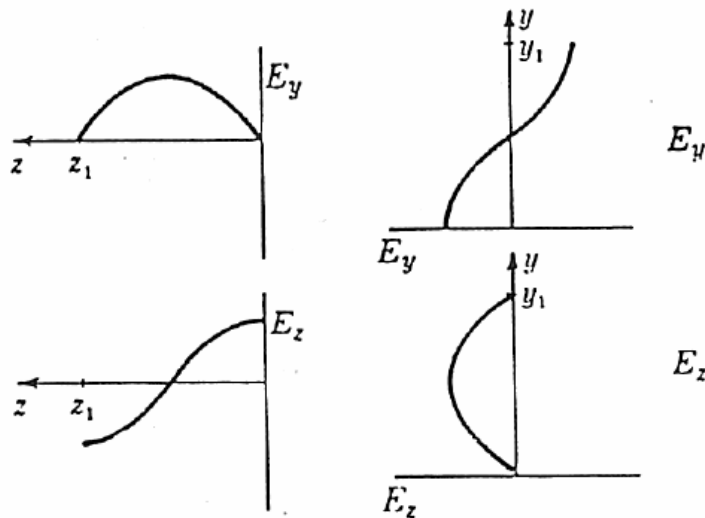
$$E_y = \frac{\gamma Z_{yz} H_0}{k^2} \frac{\pi}{z_1} \cos \frac{\pi y}{y_1} \sin \frac{\pi z}{z_1} e^{-\gamma x}$$

$$E_z = -\frac{\gamma Z_{yz} H_0}{k^2} \frac{\pi}{y_1} \sin \frac{\pi y}{y_1} \cos \frac{\pi z}{z_1} e^{-\gamma x}$$

$$H_x = H_0 \cos \frac{\pi y}{y_1} \cos \frac{\pi z}{z_1} e^{-\gamma x}$$

$$H_y = \frac{\gamma H_0}{k^2} \frac{\pi}{y_1} \sin \frac{\pi y}{y_1} \cos \frac{\pi z}{z_1} e^{-\gamma x}$$

$$H_z = \frac{\gamma H_0}{k^2} \frac{\pi}{z_1} \cos \frac{\pi y}{y_1} \sin \frac{\pi z}{z_1} e^{-\gamma x}$$



$$A_1 + A_2 = k^2$$

$$\left(\frac{n\pi}{y_1}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{z_1}\right)^2 = k^2$$

$$k^2 = \gamma^2 - j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)$$

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{n\pi}{y_1}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{z_1}\right)^2 - \omega^2\mu\epsilon}$$

**Medios sin pérdidas**

1. A bajas frecuencias,  $\omega$  pequeña,  $\gamma$  real, guía opaca, la onda no se propaga.
2. A una frecuencia intermedia,  $\omega$  intermedia,  $\gamma = 0$ , condición de transición (corte).
3. A altas frecuencias,  $\omega$  grande,  $\gamma$  imaginaria, guía transparente, la onda se propaga.

$$\omega^2\mu\epsilon = \left(\frac{n\pi}{y_1}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{z_1}\right)^2$$

$$f_c = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{n}{y_1}\right)^2 + \left(\frac{m}{z_1}\right)^2}$$

$$\lambda_{oc} = \frac{2\pi}{\sqrt{(n\pi/y_1)^2 + (m\pi/z_1)^2}} = \frac{2}{\sqrt{(n/y_1)^2 + (m/z_1)^2}} \quad (\text{m})$$

$$\beta = \sqrt{\beta_0^2 - k^2} = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon - \left(\frac{n\pi}{y_1}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{z_1}\right)^2}$$

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{v_0}{\sqrt{1 - (n\lambda_0/2y_1)^2 - (m\lambda_0/2z_1)^2}}$$

$$v_p = \frac{v_0}{\sqrt{1 - (\lambda_0/\lambda_{oc})^2}}$$

$$Z_{yz} = \frac{j\omega\mu}{\gamma} \quad \text{A frecuencias mayores que la de corte } \gamma = j\beta; \text{ de manera que}$$

$$Z_{yz} = \frac{j\omega\mu}{\beta} = \frac{Z_d}{\sqrt{1 - (\lambda_0/\lambda_{oc})^2}} \quad (\Omega)$$

donde  $Z_d$  = impedancia intrínseca del medio dieléctrico que llena la guía

$$= \sqrt{\mu/\epsilon} = 376.7 \, \Omega \text{ para el aire}$$

$\lambda_0$  = longitud de onda en un medio no limitado

$\lambda_{oc}$  = longitud de onda de corte

$$Z_{yz} = \frac{\omega\mu}{\beta} = \frac{Z_d}{\sqrt{1 - (\lambda_0/\lambda_{oc})^2}} \quad (\Omega)$$

