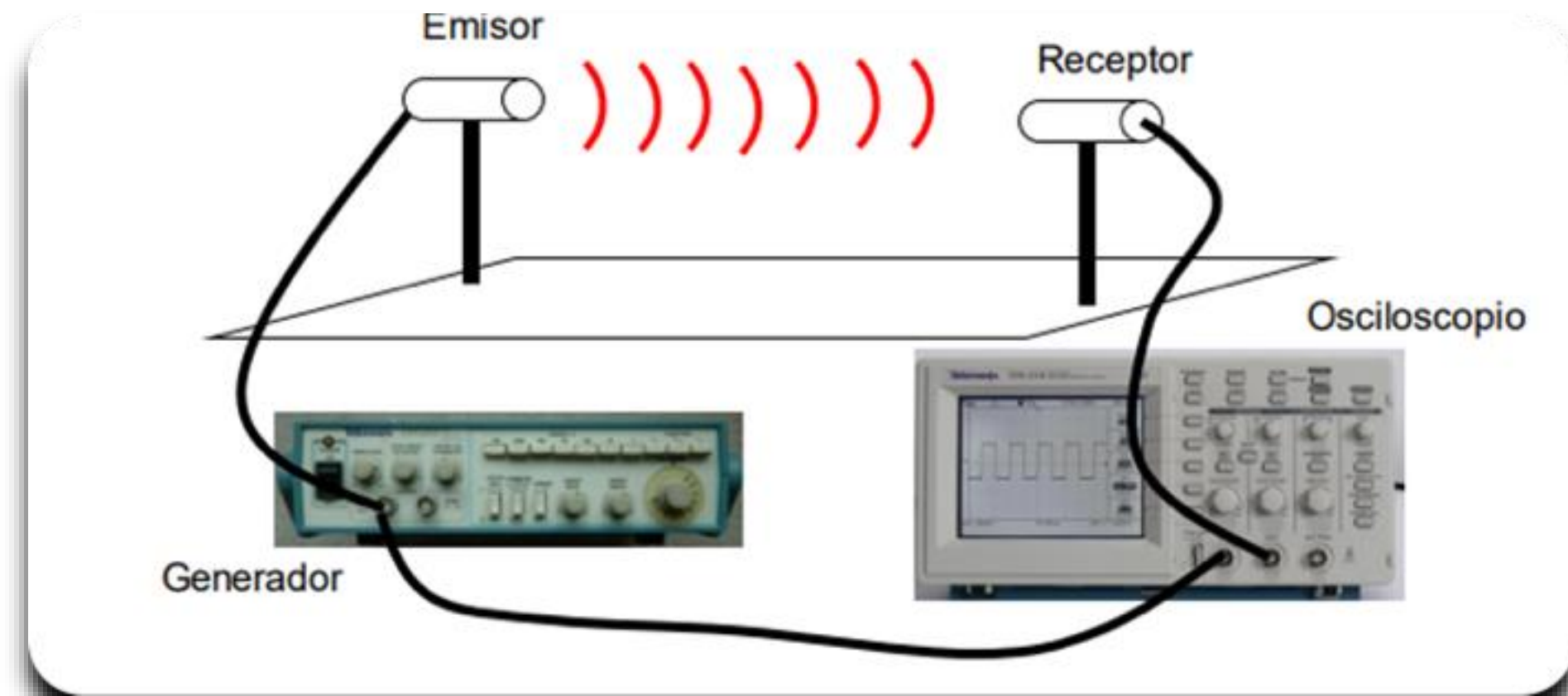


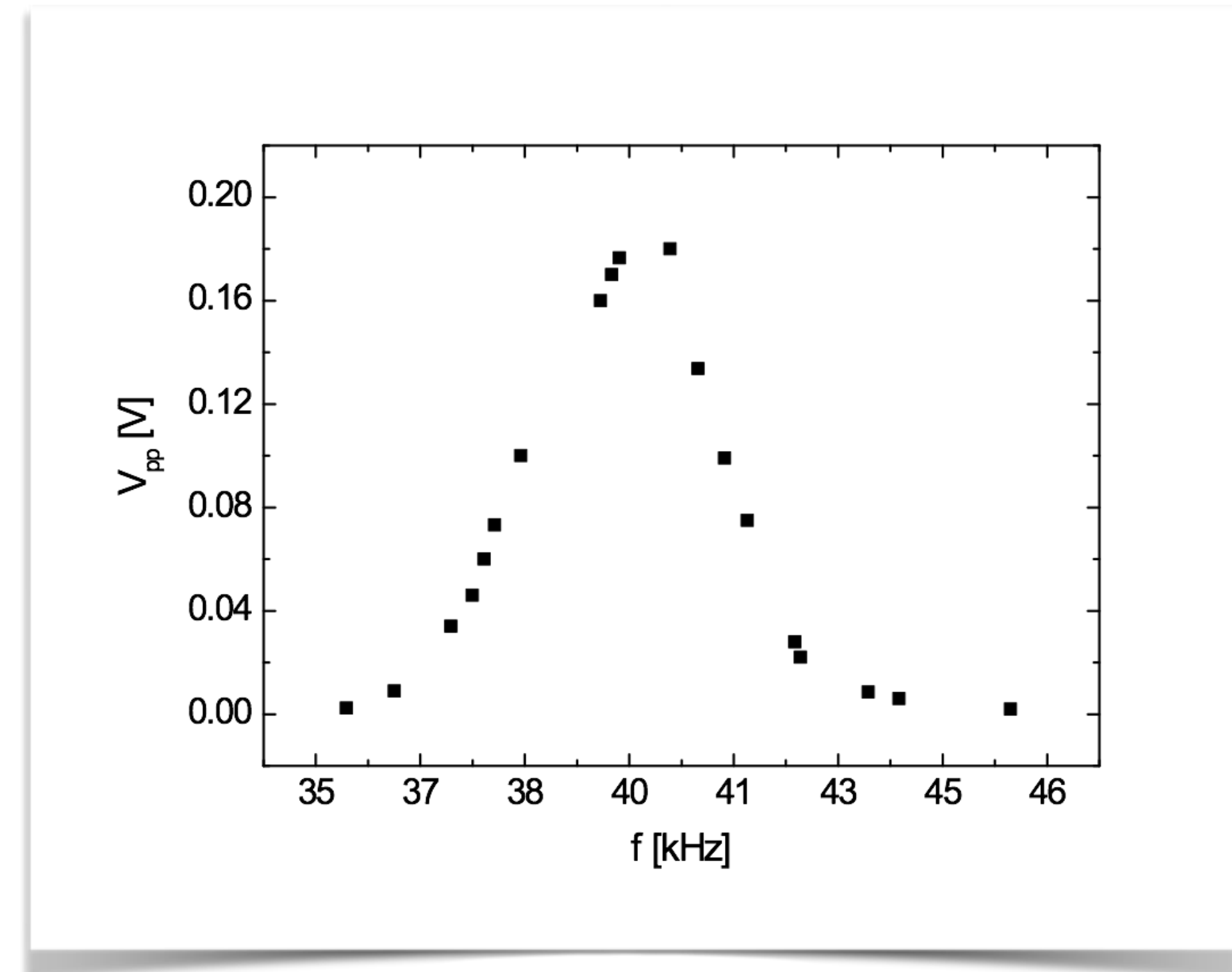
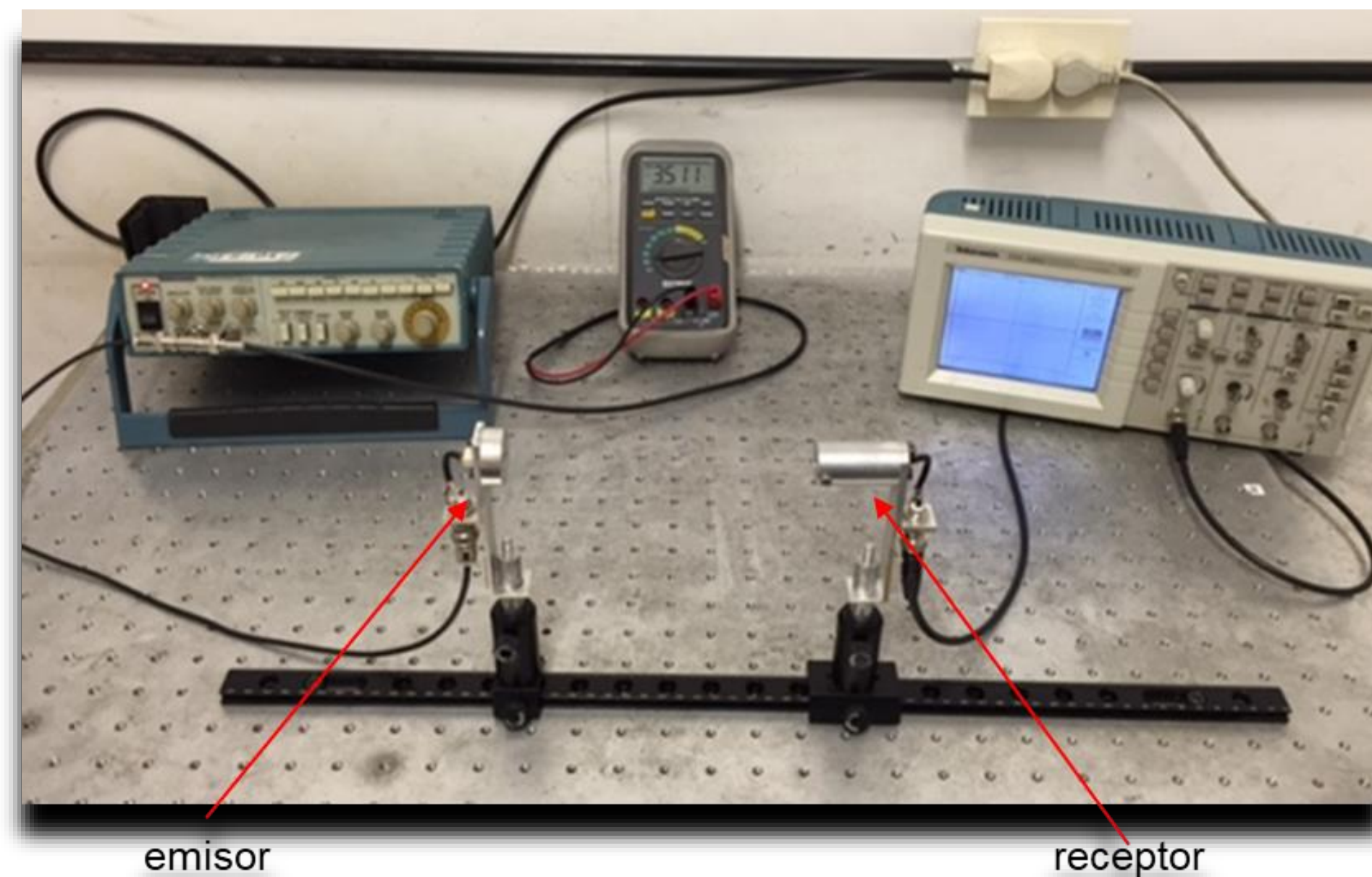




## Emisor - receptor en rango de ultrasonido

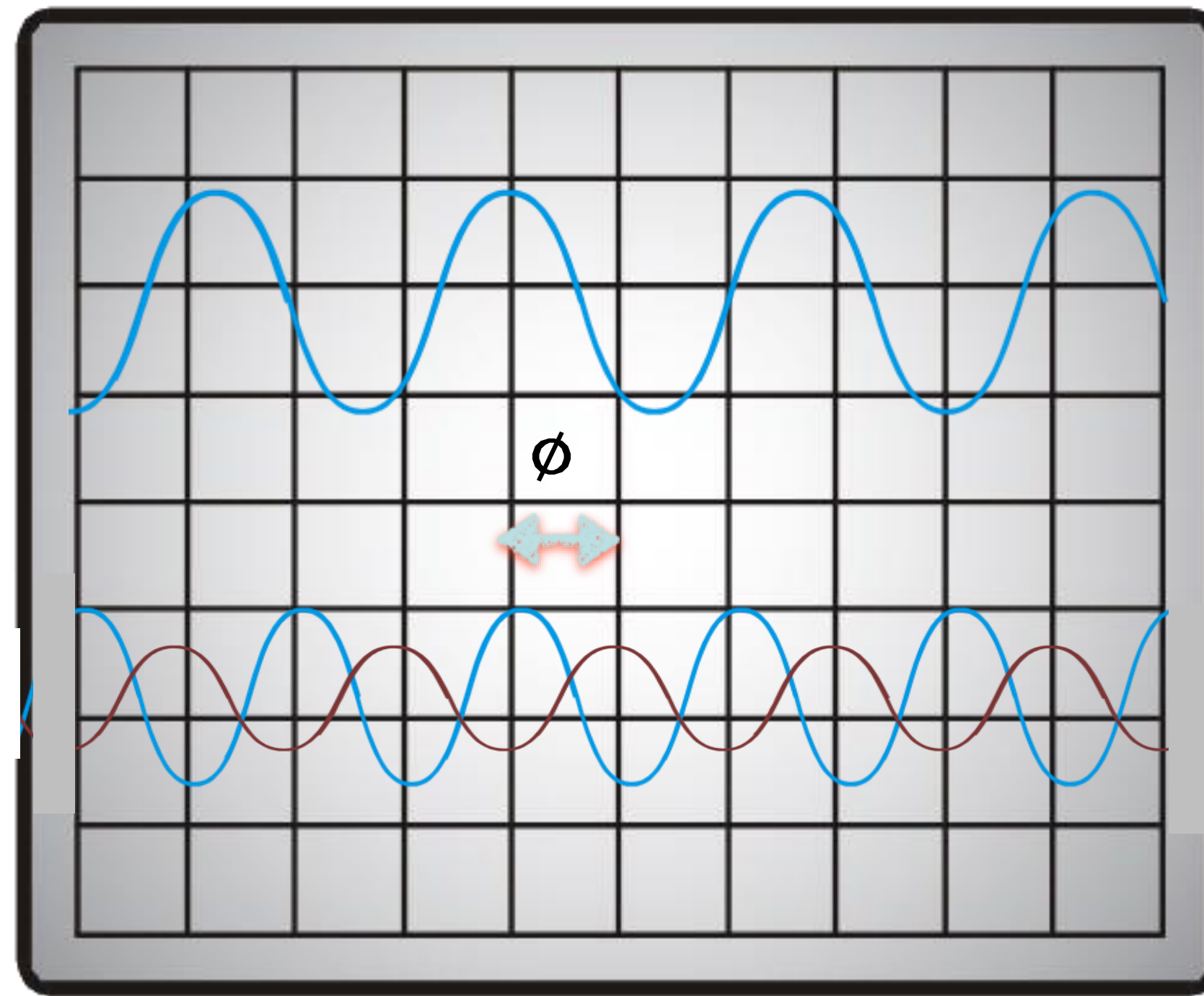


- Se realizó la caracterización temporal (en frecuencias) del sistema Emisor - Recetor de ultrasonido con distintas experiencias
- ¿ Se encontró alguna frecuencia característica donde se maximice la señal del sistema emisor - receptor ?
- Se analizó la linealidad del sistema.
- Se preparó un gráfico  $V_{pp}$  (receptor) vs frecuencia.



Emisor

$f_0$



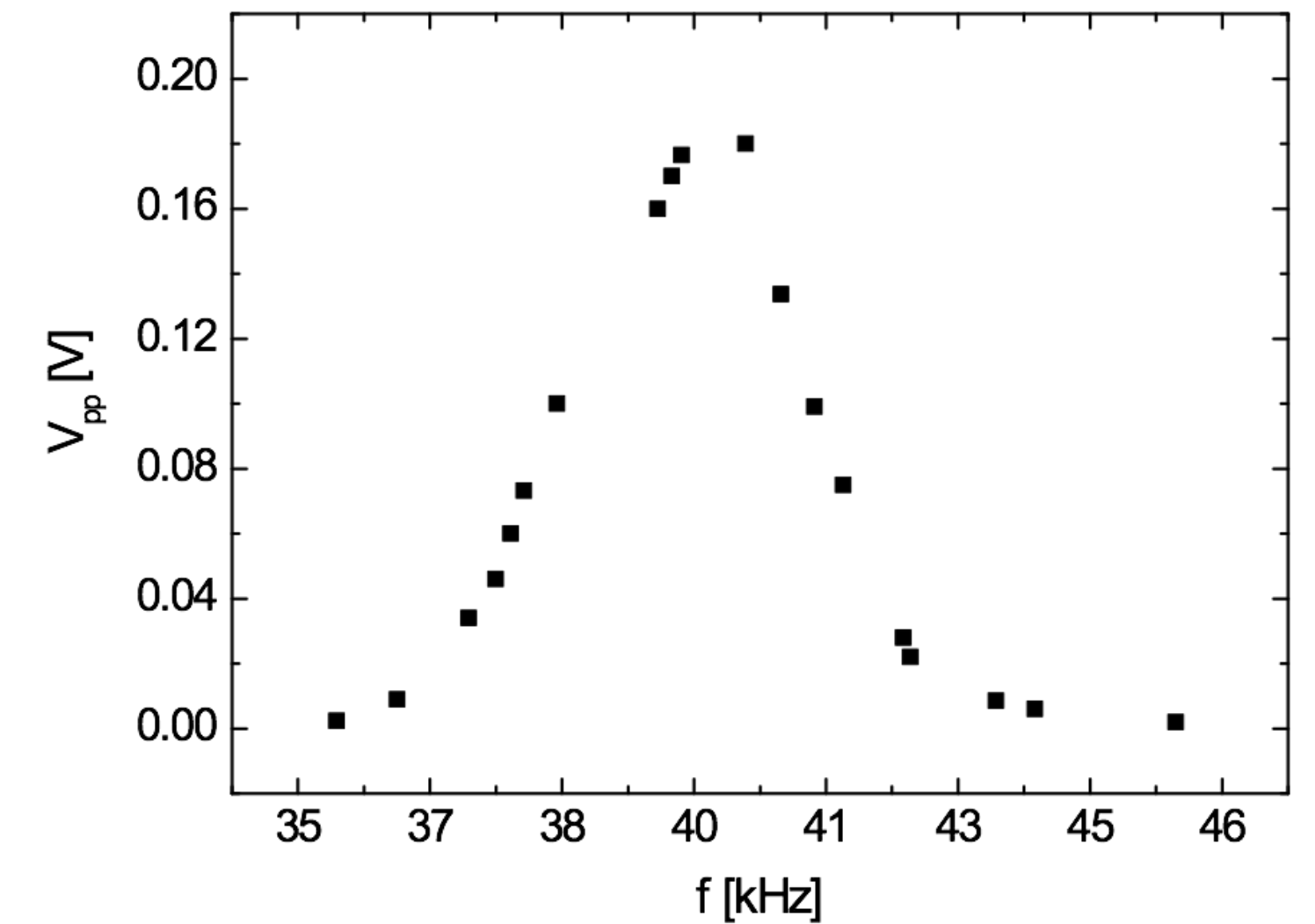
Receptor

$f \neq f_0$

- Se produce un desfase  $\phi$  entre la onda emitida y la recibida.

