

## Amplificador Lock-In (Lockin II)

### 1. Detección sensible a la fase - Medición de impedancia

Un amplificador lock-in es un instrumento que permite extraer información sobre amplitud y/o fase de una señal al compararla con una de referencia. Cuando ambas tienen una frecuencia de oscilación “*similar*” (pero no idéntica), el equipo realiza un tipo de medición llamada *detección heterodina*. Cuando se utiliza un **MISMO oscilador** de partida para generar la señal **y** la referencia, se habla de una **detección HOMODINA**. Esta última es utilizada habitualmente en laboratorios de física para realizar mediciones de alta precisión y bajo ruido, y es de la que vamos a hablar un poco a continuación.

La implementación se esquematiza en la figura 1, y es el siguiente: en un dado experimento se introduce una modulación que afecta a la variable que se desea medir, usando una señal oscilatoria de referencia  $r$ , con frecuencia angular  $\omega_r = 2\pi f_r$ . La respuesta del sistema es adquirida en una señal  $S$ , que tendrá la misma frecuencia de oscilación, pero con la información del fenómeno a medir “codificada”, o incluida, en alguno de sus parámetros (por ejemplo, en la amplitud).

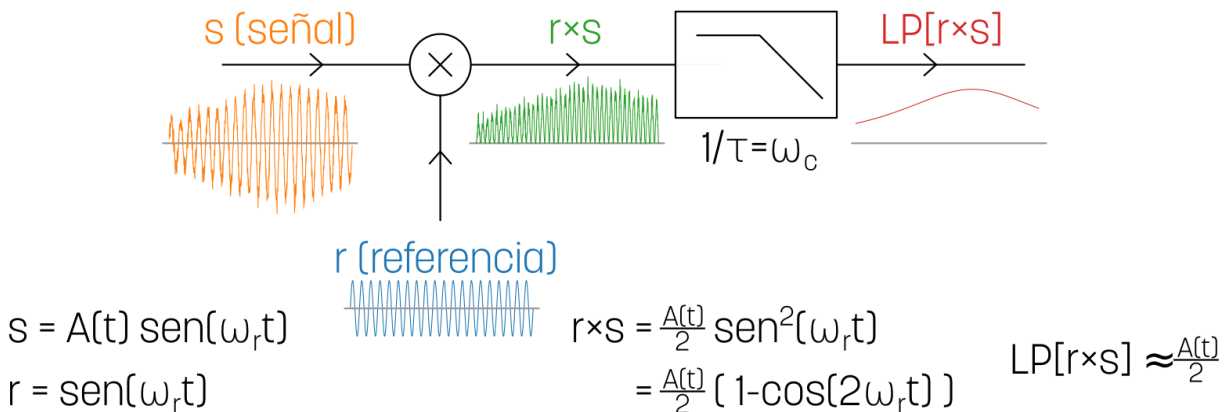


Figura 1: Esquema de modulación lock-in

Un Lock-in lo que hace esencialmente es multiplicar la señal a estudiar,  $S$ , con una señal de referencia  $r$  (que es estable y oscila a la misma frecuencia  $\omega_r$ ). El producto de ambas  $S \cdot r$  genera una superposición de dos señales, una al doble de frecuencia  $2\omega_r$  y otra de frecuencia 0 (continua). Si al producto  $S \cdot r$  se lo pasa por un filtro pasabajos (LP) con una frecuencia de corte  $\omega_c$  elegida adecuadamente, de forma de eliminar el término que oscila a  $2\omega_r$  recuperamos la amplitud  $A$ .

Esta operación se puede hacer aún si  $A$  varía lentamente: la condición es que la “frecuencia” de variación de  $A$ , o su “ancho de banda” debería ser mucho más lenta que la frecuencia de corte del pasabajos..

Este método de medición, al ser capaz de controlar la frecuencia de modulación así como la frecuencia de corte y orden del filtro, permite detectar señales hasta 6 órdenes de magnitud menores que el ruido (dependiendo de la calidad del instrumento). Cuando se diseña un experimento con detección lock-in se busca codificar la información que se quiere medir en la fase o en la amplitud de una señal *portadora*, generada a partir de la señal de *referencia* mencionada (de frecuencia  $\omega_r$ ). Esta se verá expresada en las bandas laterales de dicha señal (en el espectro de Fourier, la información estará en los valores que rodean a la frecuencia  $\omega_r$ ), en un proceso denominado “modulación”. Su función es llevar esa información a una zona del espectro con menor *densidad espectral de ruido*. Allí se realiza la adquisición y el lock-in pos-procesa los datos adquiridos implementando el procedimiento descrito. Como resultado, se recupera la información codificada con una relación señal/ruido mucho más favorable.