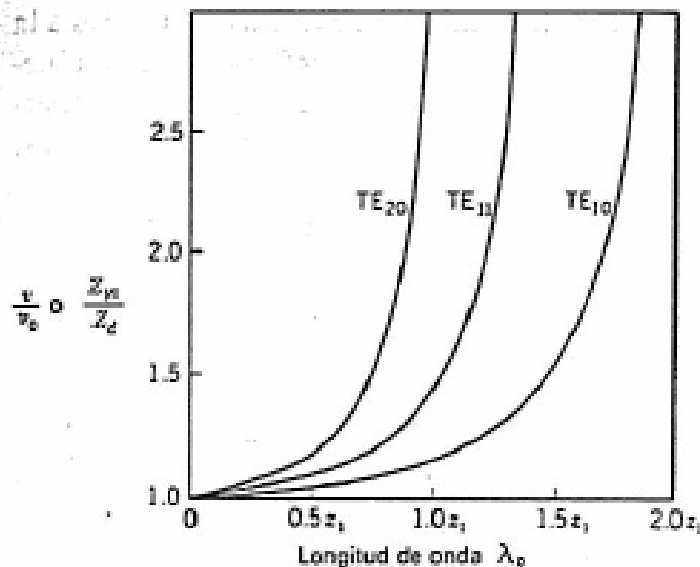


Figura 13-15. Velocidad relativa de fase  $v/v_0$  o impedancia transversal relativa  $Z_{yz}/Z_d$  en función de la longitud de onda  $\lambda_0$  para modos TE en una guía cuadrada hueca (altura  $y_1$  igual a ancho  $z_1$ )

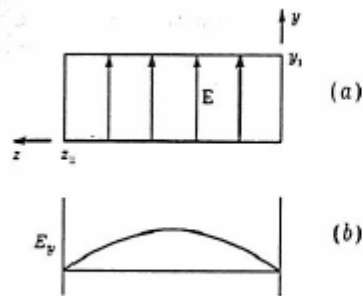


Figura 13-16. Guía de onda rectangular con modo  $TE_{10}$  únicamente.

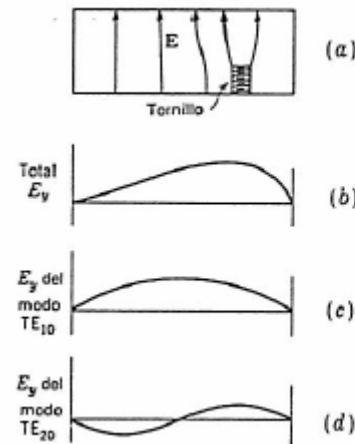
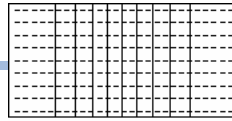


Figura 13-17. Guía de onda rectangular con modo  $TE_{10}$  inducido del modo  $TE_{20}$  por proyección colocada asimétricamente (tornillo).

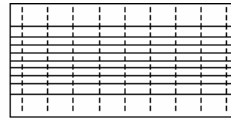
- El tornillo es como una antena receptora que extrae energía del modo  $TE_{10}$  y vuelve a irradiar de manera que excita el modo  $TE_{20}$ , si se diseña la guía para que solo se pueda transmitir el modo  $TE_{10}$ , el modo superior solo existirá en la vecindad del tornillo.
- Para evitar transmisión multimodal, se opera solo con el modo, modo dominante (menor frecuencia)
- $TE_{10}$  :  $\lambda/2 < z_1 < \lambda$ ,  $y_1 < \lambda/2$
- se elige  $z_1 = 0.7\lambda$  para que los valores de impedancia  $Z_{yz}$ , y velocidad no sean críticos.
- Se elige  $y_1 = 0.5z_1$  para evitar aumentar atenuación y poder manejar potencia

□

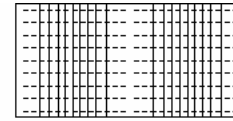




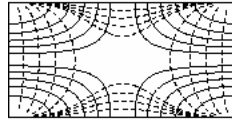
(1)  $TE_{10}$



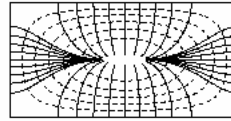
(2)  $TE_{01}$



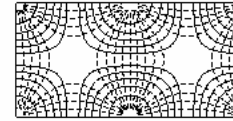
(3)  $TE_{20}$



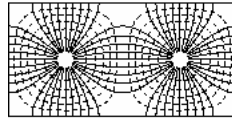
(4)  $TE_{11}$



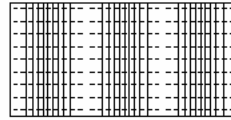
(5)  $TM_{11}$



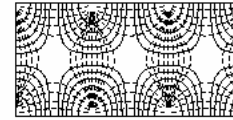
(6)  $TE_{21}$



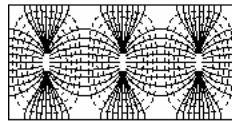
(7)  $TM_{21}$



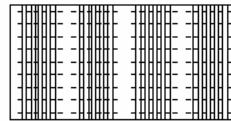
(8)  $TE_{30}$



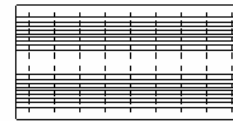
(9)  $TE_{31}$



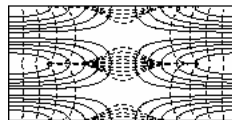
(10)  $TM_{31}$



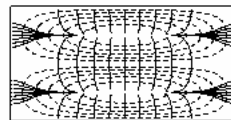
(11)  $TE_{40}$



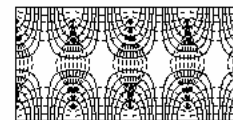
(12)  $TE_{02}$



(13)  $TE_{12}$



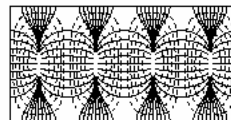
(14)  $TM_{12}$



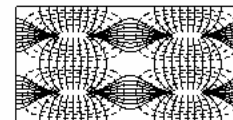
(15)  $TE_{41}$



(16)  $TE_{22}$



(17)  $TM_{41}$



(18)  $TM_{22}$