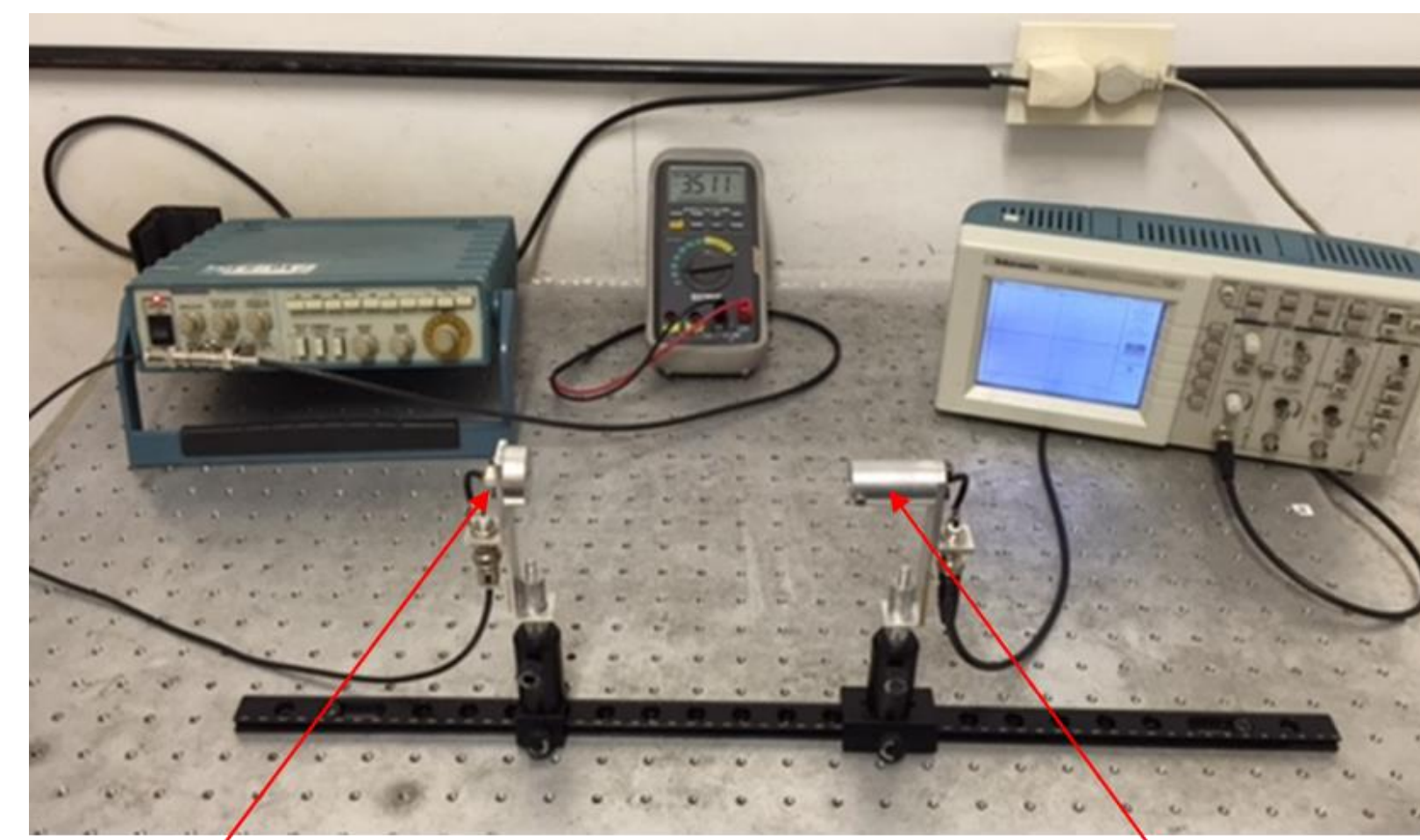
Ambas señales están en fase a la frecuencia característica

- En la frecuencia característica  $f_0$  se observa una señal en el receptor.
- Si varía la frecuencia del emisor alrededor de la frecuencia característica, se reduce la señal en que se detecta en receptor.
- Se puede construir un gráfico de  $V_{pp}$  vs frecuencia



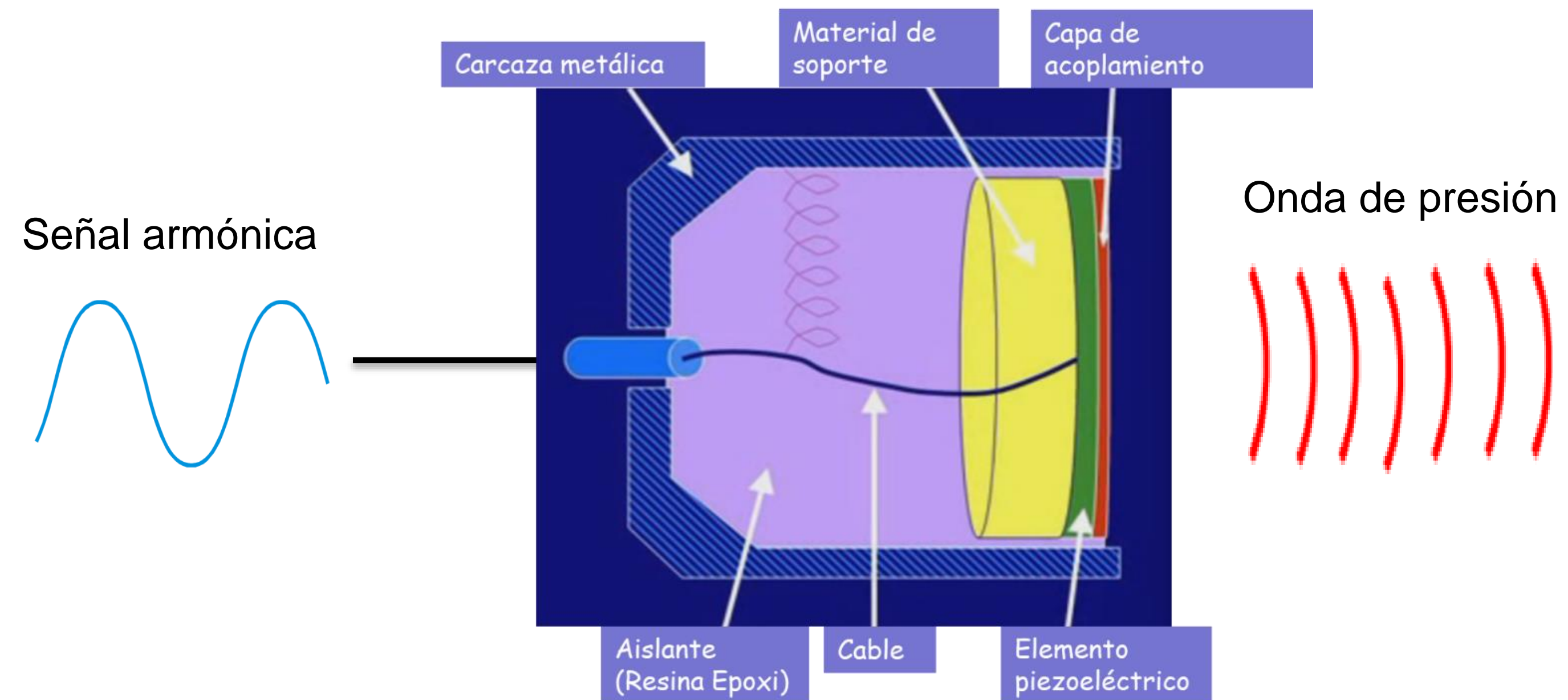


- Volvamos a nuestros transductores de ultrasonido.
- Son materiales piezoeléctricos que transforman energía eléctrica en mecánica (pueden generar entonces ondas de presión, sonido) y viceversa.
- Simplificando, en la experiencia los usamos como parlante y micrófono en el rango de ultrasonido.



emisor

receptor



# Modelo mecánico equivalente de un piezoeléctrico

## Oscilador libre amortiguado

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = 0$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} + \omega_o^2 x = 0$$

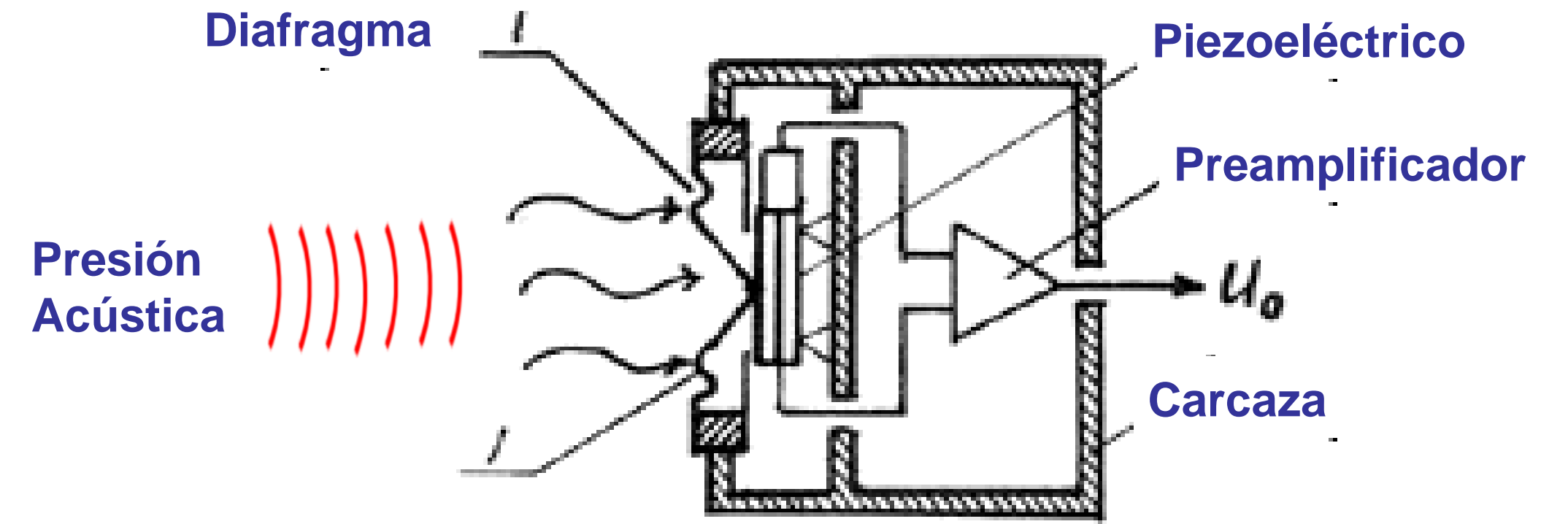
$$\omega_o^2 = \frac{k}{m}$$

$$\gamma = \frac{b}{m}$$

$$\gamma < \omega_o \quad x = Ae^{-\gamma \frac{t}{2}} \cos(\omega t + \alpha) \quad \omega^2 = \omega_o^2 - \frac{\gamma^2}{4}$$

$$\gamma = \omega_o \quad x = (A + Bt)e^{-\gamma \frac{t}{2}}$$

$$\gamma > \omega_o \quad x = Ae^{-\gamma \frac{t}{2}} \sinh(\omega t + \alpha)$$



## Osc. forzado amortiguado

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} + \omega_o^2 x = \frac{f_o}{m} \cos(\omega t)$$

$$x = x_{hom}(t) + x_{part}(t)$$

$$x = x_{hom}(t) + A_p \cos(\omega t + \alpha)$$

$$x_{hom}(t \gg 1) \rightarrow 0$$

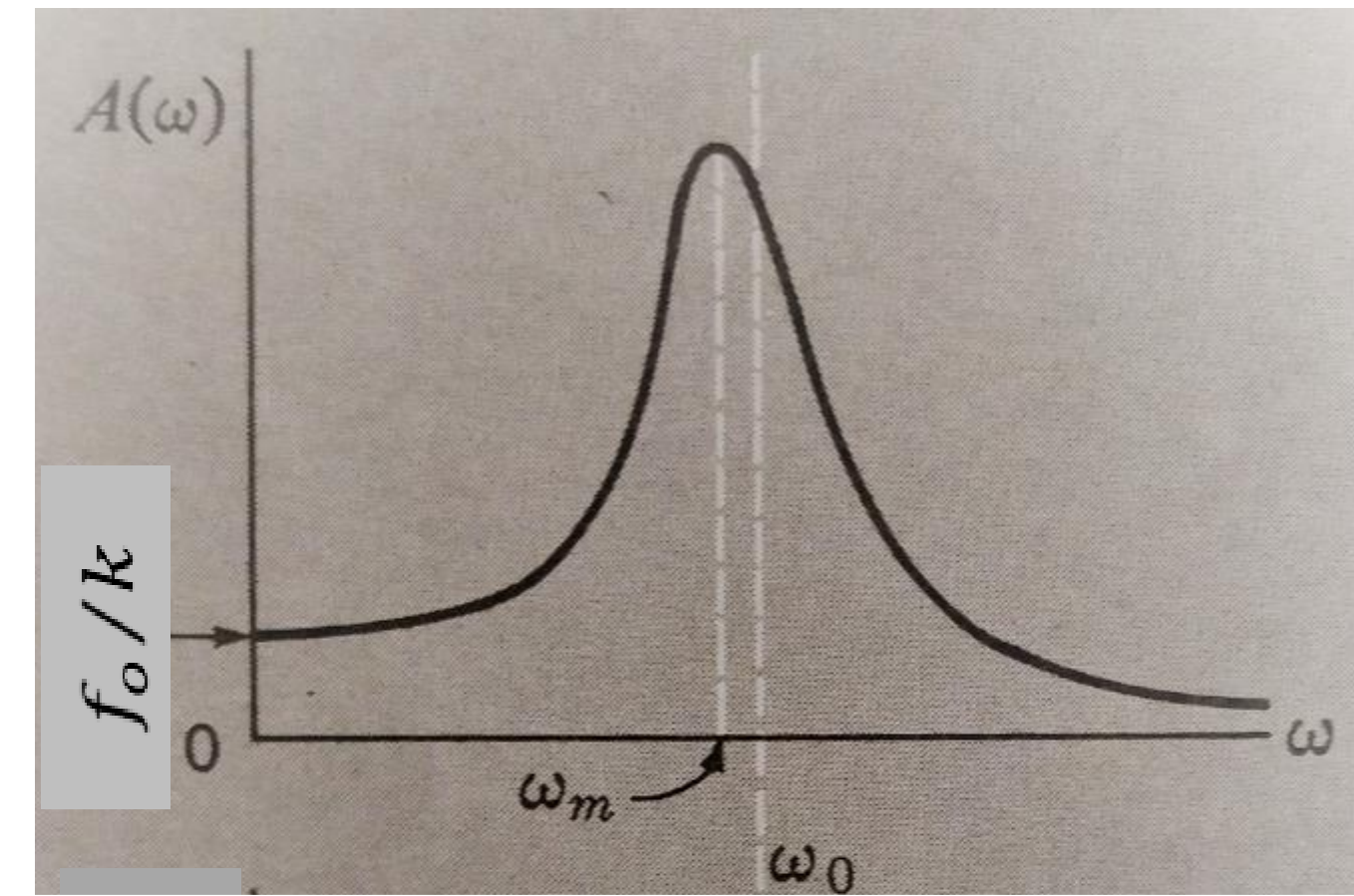
$$A_p = \frac{f_o/m}{[(\omega_o^2 - \omega^2)^2 + (\gamma\omega)^2]^{1/2}}$$

$$\alpha = \arctg \frac{\gamma\omega}{\omega_o^2 - \omega^2}$$



¿ Que pasa con amplitud ?

