

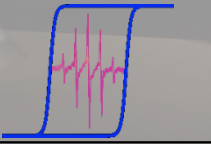
Amplificador Lock-In

Luis Avilés-Félix

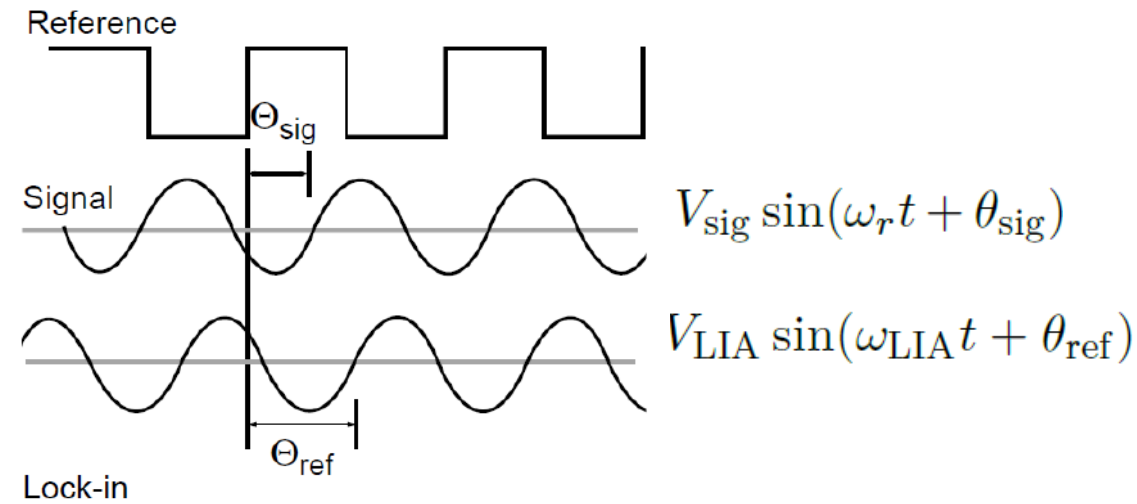
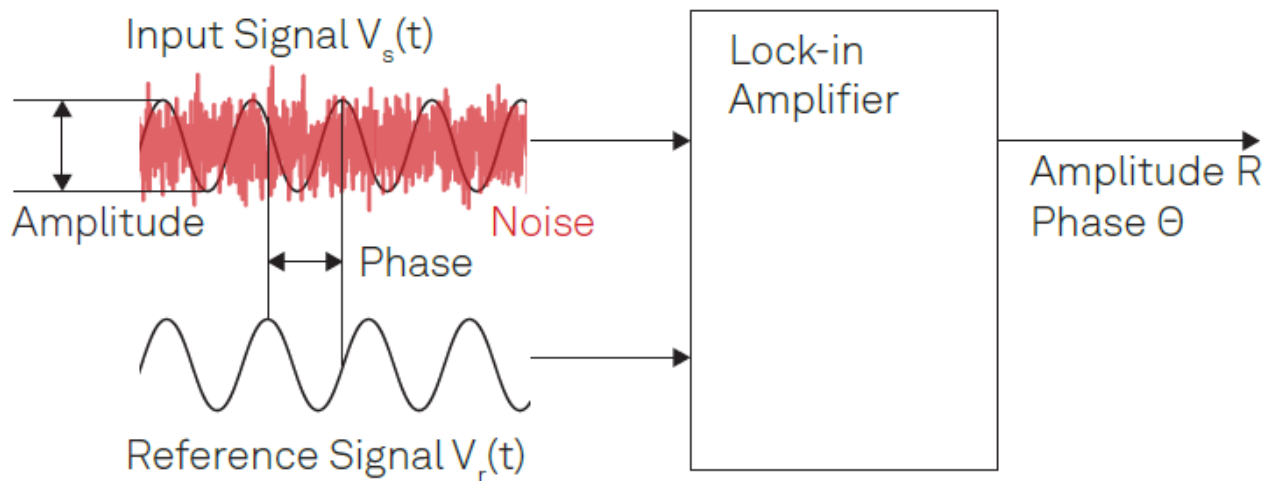
Instituto de Nanociencia y Nanotecnología (CNEA - CONICET), Nodo Bariloche, Av. Bustillo 9500, (8400) Bariloche (RN), Argentina
Laboratorio Resonancias Magnéticas, Centro Atómico Bariloche, Av. Bustillo 9500, (8400) Bariloche (RN), Argentina
Instituto Balseiro, Centro Atómico Bariloche, Av. Bustillo 9500, (8400) Bariloche (RN), Argentina



Amplificador Lock - In



- Un dispositivo que permite extraer señales **periódicas** débiles de un fondo de ruido.
- Utilizado en experimentos de física para mejorar la relación señal/ruido.
- Se basa en detección en fase con una referencia externa.