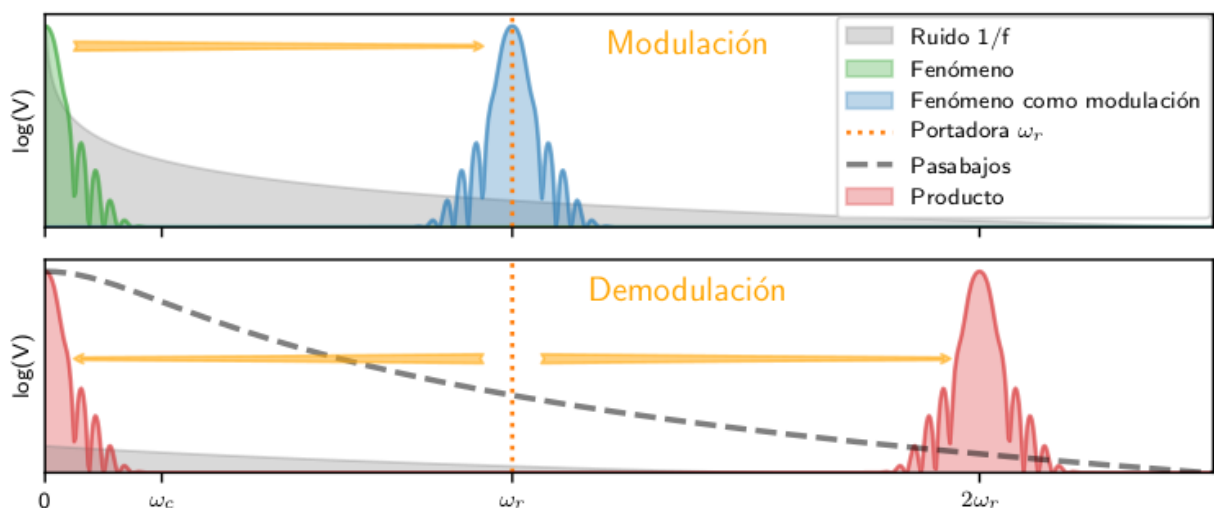


Figura 2: Procesamiento de la información en la modulación y demodulación lock-in

Pueden encontrar más detalles del método y sus posibilidades, así como actividades propuestas, en las slides de detección homodina en la carpeta de Lockin de la materia. También están disponibles clases de cuatrimestres anteriores y una breve charla introductoria del tema.

En esta práctica aprovecharán la capacidad de amplificación selectiva del instrumento para medir señales muy pequeñas. El experimento propuesto es simple y busca que ustedes reconozcan la capacidad del instrumento en alguna de sus aplicaciones, al tiempo que determinan la resistencia de un alambre metálico.

## 2. Experimento 1: ¿Cómo medir la resistividad de un material conductor?

Una simple búsqueda en Google nos puede dar un valor de resistividad  $\rho$  de los materiales conductores más comunes. Al ser materiales justamente apropiados como conductores, ésta

es bastante chica, y por consiguiente la resistencia de un alambre conductor es esperable que sea baja.

**PREGUNTAS:** ¿cuánto es “chica”?Cuál es la resistencia de un alambre de aluminio de 0.5 mm de diámetro y 30 cm de largo? Hagan la cuenta con el valor nominal de resistividad del Al

La forma más rápida y más común de medir una resistencia es utilizar multímetro: en el modo de medición de resistencia, éste genera una corriente constante  $I$  en el circuito cerrado con la resistencia a medir, y mide la caída de voltaje  $V$  sobre la resistencia. A partir de la ley de Ohm el multímetro obtiene y muestra el valor de resistencia haciendo el cociente  $R = V / I$ . El problema es que estos instrumentos en general tienen una resolución mínima que está por encima de los valores de resistencia a medir.

El método que vamos a usar es armar un divisor resistivo, con una resistencia grande (aproximadamente  $R_0=1k\Omega$ ) y el alambre a medir (figura 3), y aplicar un voltaje fijo  $V_0$  entre los extremos.

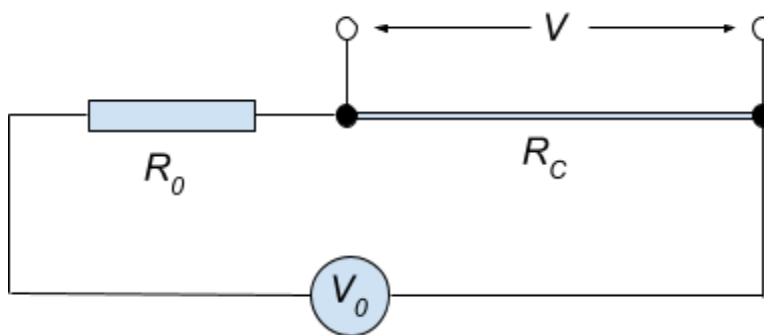


Figura 3: Esquema experimental de divisor resistivo para determinar la resistencia del alambre  $R_c$  a partir de la diferencia de potencial  $V$ .