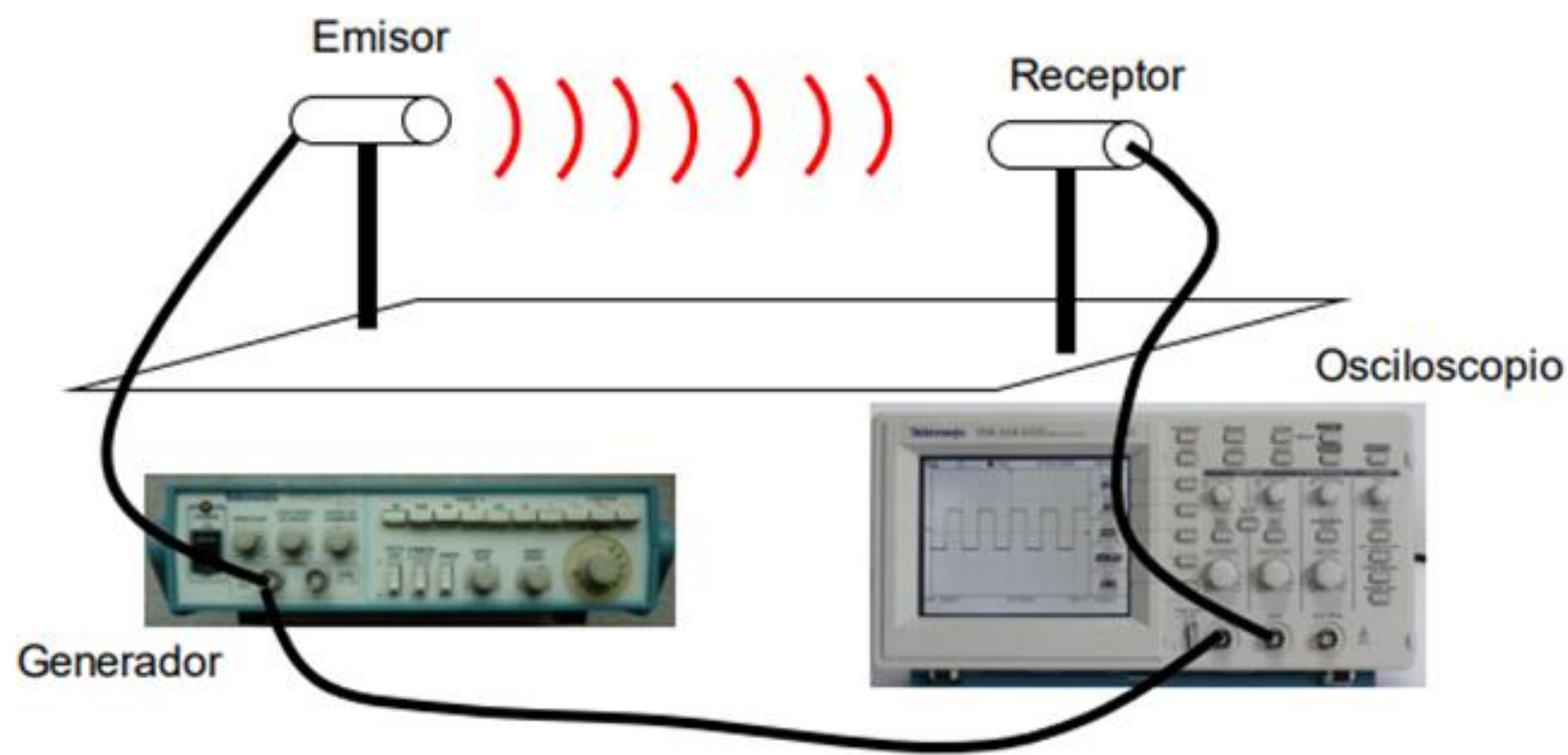
$$A_p = \frac{f_o/m}{[(\omega_o^2 - \omega^2)^2 + (\gamma\omega)^2]^{1/2}}$$



¿ Que pasa con la fase ?

$$\alpha = \arctg \frac{\gamma\omega}{\omega_o^2 - \omega^2}$$

Podemos ajustar la campana de resonancia obtenida al modelo del oscilador forzado amortiguado y obtener los parámetros del modelo.



$$|x_1(\omega)| = A \frac{1}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega\gamma)^2}}$$

Planteamos la ecuación en el piezoeléctrico del receptor donde se lo fuerza con

$$B(\omega)e^{i\omega t}$$

$$\ddot{x}_2 + \gamma_2 \dot{x}_2 + \omega_{o2} x_2 = B(\omega)e^{i\omega t}$$

Como la ecuación diferencial es lineal la solución será simplemente la suma de las soluciones para todas las frecuencias

$$x_2(t) = \int x_2(\omega)e^{i\omega t} d\omega$$

$$x_2(\omega) = \frac{Ae^{i\omega t}}{[(\omega_{o1}^2 - \omega^2) + i\omega\gamma_1][(\omega_{o2}^2 - \omega^2) + i\omega\gamma_2]}$$

$$|x_2(\omega)| = \text{sqrt}\left( A \cdot \frac{[(\omega_{o1}^2 - \omega^2)(\omega_{o2}^2 - \omega^2) - \omega^2\gamma_1\gamma_2]^2 + [(\omega_{o2}^2 - \omega^2)\omega\gamma_1 + (\omega_{o1}^2 - \omega^2)\omega\gamma_2]^2}{[(\omega_{o1}^2 - \omega^2)^2 + (\omega\gamma_1)^2] \cdot [(\omega_{o2}^2 - \omega^2)^2 + (\omega\gamma_2)^2]} \right)$$

Si los piezoeléctricos de emisor y receptor son iguales

$$\left. \begin{array}{l} \omega_{o1} = \omega_{o2} = \omega_0 \\ \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$|x_2(\omega)| = C \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega\gamma)^2}$$



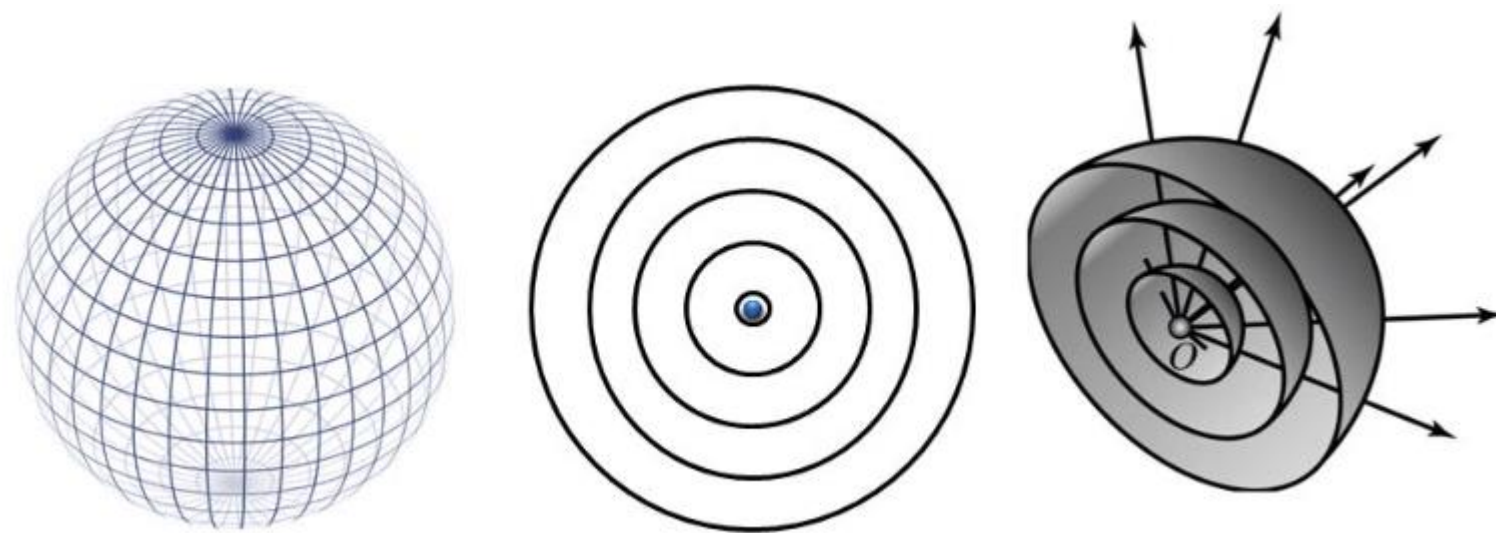
## Caracterización espacial del frente de onda

$$\nabla^2 \psi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad \text{Ecuación de onda}$$

$$\psi(r, t) = A(r) \text{sen}(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \phi)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k = 2\pi/\lambda \\ \omega = 2\pi f = 2\pi/T \\ v = f\lambda \end{array} \right.$$

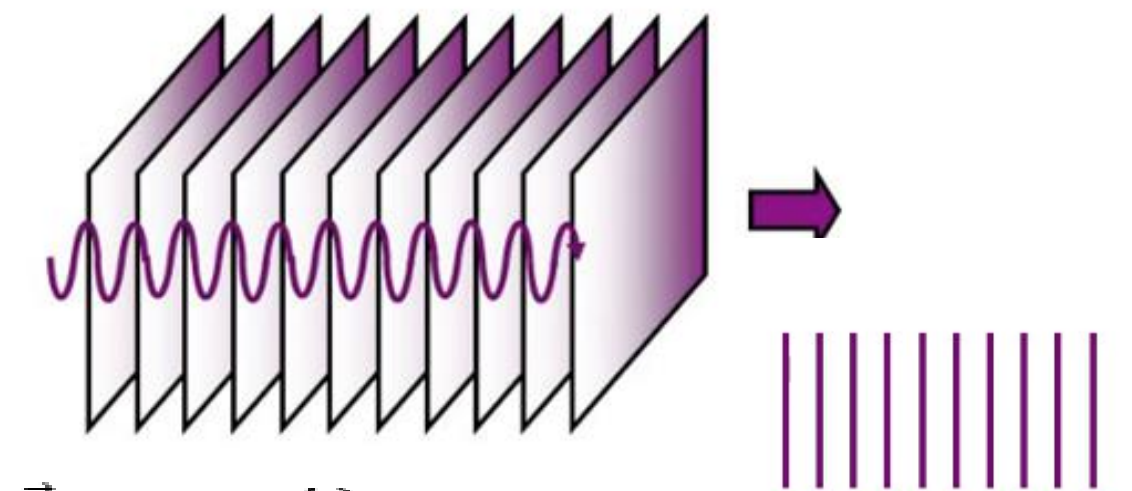
- La representación del frente de ondas de **una onda esférica** es de cáscaras esféricas concéntricas (en el foco/fuente puntual) separadas por una longitud de onda  $\lambda$ .
- Esos planos son perpendiculares al radio de las cáscaras esféricas.



$$\psi(r, t) = \left(\frac{A}{r}\right) e^{-i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \phi)}$$

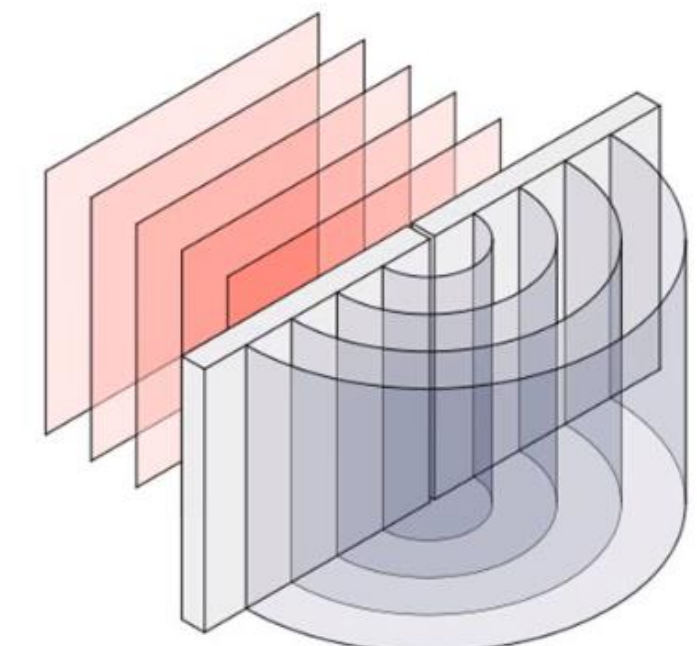
- **Frente de onda**: El lugar geométrico que une todos los puntos que, en un instante dado, se encuentran en idéntico estado de vibración: **tienen igual fase**.

- En **una onda plana** son planos equi-espaciados separados por una longitud de onda  $\lambda$ .
- Esos planos son perpendiculares a la dirección de propagación.



$$\psi(r, t) = A e^{-i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \phi)}$$

- La representación del frente de ondas de **una onda cilíndrica** es de cáscaras cilíndricas con el mismo eje (fuente lineal) separadas por una longitud de onda  $\lambda$ .
- Esos planos son perpendiculares al radio del cilindro.



$$\psi(\rho, t) = \left(\frac{A}{\sqrt{\rho}}\right) e^{-i(\vec{k} \cdot \vec{\rho} - \omega t + \phi)}$$



# Caracterización espacial del sistema receptor - emisor de ultrasonido

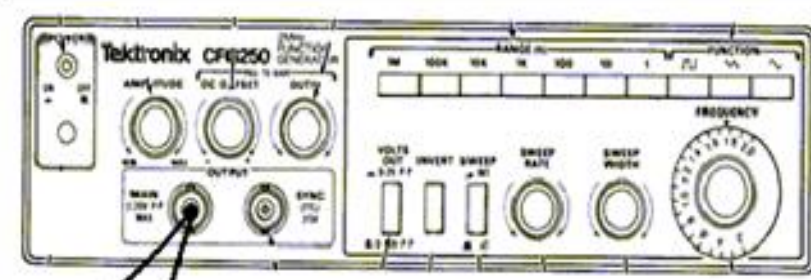
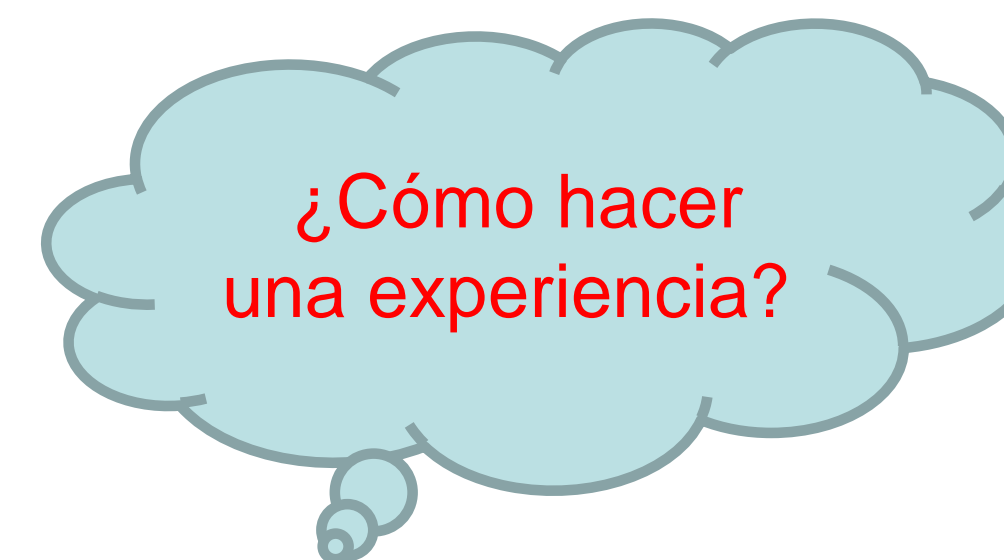
¿Cómo es espacialmente la onda emitida?

$$\text{Amplitud} \sim \left(\frac{1}{r^n}\right)$$



- esférica → La amplitud  $\sim 1/r$
- cilíndrica → La amplitud  $\sim 1/r^{0.5}$
- plana → La amplitud no depende de  $r$
- ¿otra forma?