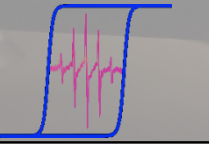
- El lock-in multiplica la señal de referencia interna y la señal medida en el experimento (detección homodina) usando un multiplicador (*mixer o Phase-sensitive detector PSD*)

$$V_{psd} = V_{sig} V_{LIA} \sin(\omega_r t + \theta_{sig}) \sin(\omega_{LIA} t + \theta_{ref})$$

$$V_{psd} = \frac{1}{2} V_{sig} V_{LIA} \cos([\omega_r - \omega_{LIA}]t + \theta_{sig} - \theta_{ref}) - \frac{1}{2} \cos([\omega_r + \omega_{LIA}]t + \theta_{ref} + \theta_{sig})$$

$$V_{psd} = \frac{1}{2} V_{sig} V_{LIA} \cos(\theta_{sig} - \theta_{ref}) - \frac{1}{2} \cos([2\omega_r]t + \theta_{ref} + \theta_{sig})$$

$\omega_r = \omega_{LIA}$



$$\omega_r = \omega_{LIA}$$

$$V_{psd} = \frac{1}{2} V_{sig} V_{LIA} \cos(\theta_{sig} - \theta_{ref}) - \frac{1}{2} \cos([2\omega_r]t + \theta_{ref} + \theta_{sig})$$

Filtro pasa bajos

- Eliminar las componentes a frecuencias mayores ➔ señal puramente DC proporcional a la amplitud de la señal medida

$$V_{psd} = \frac{1}{2} V_{sig} V_{LIA} \cos(\theta_{sig} - \theta_{ref})$$

Estas dos cantidades representan a la señal como un vector!!

- Ajustando θ_{ref} podemos hacer que $\theta_{sig} - \theta_{ref} = 0$ y así medir V_{sig} .
- Si $\theta_{sig} - \theta_{ref} = 90^\circ$, entonces $V_{psd} = 0$.
- Si se agrega otro multiplicador que mezcla la señal con la referencia interna del oscilador desfasada 90° : $V_{LIA} \sin(\omega_L t + \theta_{ref} + 90^\circ)$, tenemos

$$V_{psd2} = \frac{1}{2} V_{sig} V_{LIA} \sin(\theta_{sig} - \theta_{ref})$$

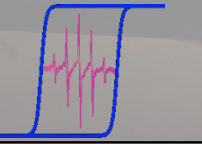
- Entonces tenemos una señal proporcional al coseno y otra al seno:

$$X = V_{sig} \cos \theta \quad Y = V_{sig} \sin \theta$$

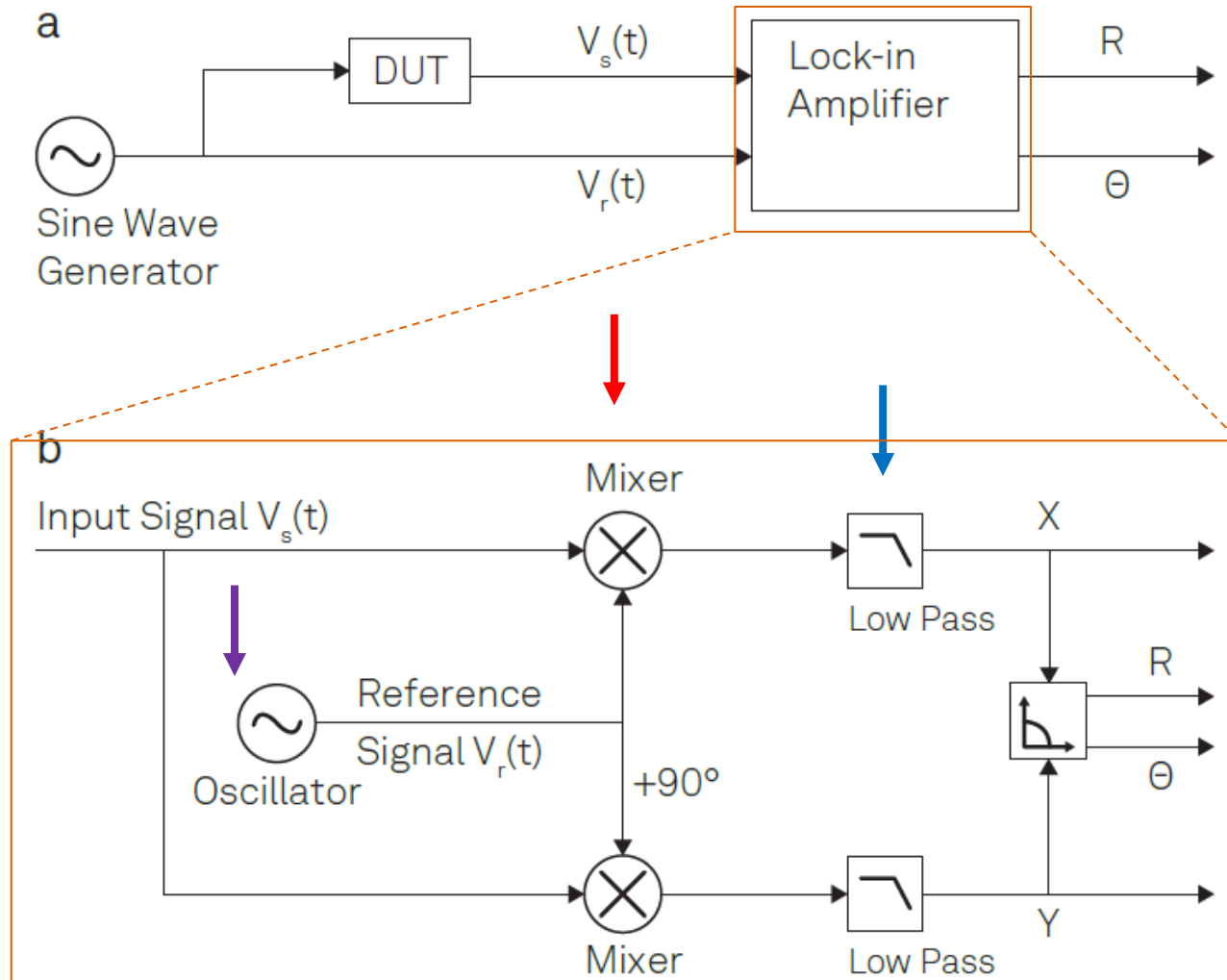
$$R = (X^2 + Y^2)^{1/2} = V_{sig}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right)$$