La resistencia de  $1k\Omega$  está para...

**PREGUNTA:** ¿para qué está esta resistencia?.

Midiendo la caída de tensión  $V$  sobre los extremos del alambre podemos calcular la resistencia según la expresión

$$R = \frac{R_0}{V_0/V - 1} \quad (1)$$

**PREGUNTA:** ¿Se puede despreciar el “1” en el cociente o no?: cuánto esperan que sea  $V$ , comparado con  $V_0$ ?)

Sin hacer muchas cuentas, podemos intuir que la caída de tensión en el cable debería ser “pequeña”. Mucho menor que la caída en la resistencia de 1 k $\Omega$ , porque al fin y al cabo es un cable. En esta práctica proponemos explotar las cualidades de un amplificador Lockin para medir estos voltajes pequeños: en vez de aplicar una tensión DC sobre el circuito,  $V_0$  puede estar modulada a una frecuencia (angular)  $\omega$ . El amplificador Lock-in tiene integrado un generador de funciones que provee una señal senoidal de referencia, ajustable en amplitud y frecuencia (y fase). Con esta señal se puede alimentar el divisor resistivo (**limitarse a 1V de amplitud máxima!!**), figura 4.

Se puede medir la caída de voltaje sobre el largo total del alambre, **pero también en secciones de menor longitud**, conectando el conector cocodrilo en el lugar correcto.

**PRECAUCIÓN:** Cuidado con separar las tierras de los cables!! Si tienen dudas pregunten, de su paso por Laboratorio 3 ya deberían saberlo, pero vamos a hacer de cuenta que no vimos nada).

De esta forma, al tener una serie de mediciones correlacionadas (esperamos que la resistencia y por ende la caída de voltaje aumente [**linealmente?**] con la longitud del cable, no?), podemos ver si hay algún *offset* o efecto de las resistencias de contacto. **OJO, el alambre está barnizado con una pintura aislante**. Si van a medir en alguna posición intermedia hay que eliminar (con cuidado) el esmalte con un filo o una lija fina. Para cuando hagan el experimento es probable en que gran parte de la longitud del alambre el esmalte ya esté eliminado.

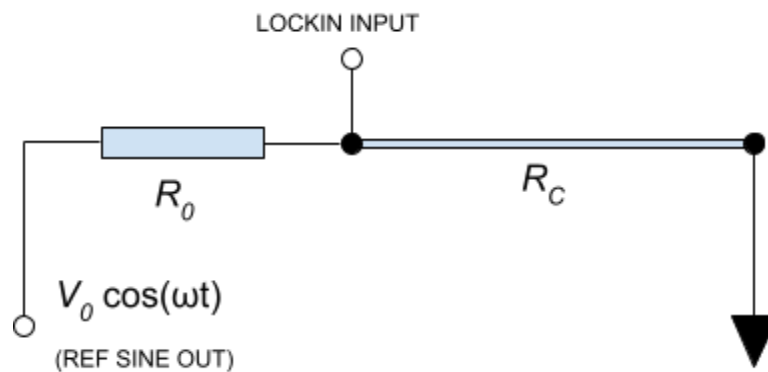


Figura 4: Esquema de medición usando el amplificador Lockin

Ahora que la idea está medianamente explicada, veamos algunas sutilezas: la impedancia del alambre, es puramente resistiva? En el esquema de la figura 4 el alambre está estirado, pero en los experimentos, es probable que el mismo forme un lazo. Este lazo tiene una inductancia definida por el diámetro del alambre y fundamentalmente la geometría del conductor.

La impedancia del cable no es “sólo” una resistencia, sino que tiene una parte reactiva:

$$Z = R + iX = R + i\omega L \quad (2)$$

PREGUNTA: Cómo se espera entonces que sea la variación de la impedancia reactiva con la frecuencia?

### 3. Experimento 2: Dependencia con la frecuencia.

Pensemos lo siguiente:

El amplificador lock-in va a generar dos señales: una proporcional a  $\cos(\omega t + \phi)$ , en la jerga del Lockin se la denomina “X” y otra proporcional a  $\sin(\omega t + \phi)$ , llamada “Y”. Estas señales X e Y se denominan cuadraturas (**todo esto está explicado en las diapositivas y charlas de esta práctica**). Para esta parte del análisis ignoramos la fase  $\phi$ , y suponemos que la señal medida está en fase con la referencia, es decir, es proporcional a  $\cos(\omega t)$ . Bajo esta hipótesis, la señal obtenida por el amplificador Lockin debería estar exclusivamente en X, mientras que  $Y=0$ .