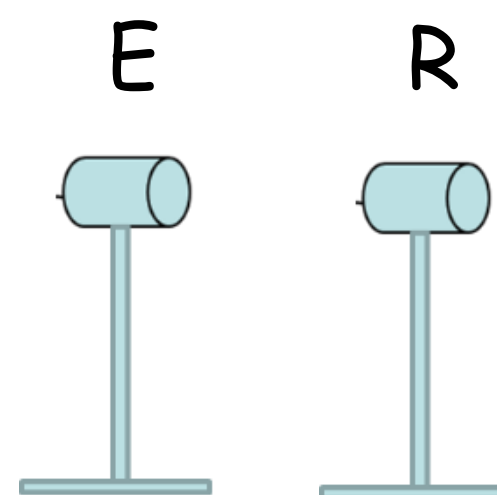
## 1. Dependencia de la amplitud con la distancia



Generador de funciones



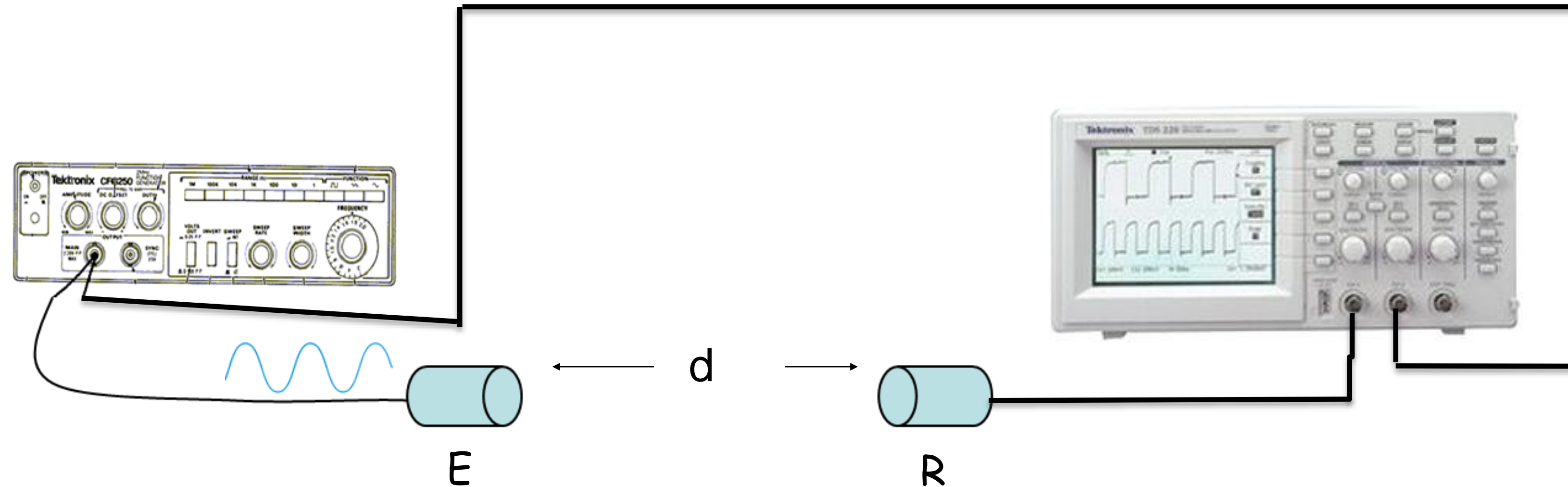
Osciloscopio



Transductores de ultrasonido

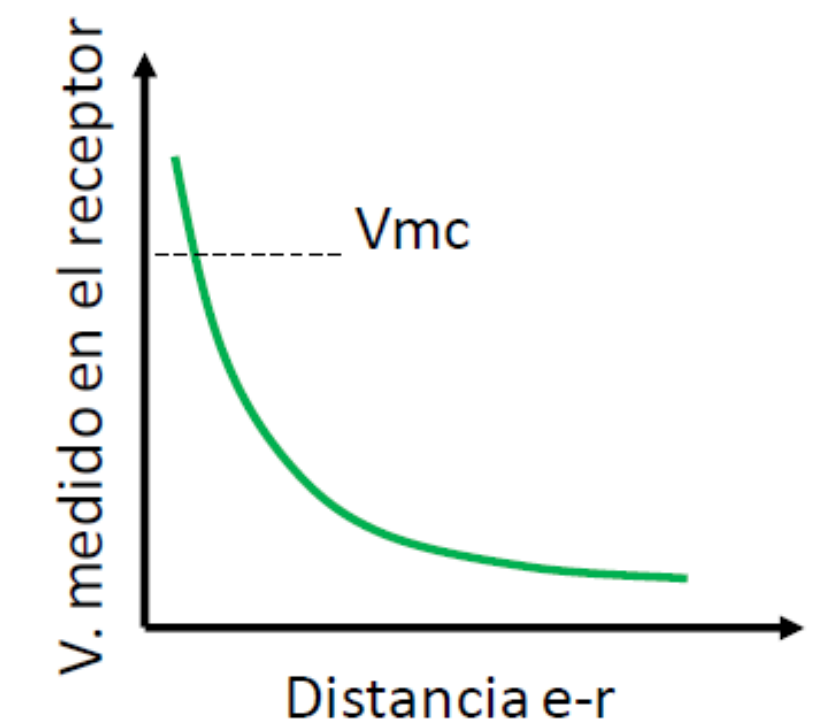
¿Como los conectarían?

# 1. Dependencia de la amplitud con la distancia



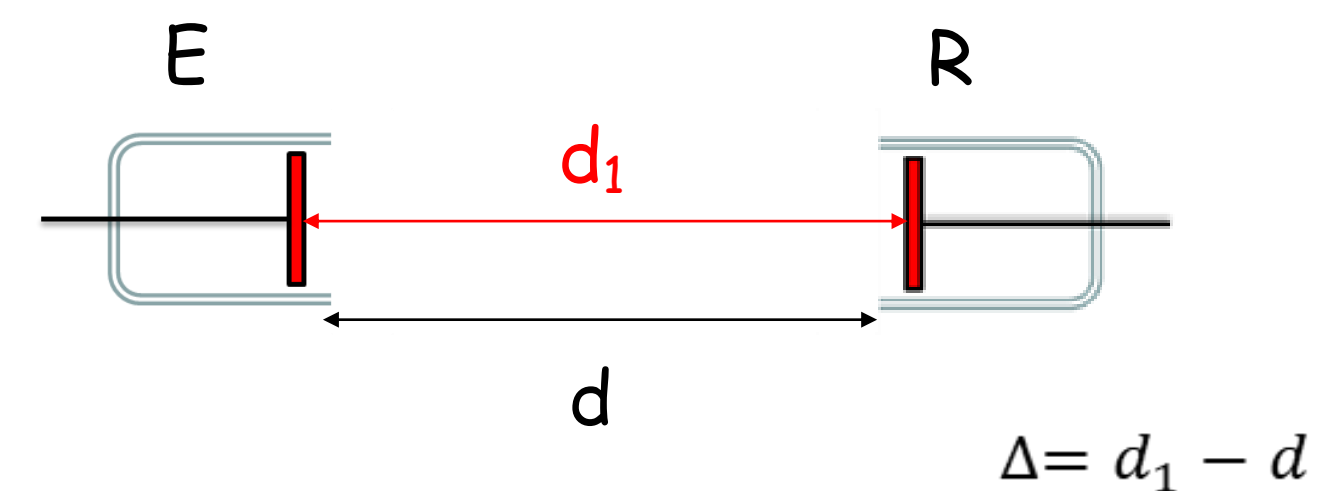
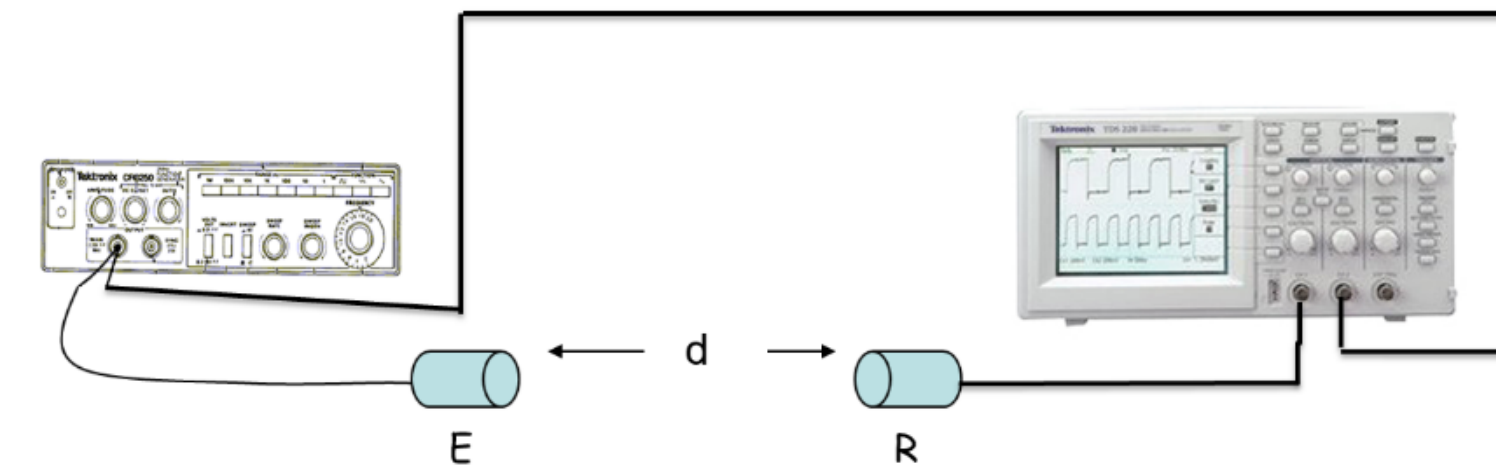
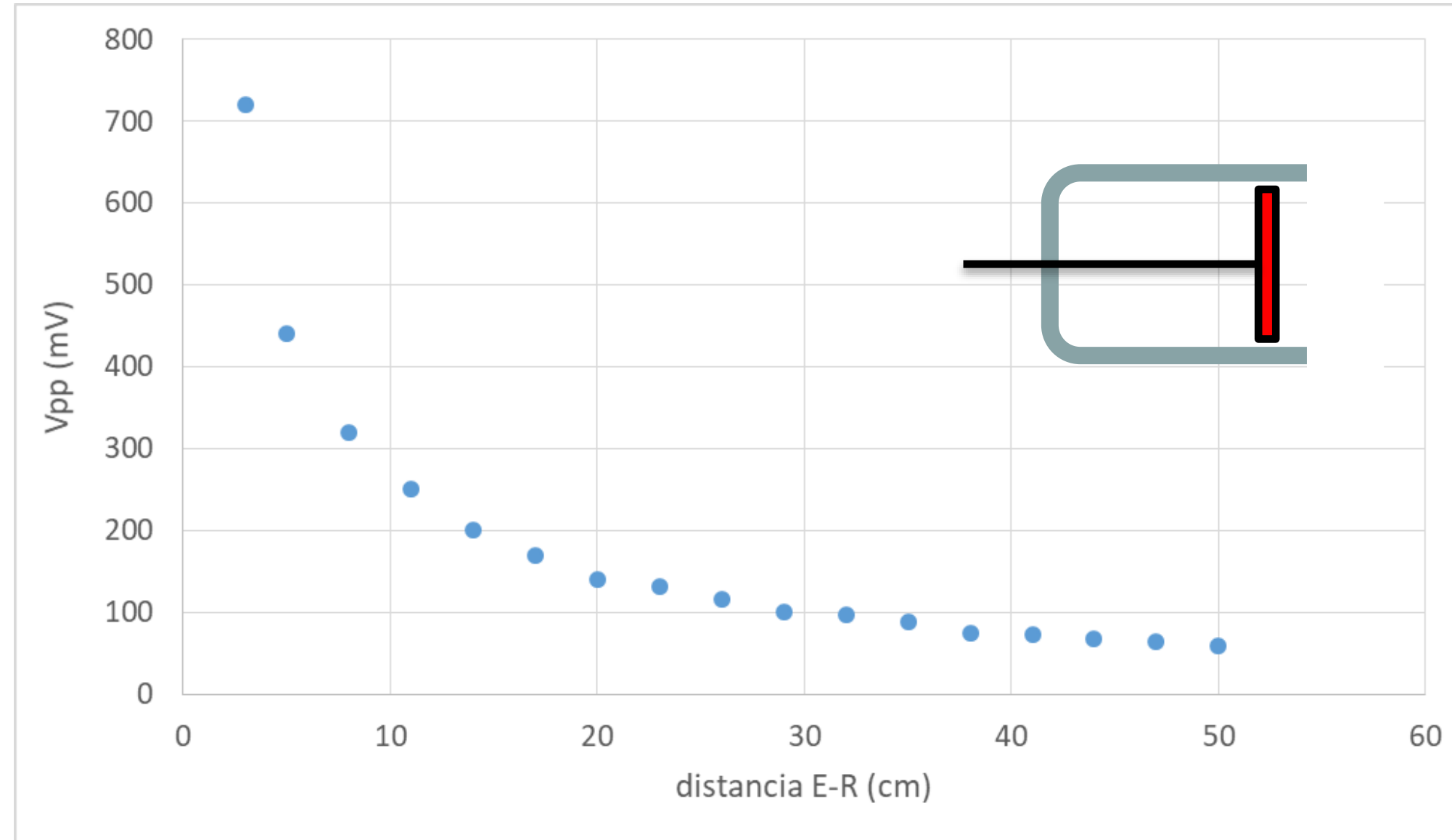
¿ En que condiciones me conviene trabajar?

- Tipo de señal **senoidal**
- Frecuencia **debe ser la característica del sistema.**
- Amplitud alta en la señal que llega actúa en el emisor.
- Encontrar la variación de  $V_{pp}$  del receptor con la distancia E-R,  $V_{pp} = f(d)$
- ¿ Qué observación notoria se infiere a variar la distancia E-R ?
- ¿Cuál señal uso para referencia de trigger ?
- Inferir el tipo de frente de onda