Principio de Funcionamiento



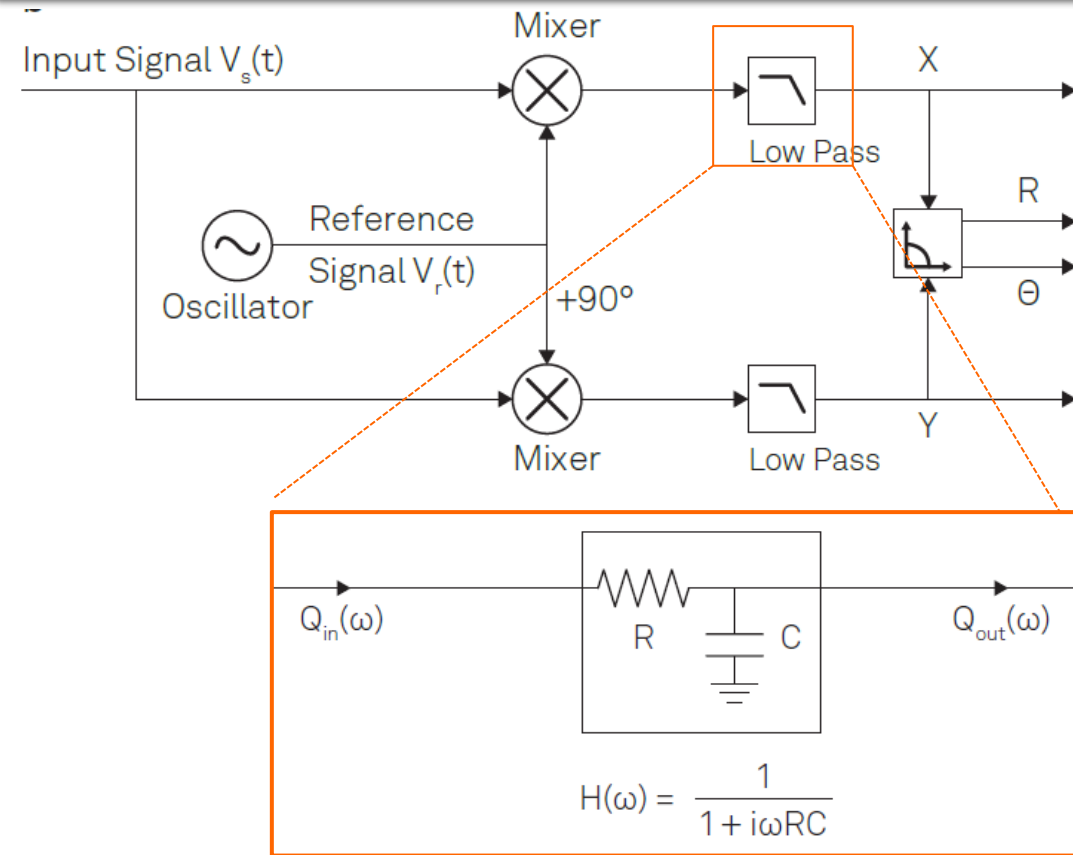
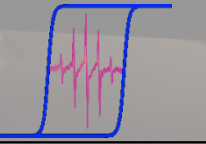
- El Lock-In usa una señal de referencia para filtrar el ruido y recuperar la señal útil.
- Se basa en mezcla de señales y filtrado de alta selectividad.



Componentes clave

- **Mezclador:** Multiplica la señal con la referencia.
- **Oscilador de referencia:** Genera la señal de referencia para la detección en fase.
- **Filtro pasa-bajo:** Elimina ruido y señales no deseadas y define el experimento que uno quiere realizar.