PREGUNTA: Suponiendo que la impedancia del alambre es puramente resistiva, es decir no tiene parte inductiva ni capacitiva, cómo deberían comportarse X e Y al cambiar la frecuencia de modulación?

Bueno, prueben!

La idea es “generar” una inductancia con el mismo cable: se puede simplemente “acomodar” el alambre, de forma que el lazo del mismo encierre un área fija y variar la frecuencia. La impedancia inductiva debería aumentar con la frecuencia. De esta experiencia se puede obtener la inductancia de un lazo simple.

Otro experimento consiste en enrollar unas 5 o 6 (10?) vueltas de alambre sobre un núcleo cilíndrico de acero rápido, o ferrite, u otro material ferromagnético tubo de plástico. Ahora el alambre debería tener una inductancia dada por

$$L_{\text{lazo}} = \mu_0 \mu_r N^2 \left( \frac{D}{2} \right) \left[ \ln \left( \frac{8D}{d} \right) - 2 \right] \quad (3)$$

donde  $D$  es el diámetro del lazo de alambre,  $d$  es el diámetro del alambre,  $\mu_0$  la permeabilidad del vacío y  $\mu_r$  la permeabilidad relativa del medio encerrado por el lazo y  $N$  la cantidad de lazos o espiras (ojo, el .

Puede intentar medir esta inductancia, con un núcleo de aire, de hierro, o ferrite, o algún otro material ferromagnético. Se puede medir la inductancia de este arreglo y posteriormente retirar el núcleo, manteniendo la geometría (sin aplastar ni deformar la bobina), y medir de nuevo. De la diferencia entre estos dos valores de inductancia se puede inferir la permeabilidad relativa del material usado.

Los efectos de inductancia parásita de la otra resistencia y del resto de los cables puede complicar la medida. Recuerden siempre que el valor de la impedancia *resistiva* no cambia con la frecuencia, por lo tanto se puede usar el valor obtenido a frecuencias muy bajas como referencia.

El dispositivo que van a usar para los experimentos se puede ver en la figura 5. Un conector BNC se usa para alimentar el divisor resistivo. Los dos test pins están conectados en los dos extremos del alambre, permitiendo medir la diferencia de potencial producida en el largo total del alambre. La resistencia de  $1\text{k}\Omega$  está soldada del otro lado de la plaqueta experimental.

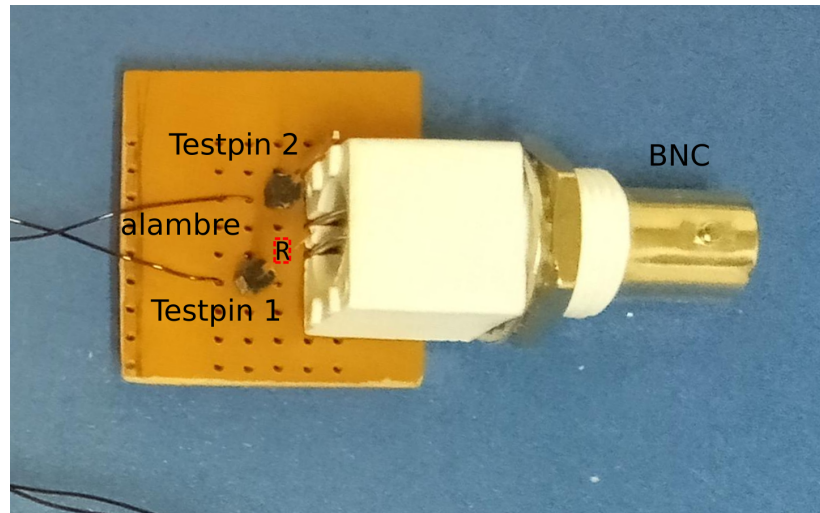


Figura 5: detalle de las conexiones del divisor resistivo. La resistencia de  $1\text{k}\Omega$  está soldada sobre la cara opuesta de la plaqueta. El alambre forma un lazo entre los testpins 1 y 2.

## Bibliografía

- Paul, C. R. (2011). Inductance: loop and partial. John Wiley & Sons. ([en la carpeta de bibliografía de la práctica](#))
- [Principio de funcionamiento del amplificador Lock-in \(SRS\)](#)
- [Zurich Instruments - Lockin white paper](#)
- [Manual del lockin SR830](#)