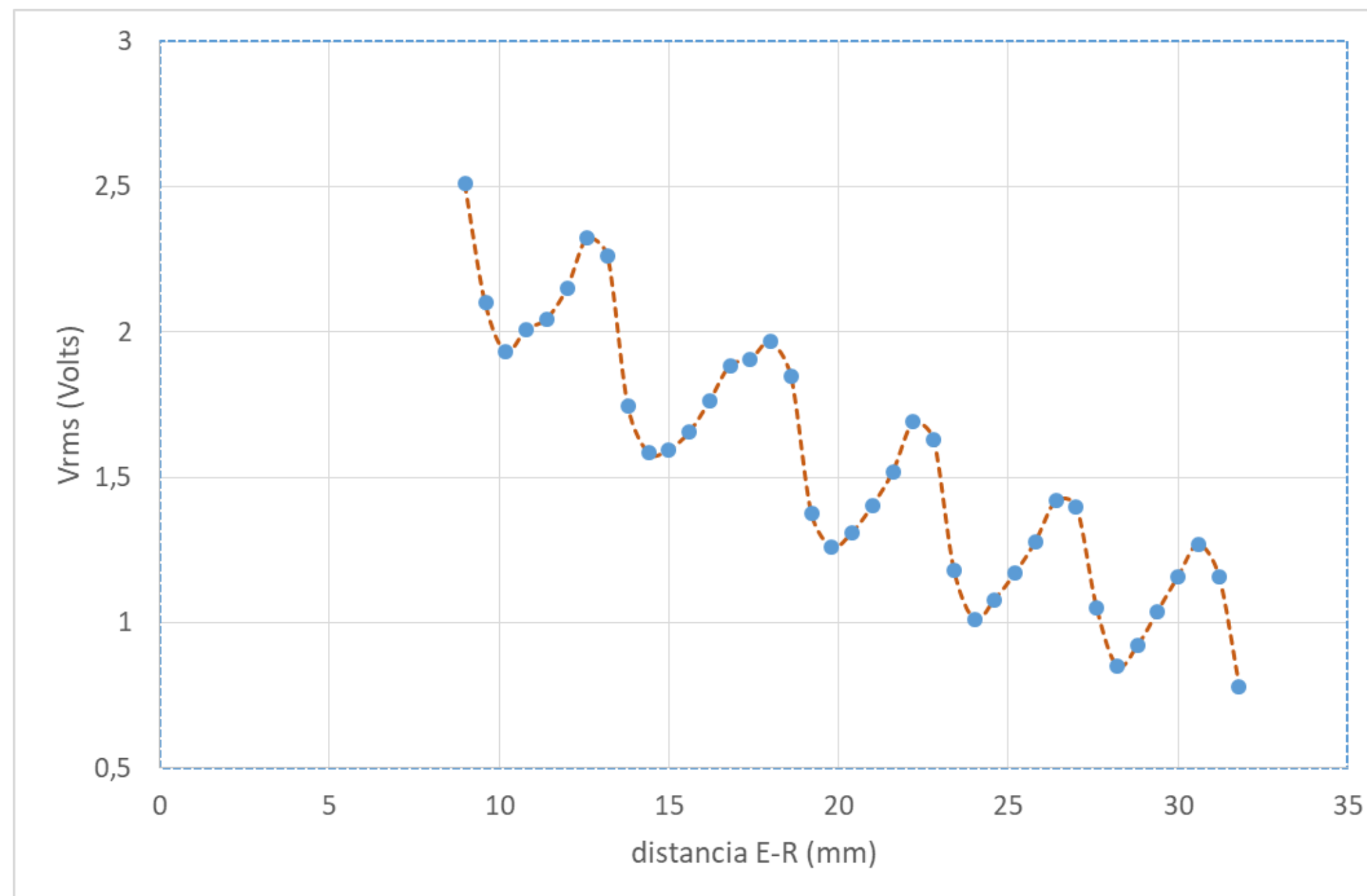


## Recorrido extenso de d

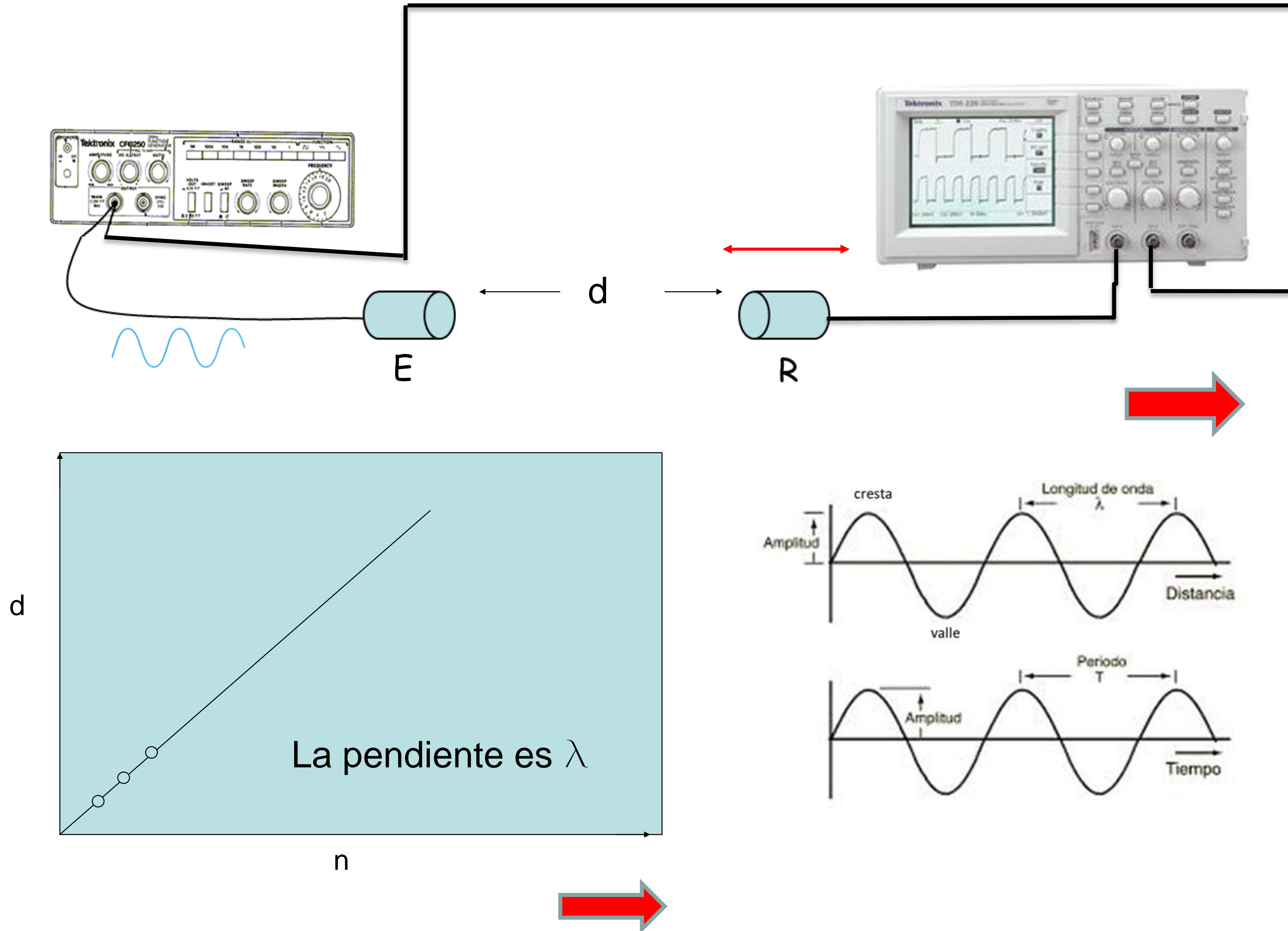


Error en d (cinta métrica)

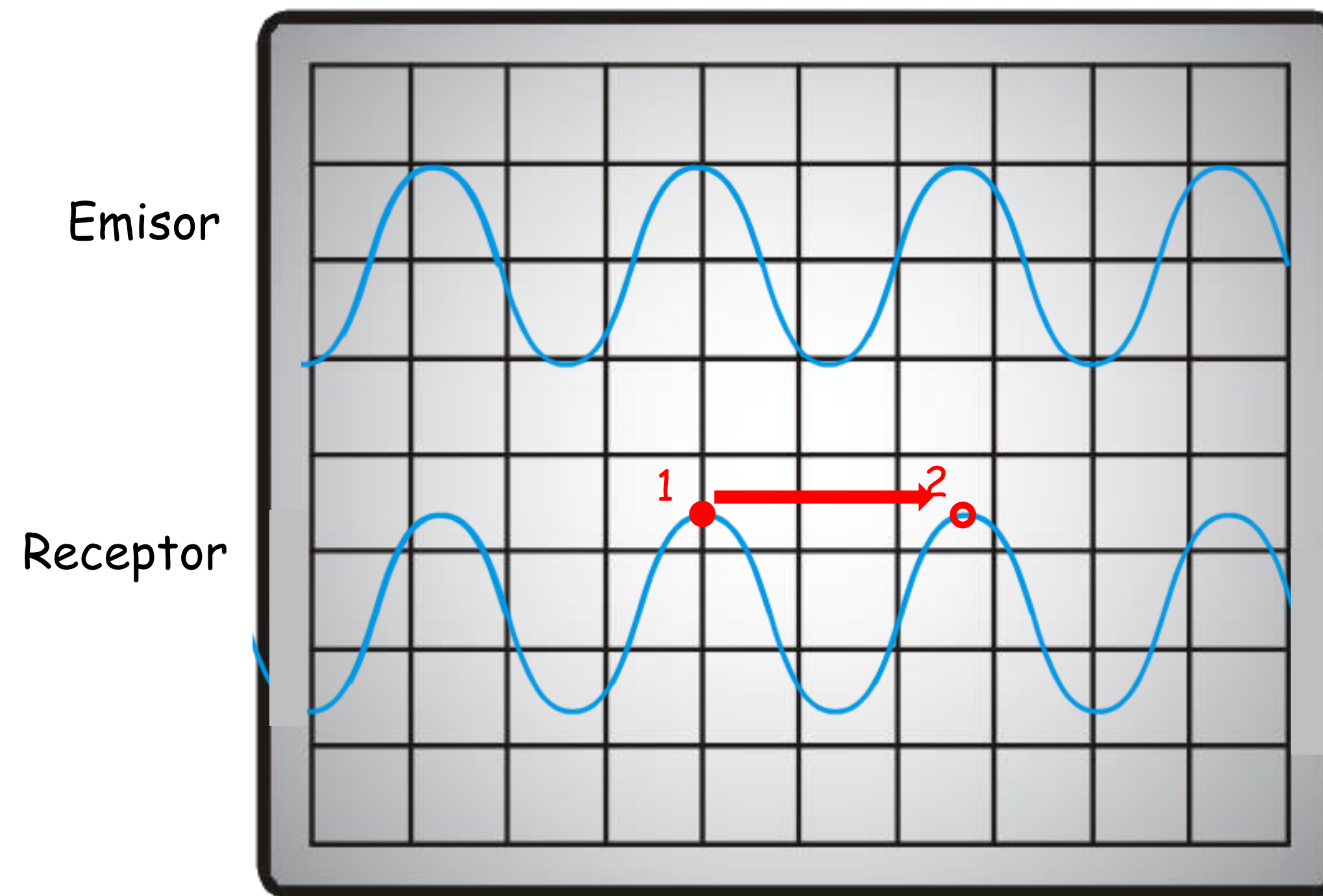
## Recorrido muy pequeño de d



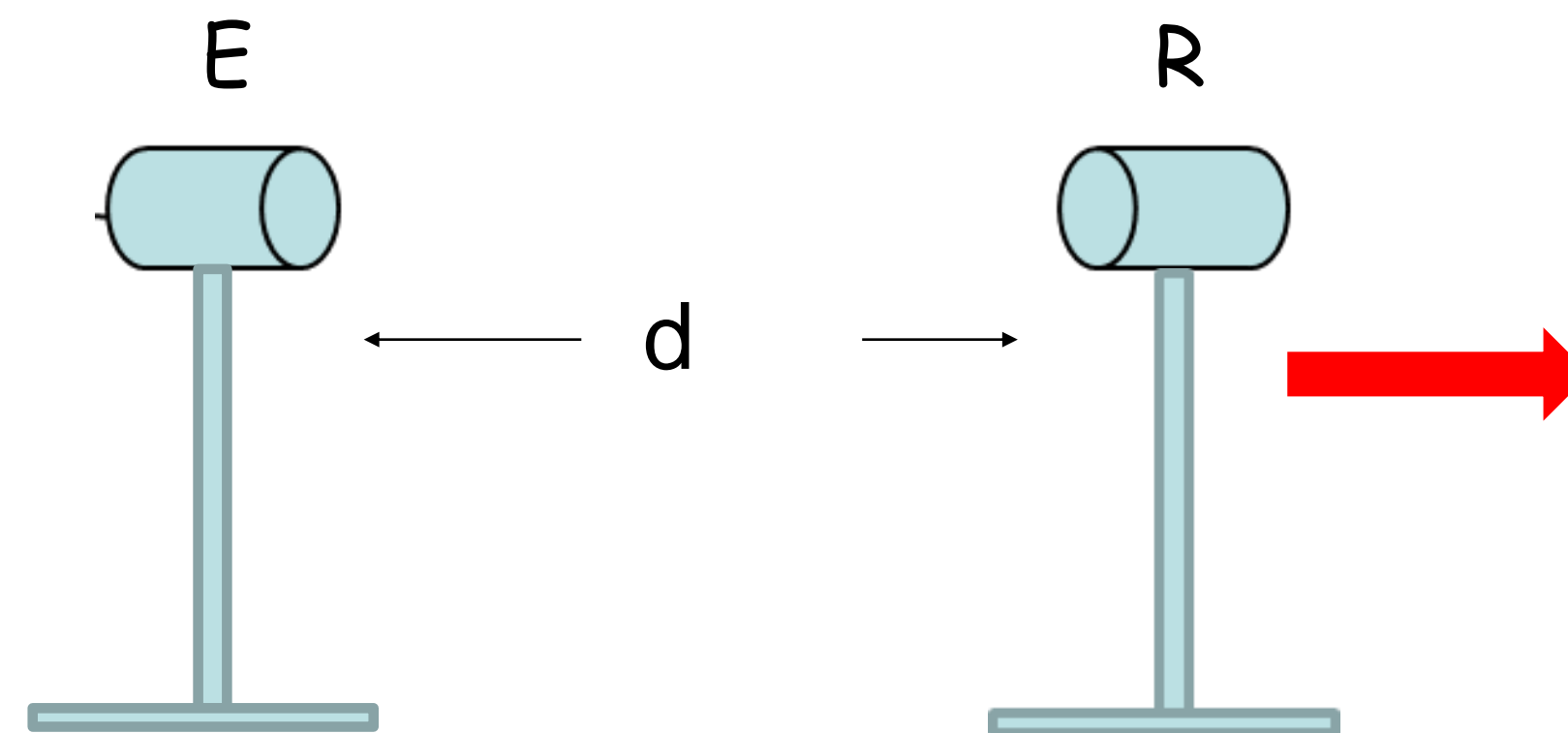
## 2. Estimación de la longitud de onda





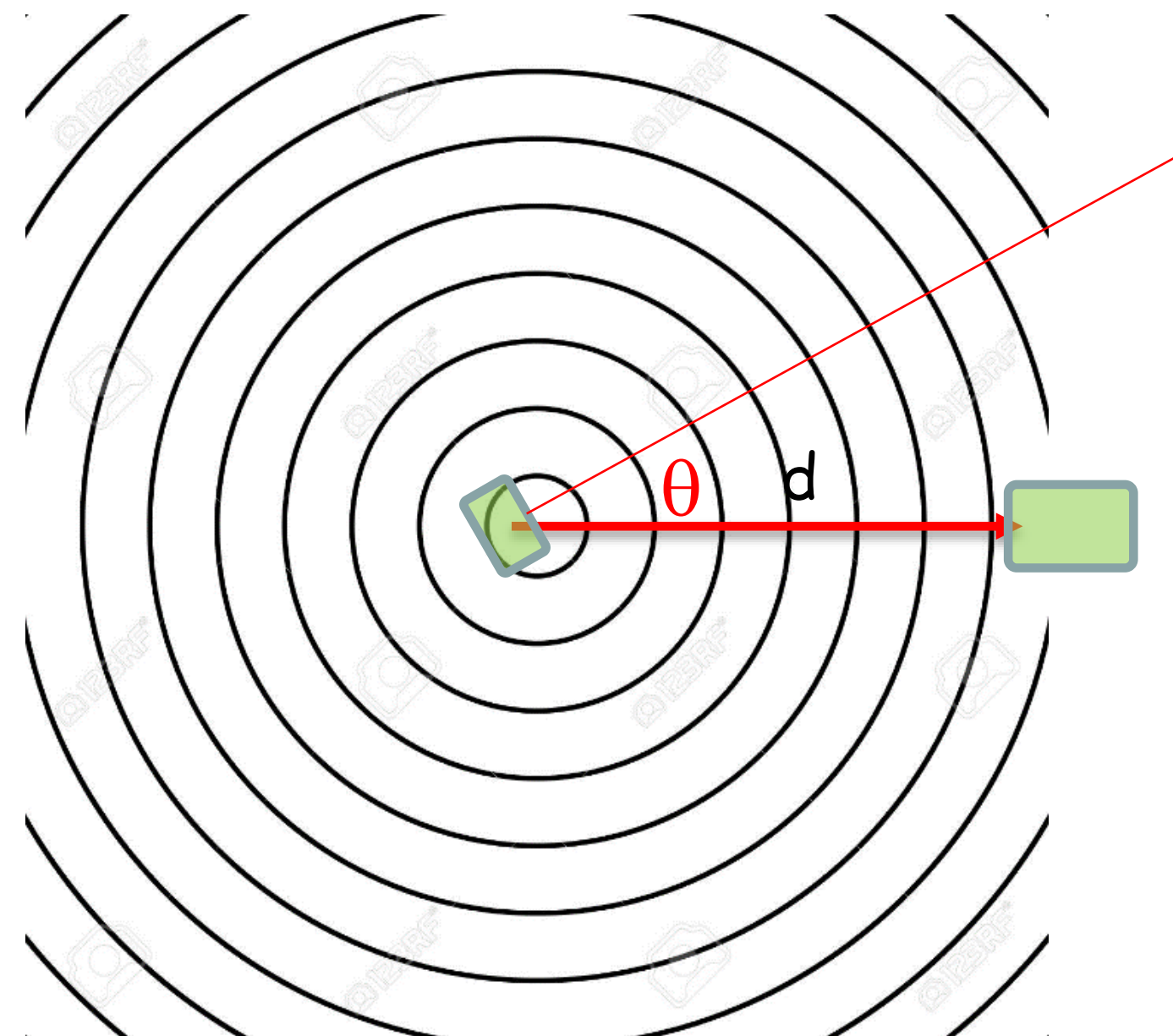
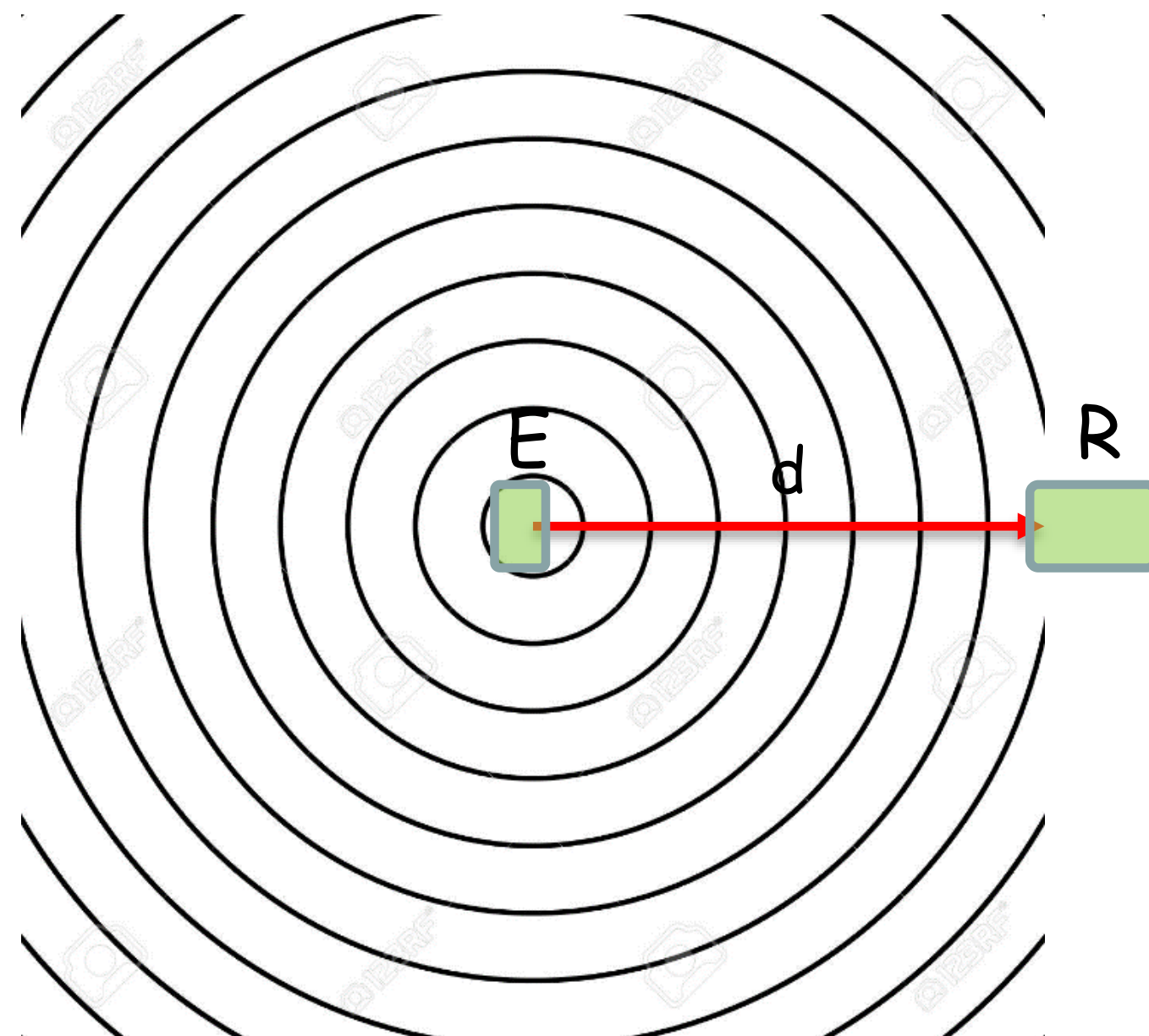
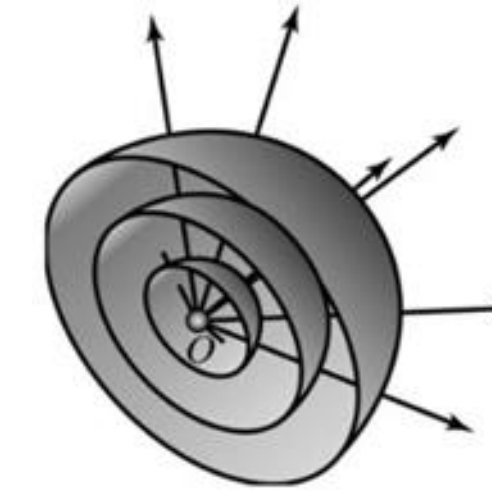