Filtro pasa baja: Constante de tiempo

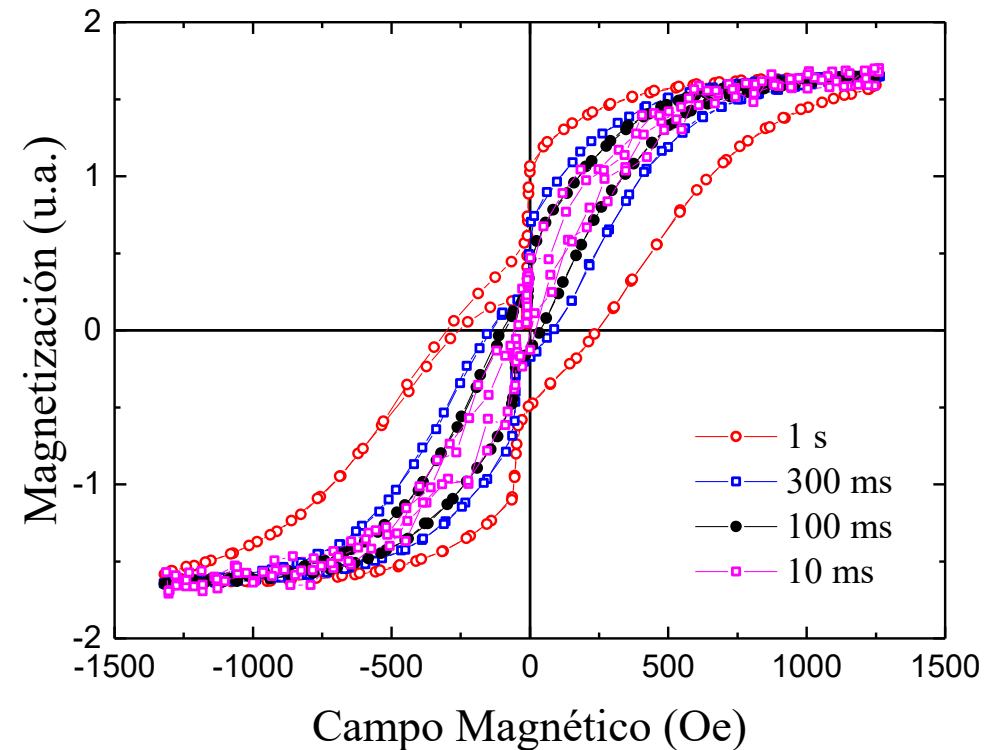


- | | |
|--|--|
| ☐ Ancho de banda estrecho (mayor τ)
- Menos ruido
- Mediciones más lentas | ☐ Ancho de banda amplio (menor τ)
- Más ruido
- Mediciones rápidas
- Posibles errores en la medición |
|--|--|

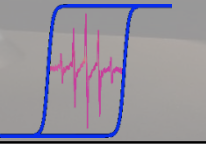
- Constante de tiempo $\tau = RC$ (parámetro que controla cuánto demora medir una señal)
- Ancho de banda efectivo: rango de frecuencias que el filtro permite pasar

$$BW_{\text{eff}} = \frac{1}{2\pi\tau}$$

Curva de Histéresis de un disco de Ni de 6 mm de diámetro usando diferentes valores de constante de tiempo.



Características de un buen lock-in



Cociente señal-ruido

- El ruido en el lock-in se calcula considerando el ruido de entrada y el ancho de banda efectivo del filtro pasa baja

$$V_{\text{noise}} = V_{\text{input noise}} \times \sqrt{BW_{\text{eff}}} = V_{\text{input noise}} \times \sqrt{\frac{1}{2\pi\tau}}$$

- Para $\tau = 100 \text{ ms}$ y $V_{\text{input noise}} = 5 \text{ nV}_{\text{rms}}/\sqrt{\text{Hz}}$

$$V_{\text{noise}} = 5 \times \sqrt{\frac{1}{2\pi \times 0,1}} = 3,96 \text{ nV}_{\text{rms}}$$

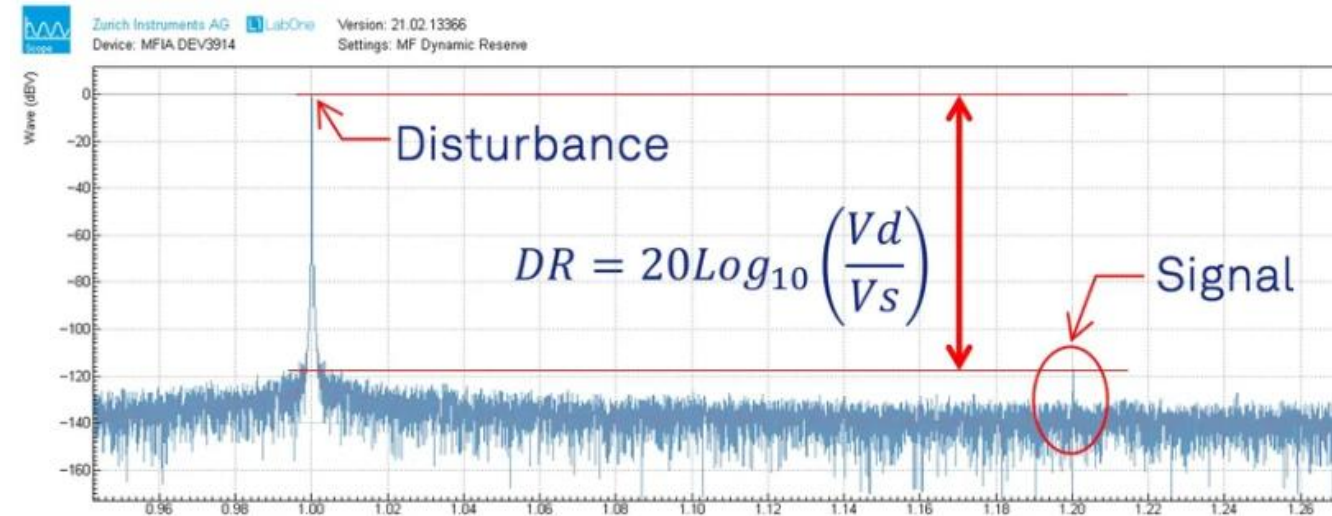
- Fuentes de ruido: Johnson – Nyquist (thermal noise) , Shot noise y ruido $1/f$

Reserva dinámica – (Dynamic reserve)

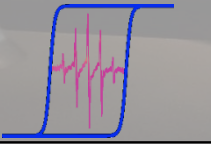
- Parámetro que determina qué tan bien (precisión) se puede medir la señal en el entorno de ruido
- Relación entre la señal de ruido más grande tolerable y la señal de interés, expresada en dB.
- Ejm: Señal de $1 \mu\text{V}$ con una reserva dinámica de 60 dB significa que ruidos de hasta 1 mV pueden ser tolerados sin sobrecargas

$$60 \text{ dB} = 20 \log\left(\frac{x}{1 \mu\text{V}}\right) \implies x = 1 \text{ mV}$$

- Tolerable: no debe causar sobrecargas en el instrumento (señal de entrada, filtros, ...)
- La mayoría de los Lock-in tienen una reserva dinámica mínima que cambia con la sensibilidad.