- Si se aleja el detector del emisor, cambia la distancia  $d$ .
- Además de una atenuación (si no fuese onda plana) se produce un desfase entre la onda emitida y la recibida.
- Se pondrán en fase en  $2\pi$ .
- Cuando el punto **1** se ubica en la posición **2** se avanzó  $1\lambda$  en la distancia  $d$

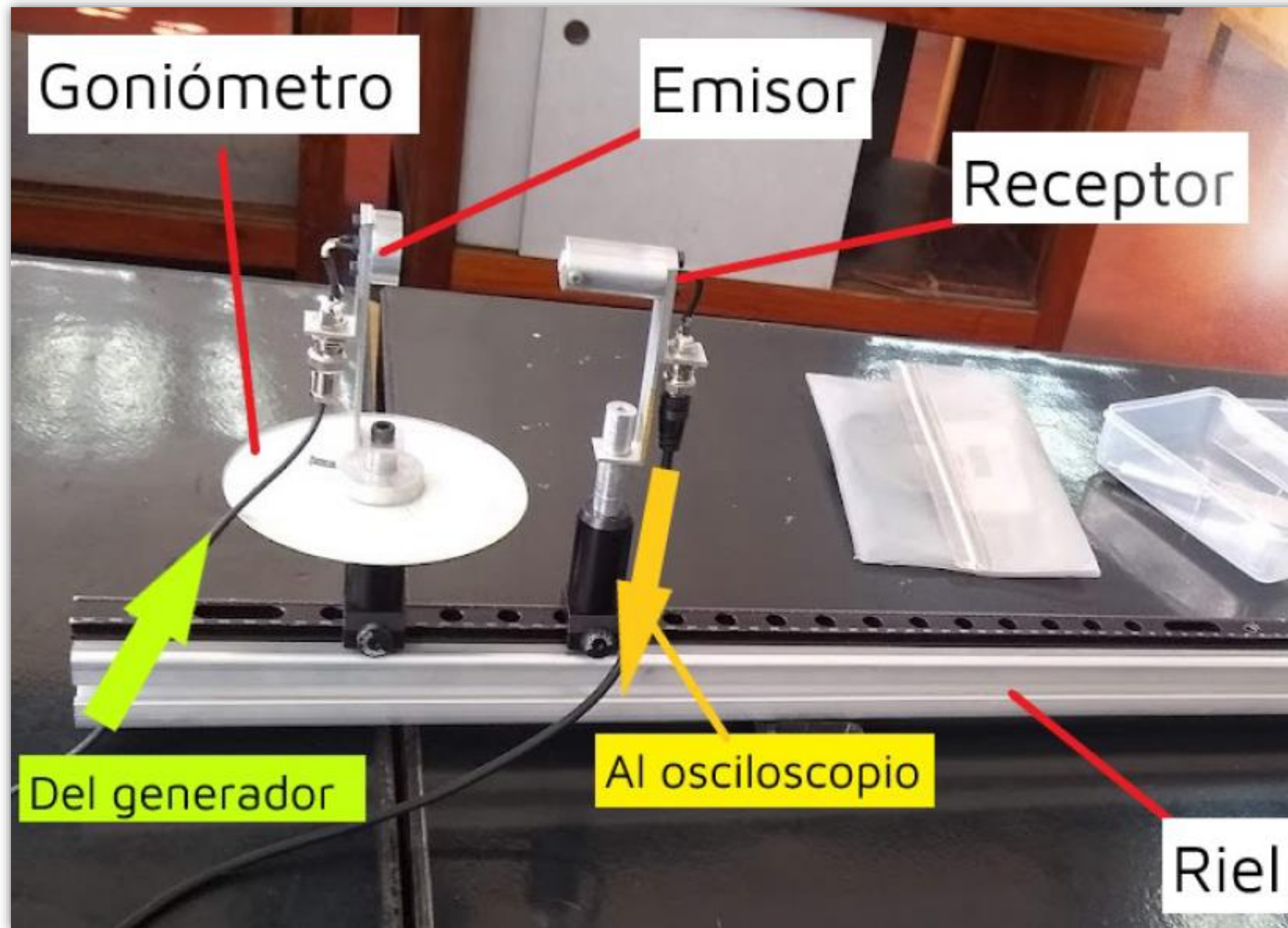


¿ Alcanza solamente con hacer una caracterización con la distancia y la longitud de onda ?

- Supongamos que el frente de ondas fuese esférico.
- Si ambos transductores están en el mismo plano.
- Se aplica una señal senoidal al emisor E.
- Para un frente de onda esférico, si se fija el receptor (R) a una distancia  $d$  del emisor (E) **y se rota el emisor un ángulo  $\theta$**  ¿qué debería suceder con la señal detectada en el receptor (R) ?



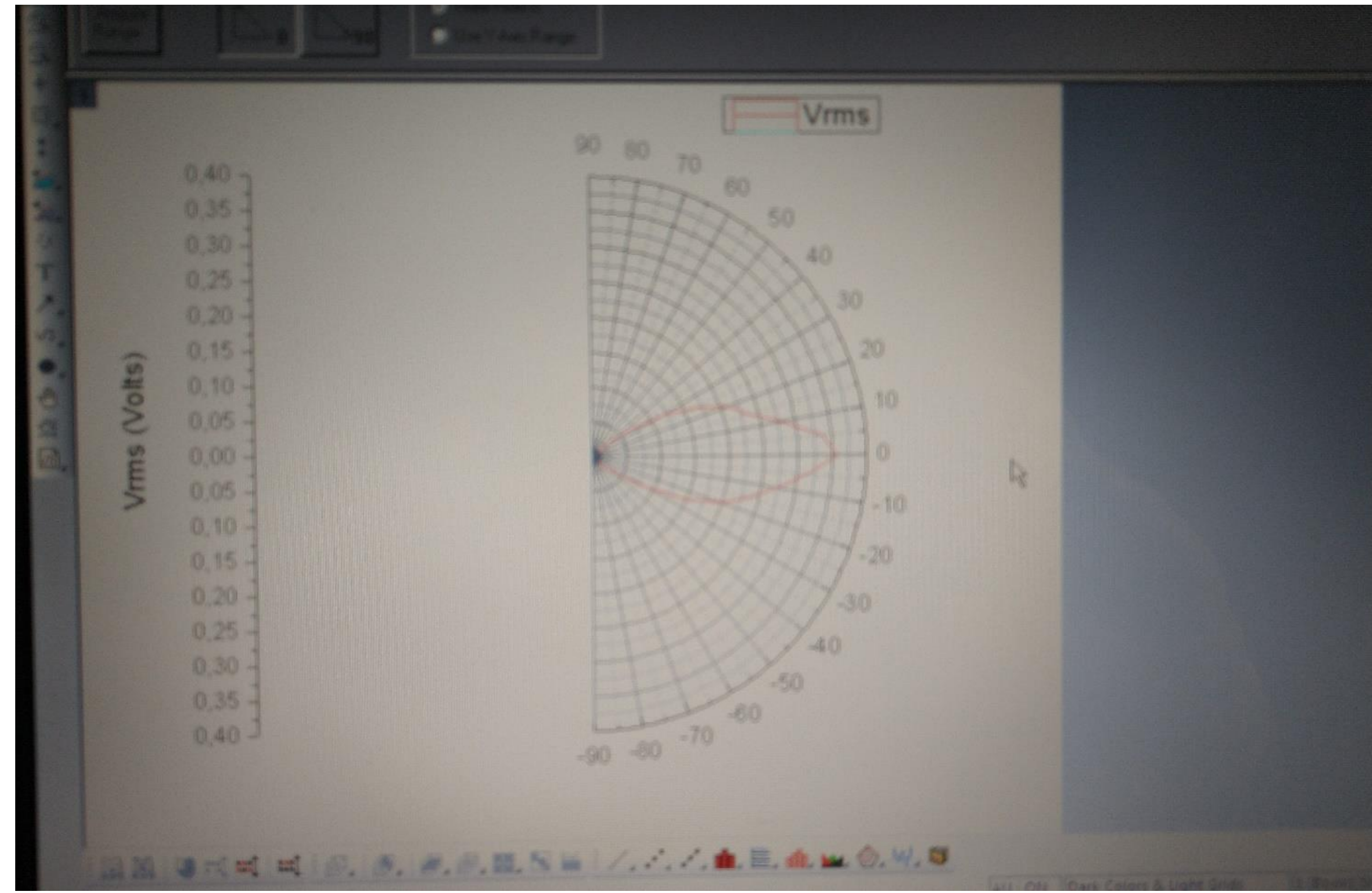
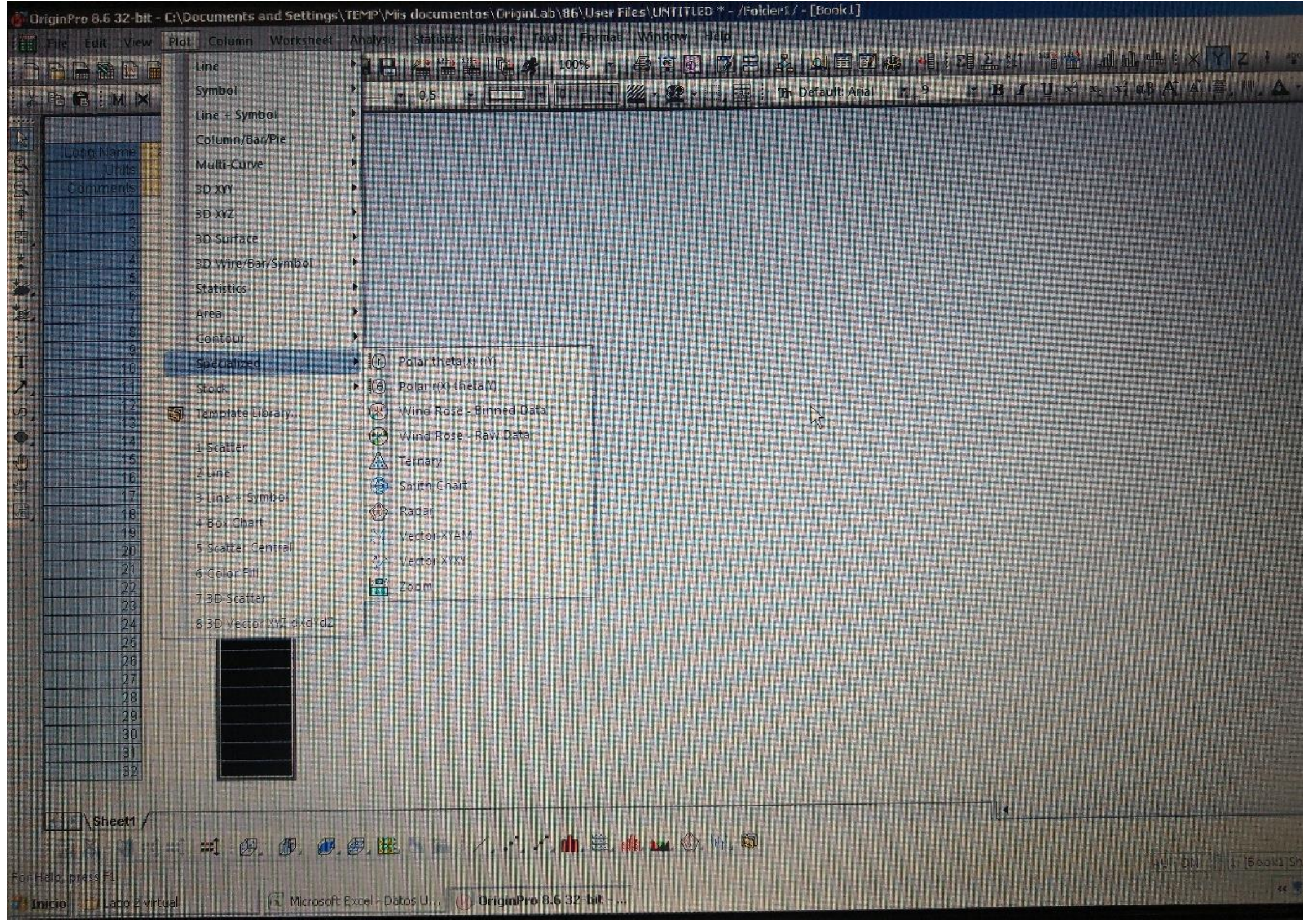




- Se alinean emisor y receptor.
- Se fija una distancia entre emisor y receptor.
- Se establece un  $V_{pp}$  del emisor grande (señal senoidal a la frecuencia característica)
- Se registra en una tabla el ángulo entre emisor y receptor y el  $V_{pp}$  del receptor.
- Se varía en ángulo del emisor entre  $-90^\circ$  y  $90^\circ$  (intervalos de  $5^\circ$ ).
- Se repite la experiencia para otras dos distancias entre emisor y receptor



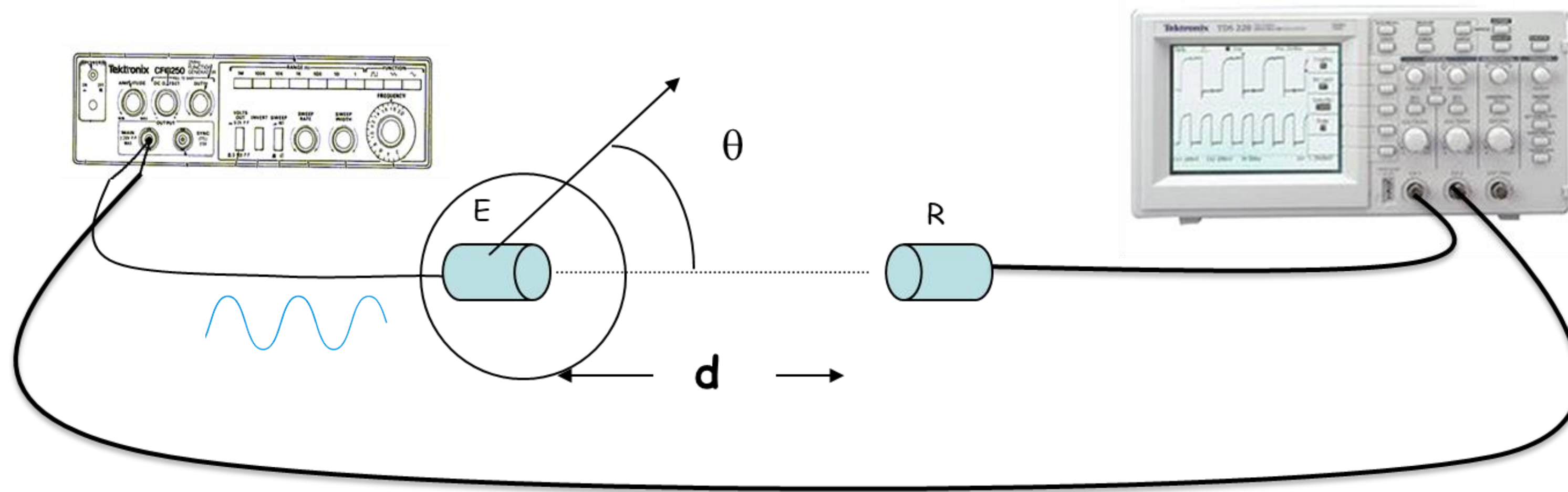
# Representación en coordenadas polares usando Origin



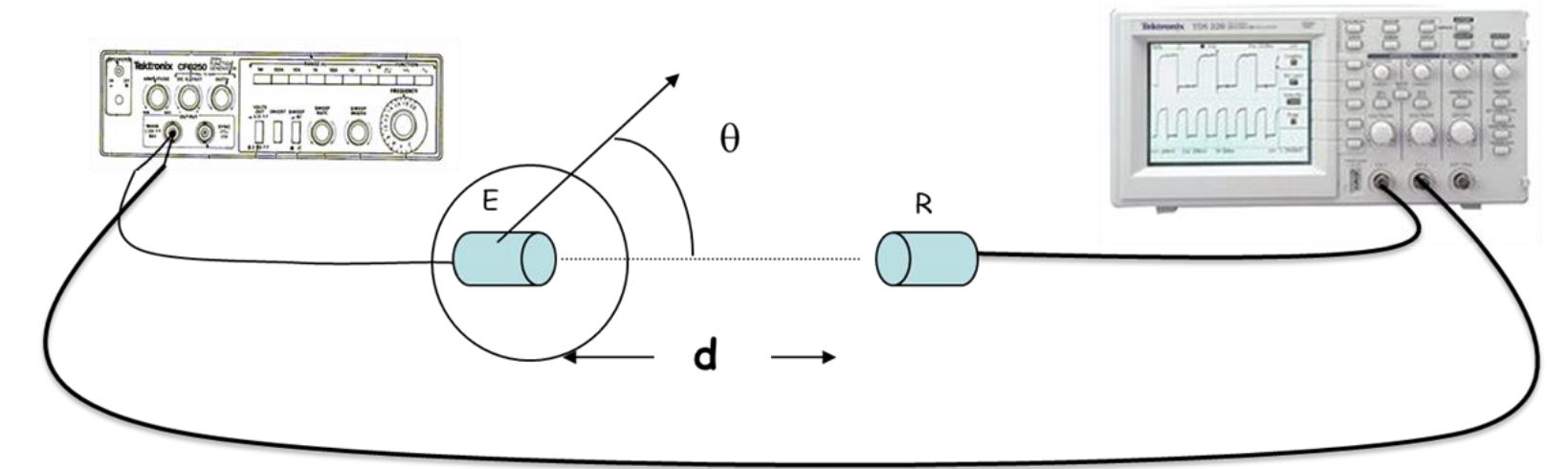
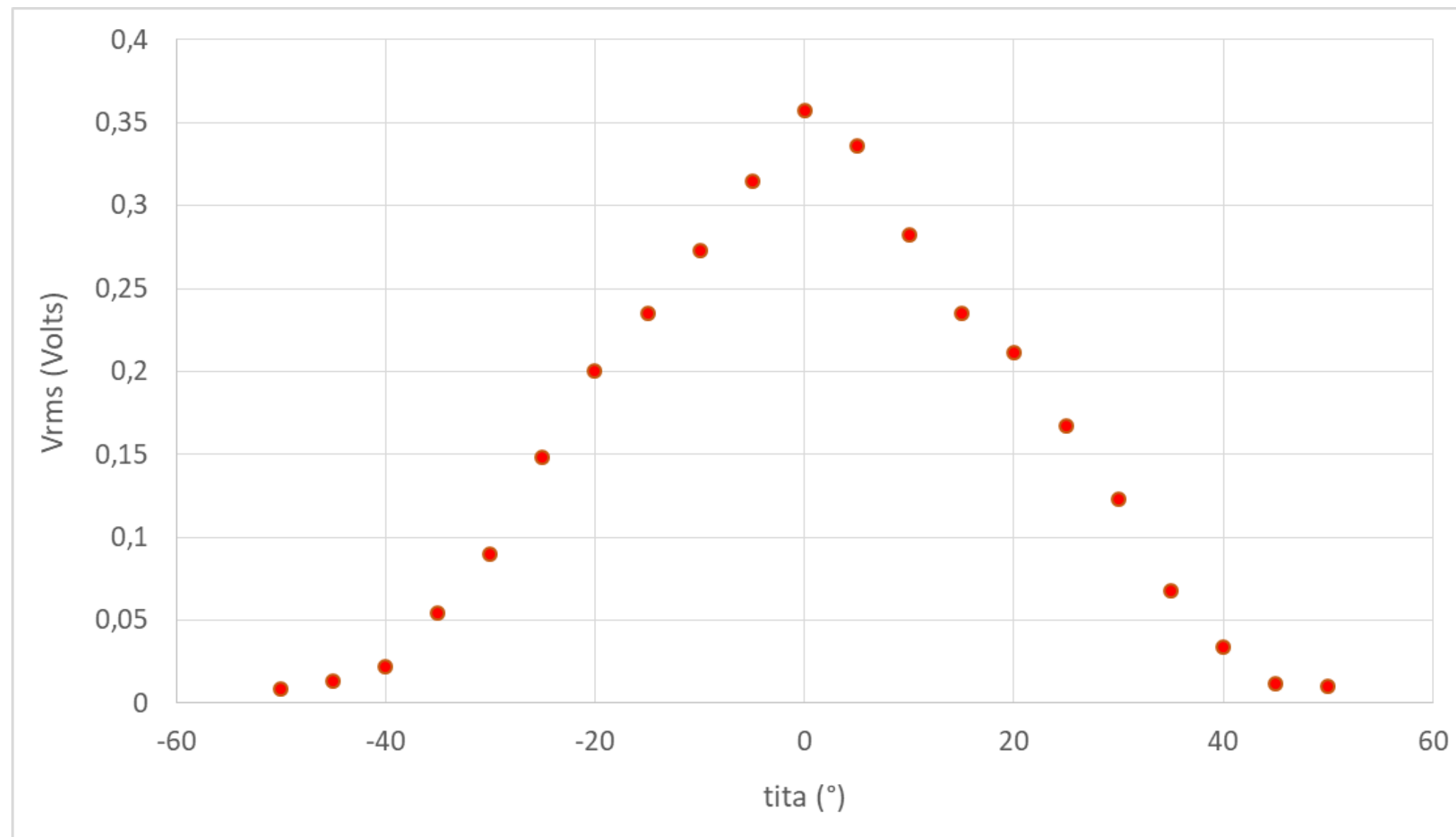


### 3. Dependencia de la amplitud y fase con el ángulo de emisión. (en el mismo plano)

¿Cómo hacer  
ahora esta  
experiencia?

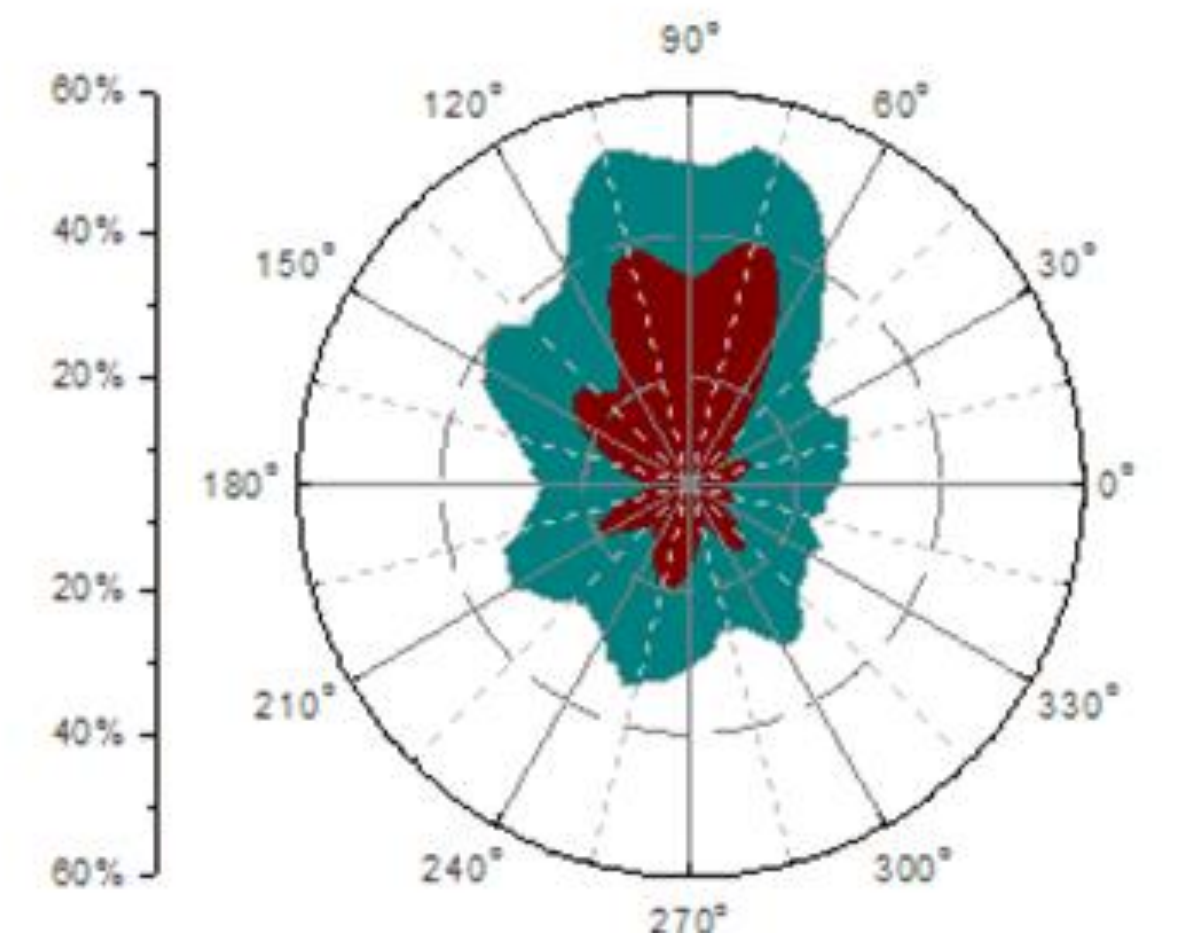
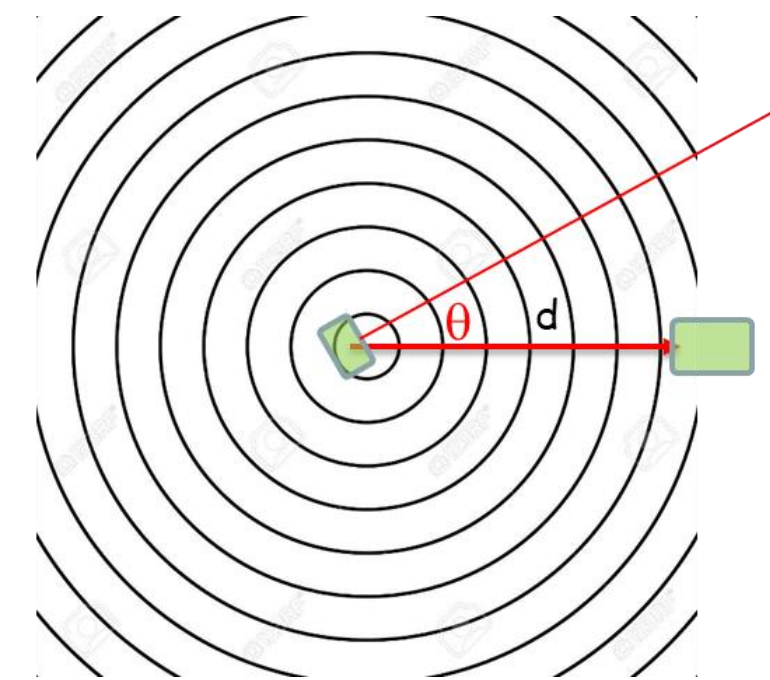
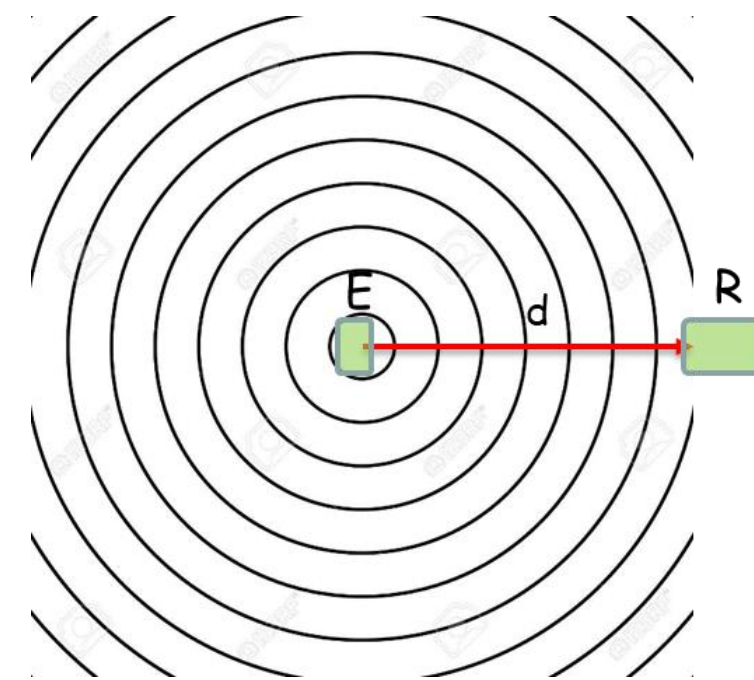


- ¿Qué conviene medir ?
- Amplitud ( $V_{pp}$ ) y fase cuando **se rota el emisor un ángulo  $\theta$** .
- Realizar mediciones entre  $-90^\circ$  y  $90^\circ$ .

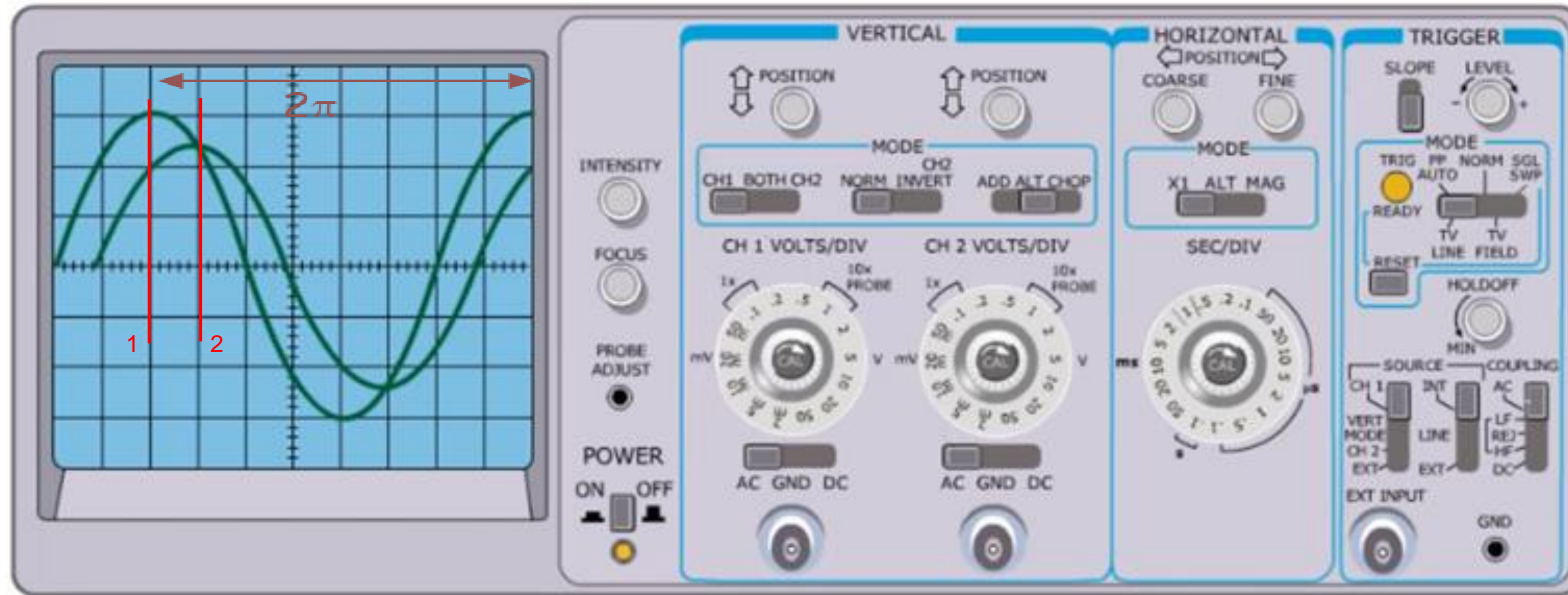


- Agregar errores
- Presentar Vpp vs  $\theta$  como grafico polar.
- ¿ Que sucede si cambio d ?