Amplificador Lock - In



$$V_{psd} = \frac{1}{2} V_{sig} V_{LIA} \cos(\theta_{sig} - \theta_{ref}) - \frac{1}{2} \cos([2\omega_r]t + \theta_{ref} + \theta_{sig})$$

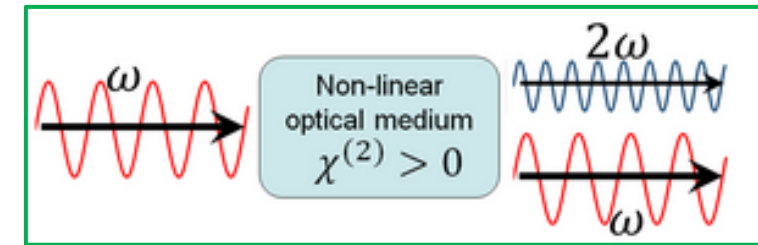
Filtro pasa bajos

- Eliminar las componentes a frecuencias mayores ➔ señal puramente DC proporcional a la amplitud de la señal medida

$$V_{psd} = \frac{1}{2} V_{sig} V_{LIA} \cos(\theta_{sig} - \theta_{ref})$$

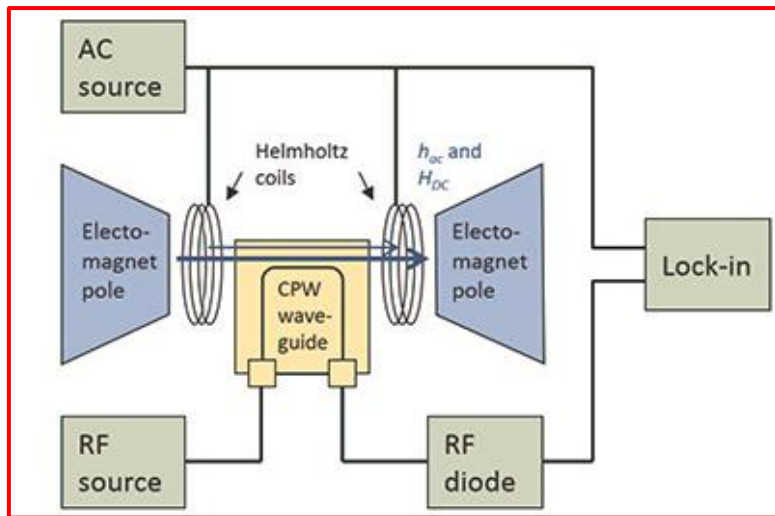
Sin Filtro pasa bajos

- Procesos ópticos no lineales

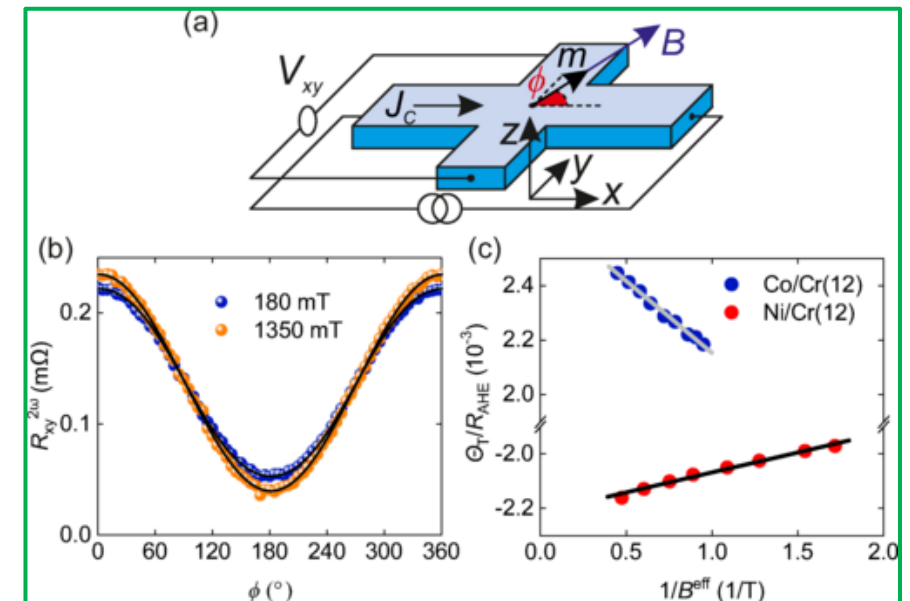
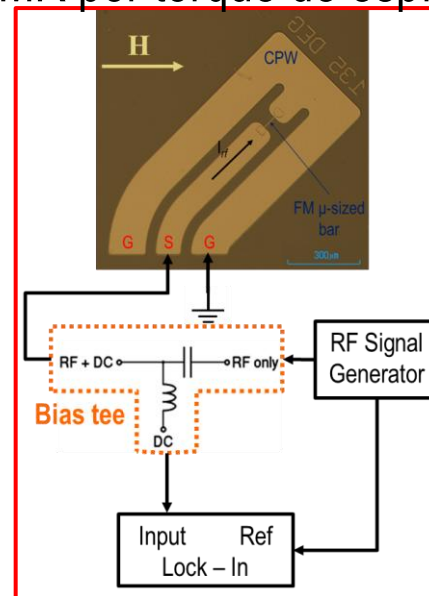


- Generación de segundos armónicos del efecto Hall

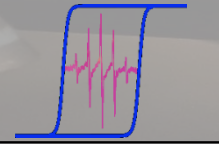
Resonancia Ferromagnética FMR



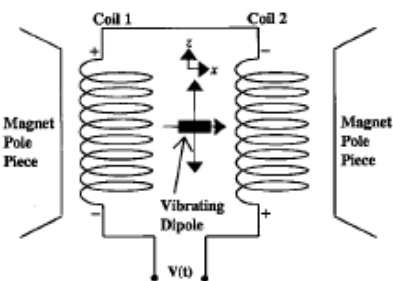
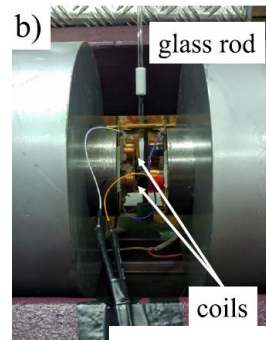
FMR por torque de espín



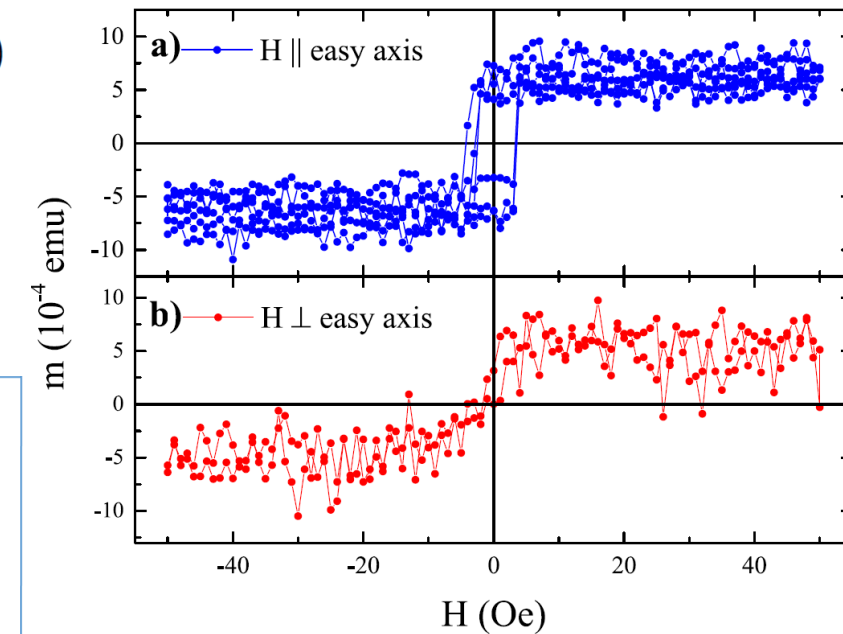
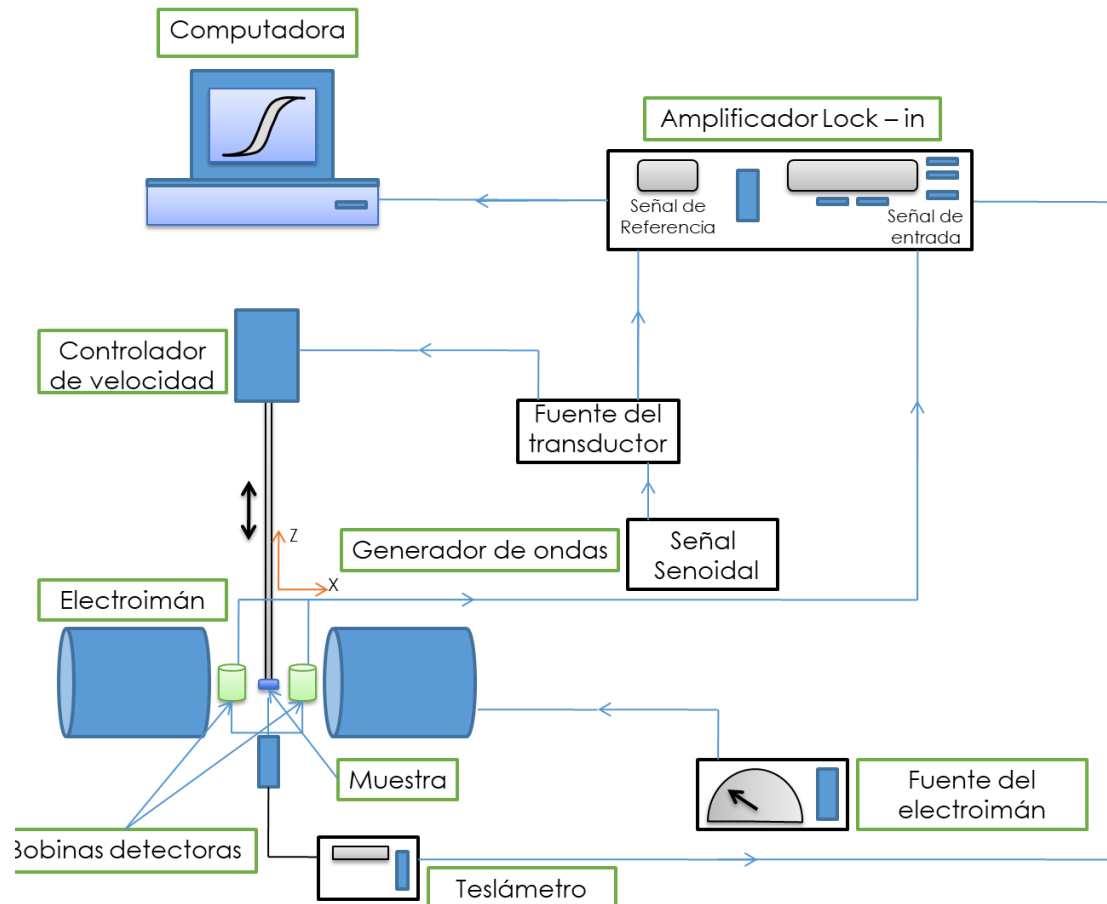
Vibrating sample magnetometer (VSM)