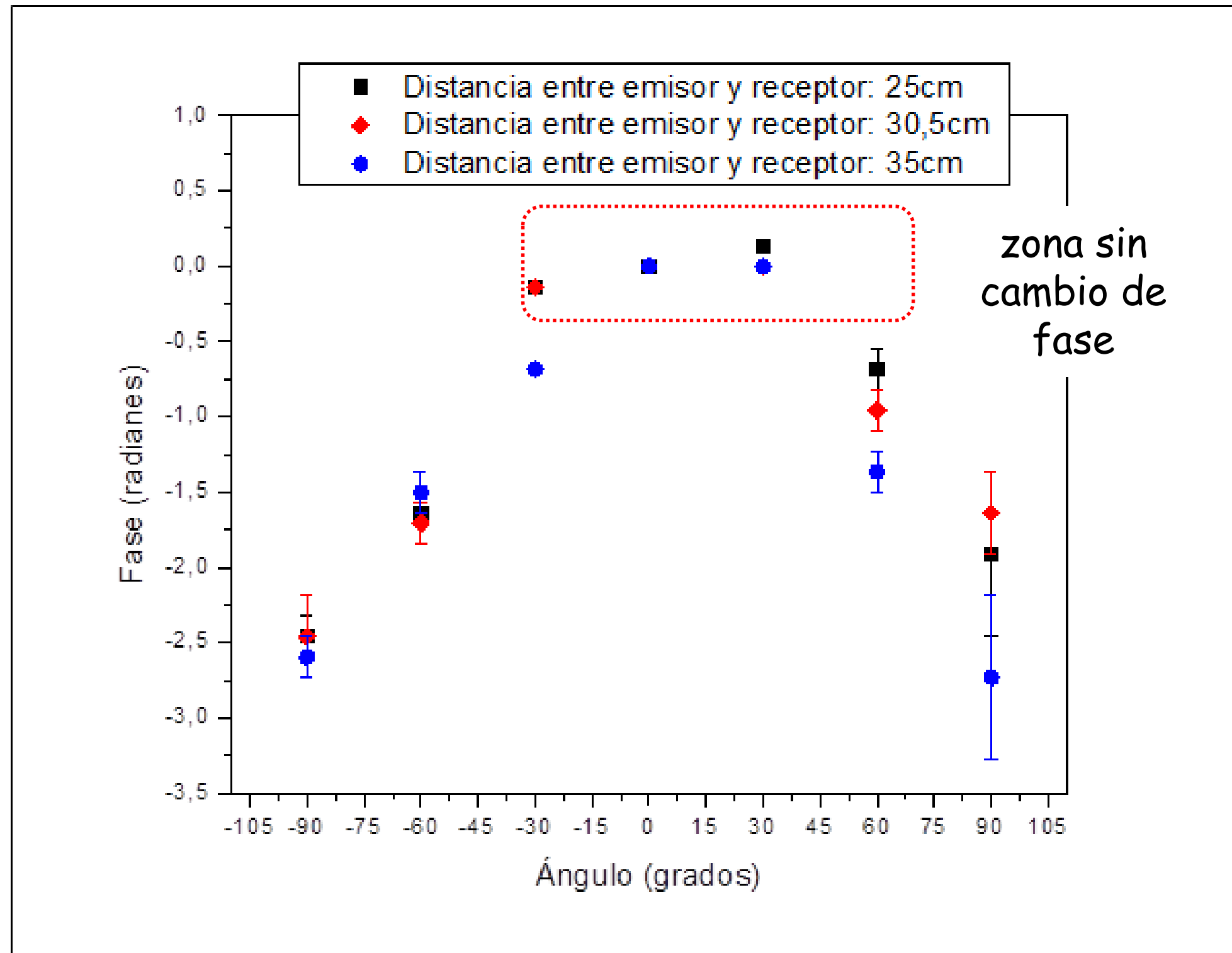
¿Cómo mido la fase?



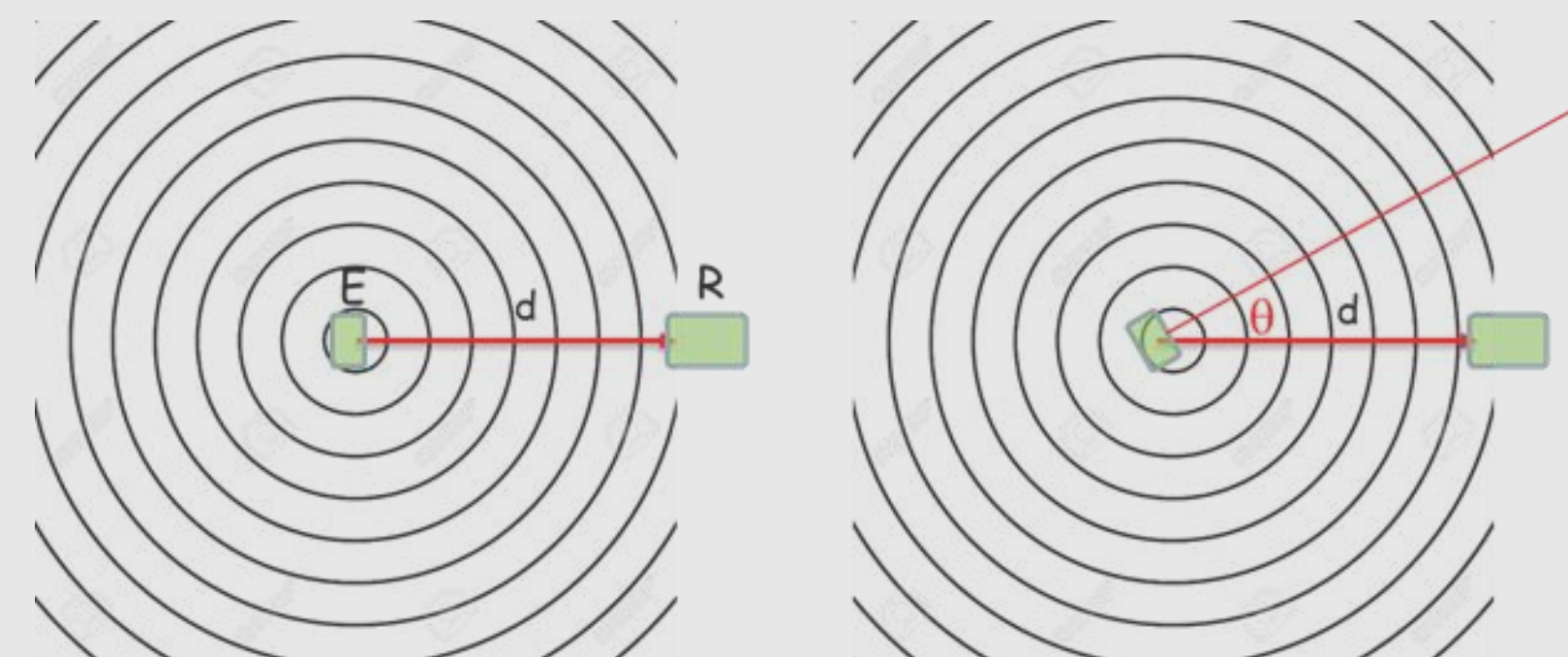
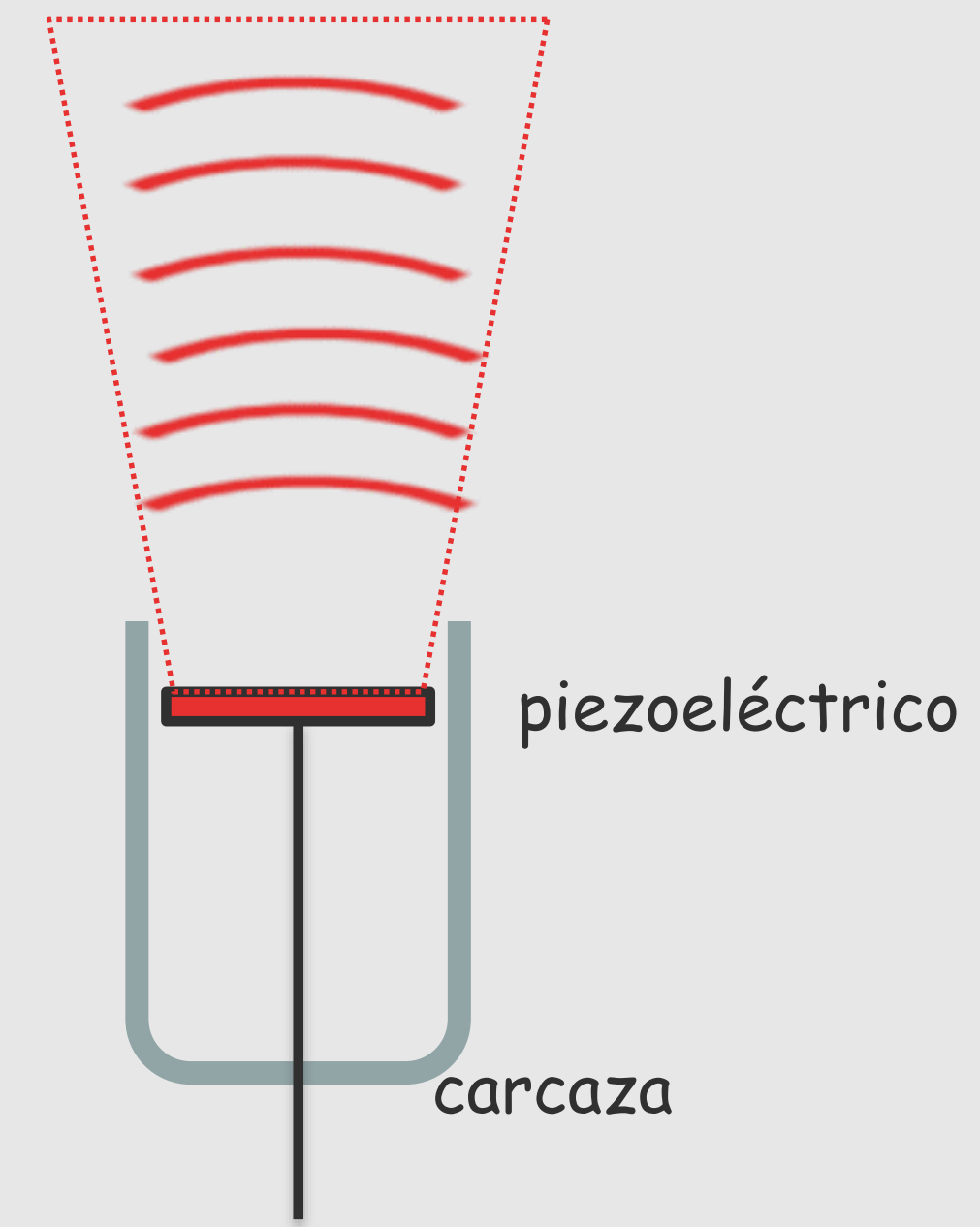




- El método más rápido es con los cursores (opción tiempo).
- Con los cursores se mide el periodo de la señal de referencia y se normaliza a  $2\pi$ .
- Se ubican los cursores 1 y el 2 en las cresta adyacentes de las señales 1 y 2.
- Se lee  $\Delta t$ , diferencia de tiempos entre ambos cursores.
- Se convierte a la diferencia de fase a radianes (con la normalización).

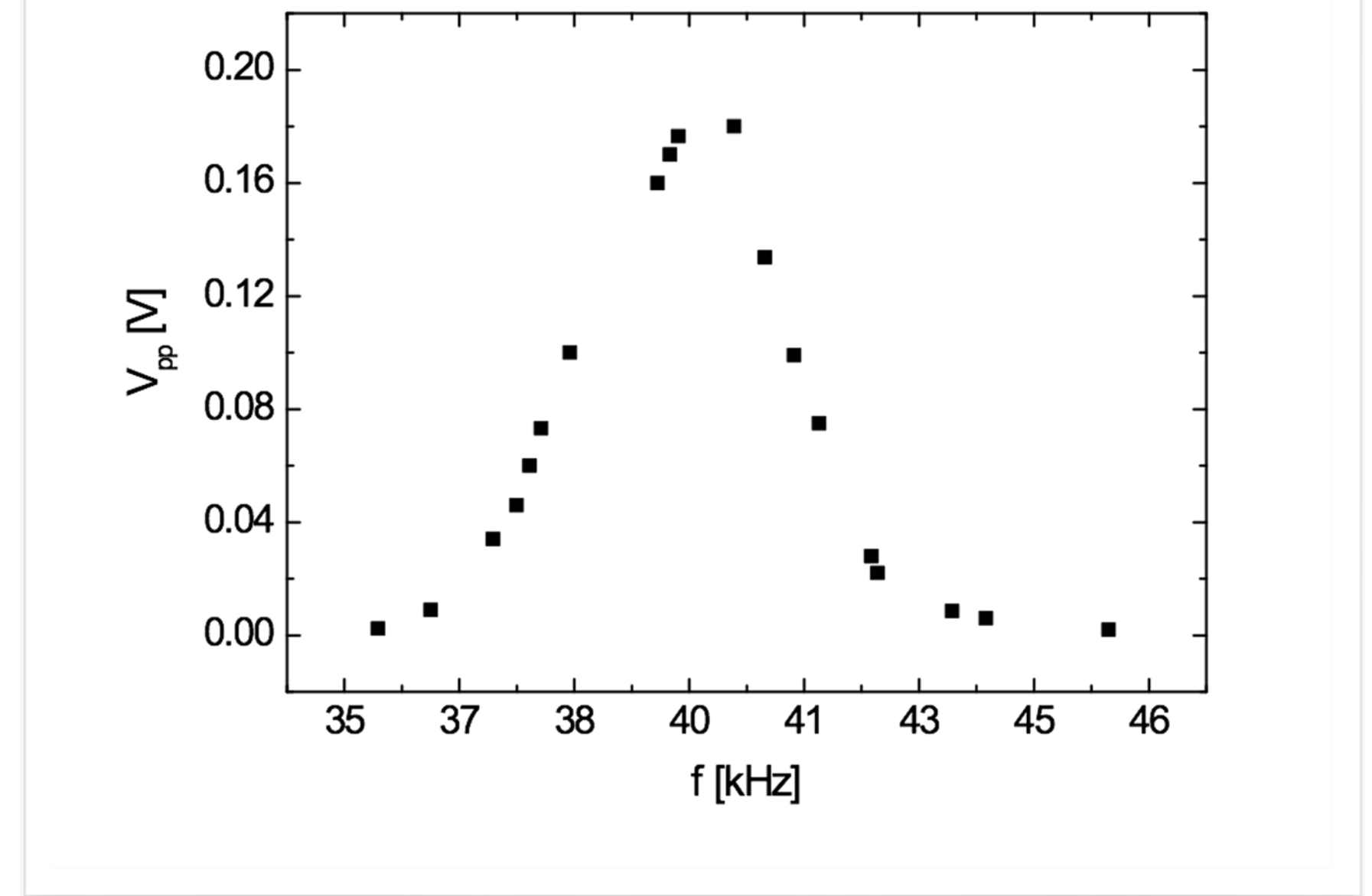
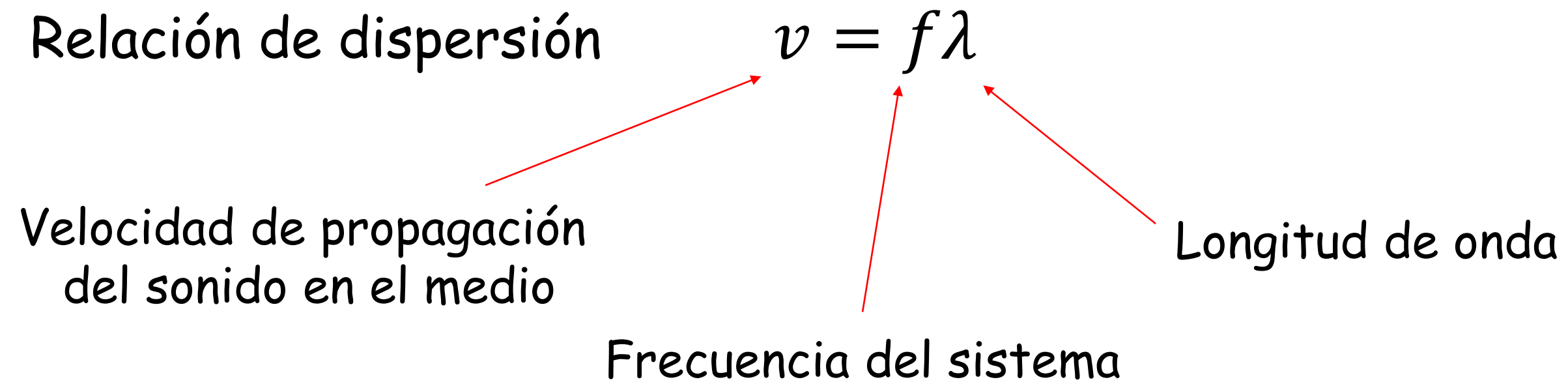


## Efecto de la carcasa del piezoeléctrico





## 4. Estimación de la velocidad del sonido



- ✓ Calcular  $c$ , calculando su error.
- ✓ Se puede calcular para la frecuencia principal, la secundaria ( $\sim 54$  kHz) y también para frecuencias entre  $\pm 2$  kHz de la principal.
- ✓ En todos los casos se debe calcular la longitud de onda correspondiente.
- ✓ Comparar con el valor de la velocidad del sonido que se presenta en la literatura. Variación con condiciones atmosféricas.
- ✓ ¿El medio es dispersivo o no dispersivo? ¿Cómo lo comprobarían?

En base a las experiencia realizadas :

- ✓ ¿Cómo es la onda emitida ?
- ✓ ¿Se puede inferir algo de los resultados?
- ✓ Estimación de la velocidad de propagación del sonido  $v$  en el medio.





*¿ Preguntas ?*