Lake shore VSM

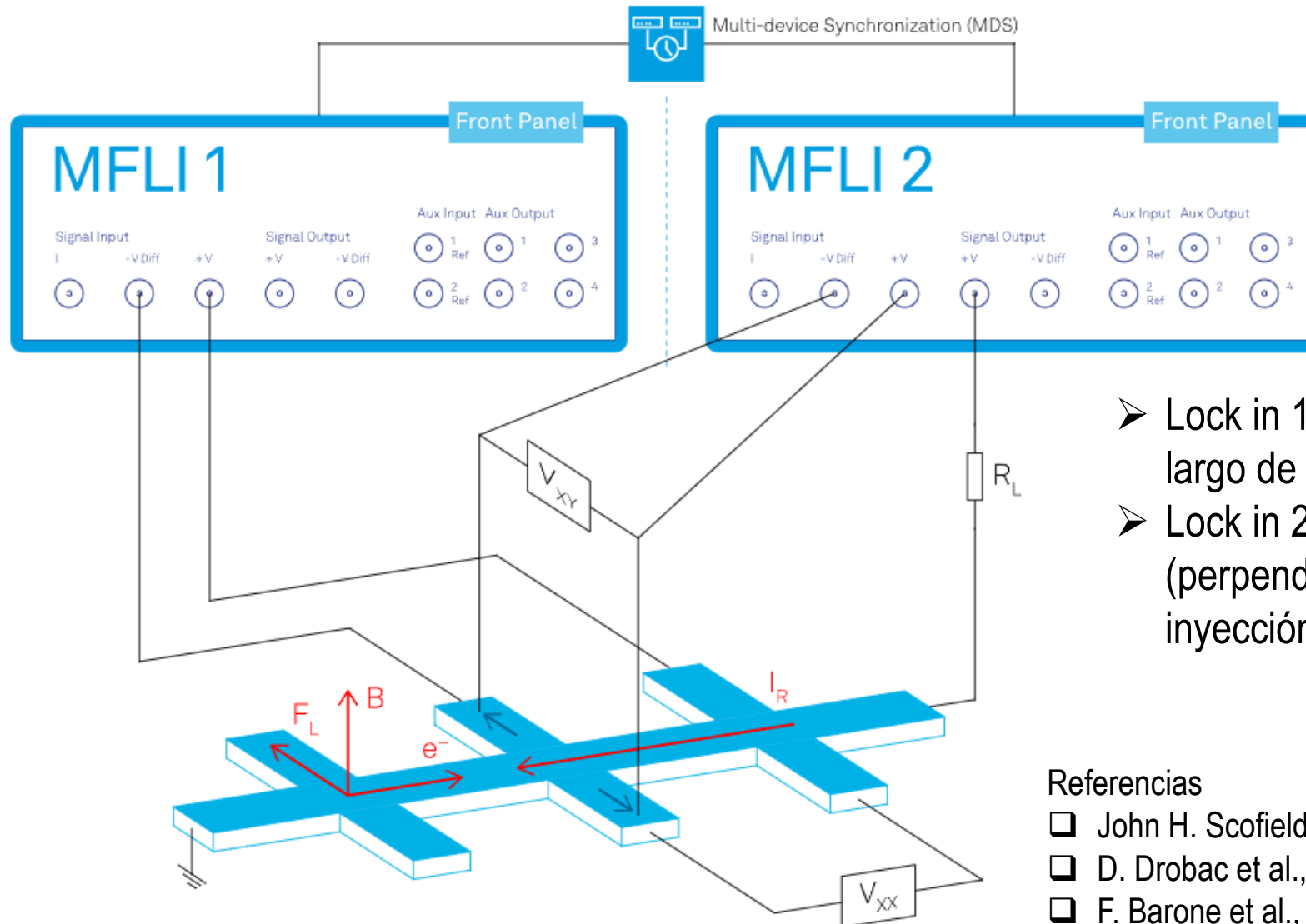
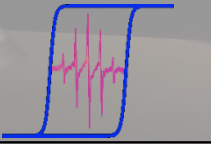


$$V_{ind} = - \frac{d\Phi}{dz} \frac{dz}{dt} = \text{grad} \left(\frac{\vec{B}(\vec{r}) \cdot \vec{\mu}}{I} \right) \cdot \vec{v}(t) = \mu G(\vec{r}) v(t)$$



- Lock in: Medición de la tensión inducida en las bobinas detectoras.
- Señal de excitación de la oscilación como señal de referencia

Medición de efecto Hall



- Lock in 1: Medición de la tensión longitudinal (a lo largo de la dirección de la corriente)
- Lock in 2 : Medición de la tensión transversal (perpendicular a la dirección de la corriente) e inyección de la corriente.

Referencias

- ❑ John H. Scofield, American Journal of Physics **62** (2) 129-133 (1994).
- ❑ D. Drobac et al., Rev. Sci. Instr. **84** 054708 (2013)
- ❑ F. Barone et al., Rev. Sci. Instr. **66**, 3697 (1995)
- ❑ Zurich Instruments AG.Principles of Lock-in Detection,2017. WhitePaper





Departamento
Magnetismo y
Materiales
Magnéticos

Preguntas?

email: luis.aviles@ib.edu.ar/luis.aviles@cnea.gob.ar



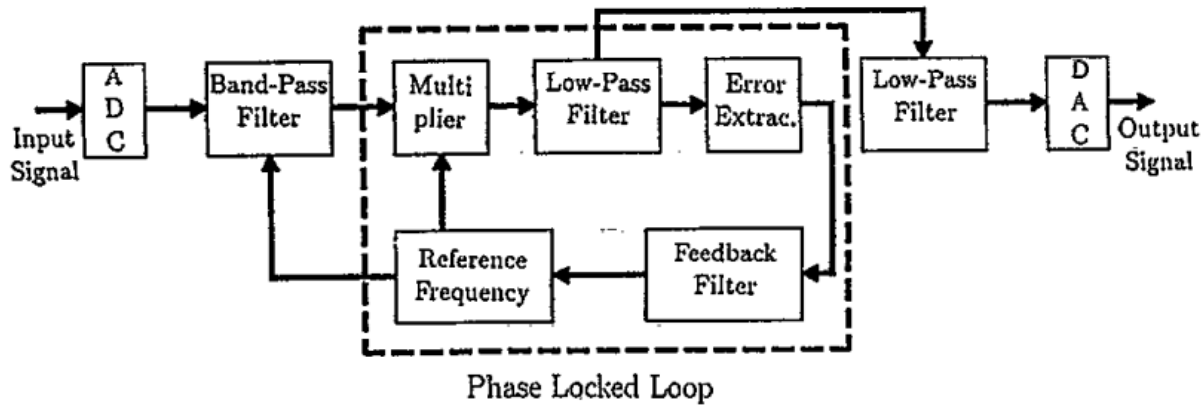
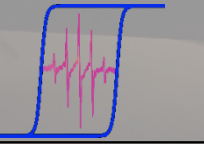


FIG. 1. Digital lock-in amplifier scheme.

- a digital control system that dynamically changes the phase of the internal reference frequency, matching it to the carrier frequency

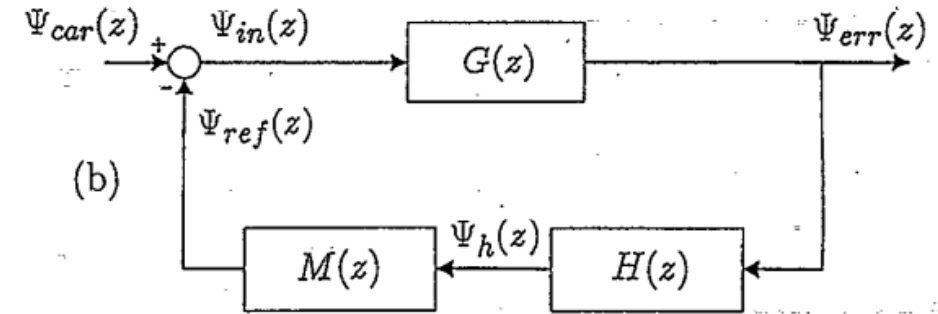
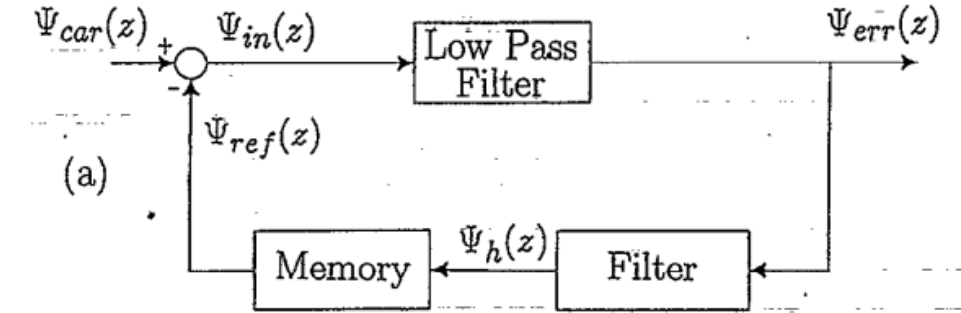


FIG. 2. Equivalent scheme of the digital phase locked loop. (a) Block scheme (b) Equivalent scheme in the Z-transformation domain: $\psi_{car}(z)$, phase of the carrier frequency; ψ_{ref} , phase of the internal reference frequency; $\psi_{in}(z) = \psi_{car} - \psi_{ref}$; $\psi_{err}(z) = \psi_{car} - \psi_{ref}$, measured at the output of low-pass filter; $G(z)$, transfer function of the low-pass filter; $H(z)$, transfer function of the feedback filter; $M(z)$, transfer function of the memory block.