

# Informe final pasantía

Julian Evia

Facultad de Ingeniería - UDELAR

Octubre 2022

## 1. Datos personales

- Nombre: Julian Evia Saldanha
- CI: 5.057.163-5
- Teléfono: 098616962
- Mail: julianevia2000@gmail.com

## 2. Datos de la pasantía

### Responsable Técnico:

- Nombre: : Dr. Lorenzo Lenci, (Laboratorio de Física Cuántica y Atómica, Instituto de Física, Facultad de Ingeniería)
- Cargo: Grado 3, dedicación total
- Teléfono: 099961029
- Correo de contacto: lenci@fing.edu.uy

### Docente responsable:

Fecha de inicio: 01/05/2022

Fecha de finalización: 01/11/2022

Carga horaria semanal: 15 hrs

### 3. Introducción y contexto de la pasantía

Todos los años surgen oportunidades ofrecidas por el Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas MEC-UDELAR ("PEDECIBA") de pasantías para iniciar a estudiantes de carreras aprobadas por las Facultades de Ciencias, Ingeniería y Química en la investigación en el área de física.

En concreto, una de los proyectos de investigación que ofrecen una pasantía es en el laboratorio de Física Cuántica y Atómica del Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería. El proyecto se realiza en el marco del experimento para el estudio de propiedades atómicas de átomos fríos existente en el laboratorio. Cuando los átomos están atrapados en volúmenes pequeños, pueden servir como sensor local de las perturbaciones que experimenten.

Dentro del contexto de la investigación que se realiza en el Laboratorio, surgen una serie de problemas a resolver. La interacción con los átomos de rubidio se hace por medio de una serie de láseres resonantes con la diferencia energética entre diferentes estados atómicos. Debido a esto, la longitud de onda de los láseres debe ser muy precisa y muy estable para que los fotones interaccionen correctamente con los átomos.

Es así que surge el objetivo de esta pasantía con el nombre *Estabilización de frecuencia mediante lazo de control digital*, que consiste en el diseño e implementación de un sistema digital de control para lograr la estabilización en frecuencia de un láser de diodo. El control se realiza a través de la programación de una tarjeta de tipo FPGA (Red Pitaya<sup>1</sup>), que presenta además una alternativa a muchos instrumentos de laboratorio por su muy bajo costo.

El lazo de control se generará tomando como referencia la frecuencia de resonancia de una cavidad óptica con el nombre de Fabry Perot. Con esta referencia, se obtendrá una señal de error que permita corregir las fluctuaciones de la frecuencia de la luz emitida por un láser de diodo. Estas variaciones pueden ser generadas por vibraciones mecánicas, acústicas, ruido o interferencia electromagnética, centradas en diferentes zonas del espectro. Debido a esto, se plantea realizar dos lazos de control. Uno que actúa directamente sobre la red de difracción del láser que corrija variaciones lentas en la frecuencia. Y otro que actuará directamente sobre la corriente que alimenta el láser con el fin de corregir fluctuaciones rápidas.

## 4. Actividades realizadas

### 4.0.1. Familiarización con la instrumentación

Como el objetivo de esta pasantía, descrito en la sección 6.1, gira en torno al *System on Chip* con una FPGA integrada que es la Red Pitaya (RP), la primera etapa de esta pasantía fue un análisis intensivo de cuales son las capacidades de este instrumento. Una descripción a fondo de los instrumentos implementados por la RP se encuentra en el anexo.

A modo de resumen, la RP cuenta con dos entradas digitales con un sample rate de 125 *MSa/s* por medio de una ADC con resolución de 10 bits y un rango de entrada de  $\pm 20 V$ . Cuenta también con dos salidas digitales de igual velocidad con un Output-swing de  $\pm 1 V$  entre sus características más importantes. Vamos a denominar estas entradas y salidas de la RP como "*rápidas*" pues también cuenta con entradas y salidas digitales con un menor sample rate de 100 *kS/s* que denominaremos "*lentas*".

Con esto, la RP admite las funcionalidades completas de un osciloscopio y de generador de señales en un solo dispositivo así como de analizador lógico y un recopilador de diagramas de

---

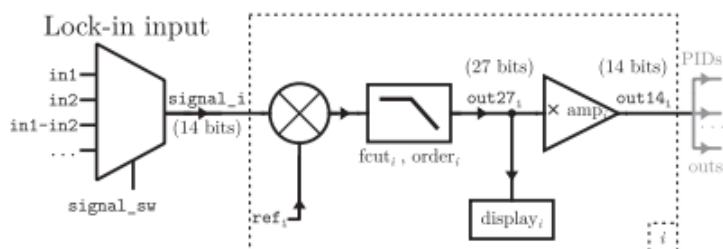
<sup>1</sup><https://redpitaya.com/stemlab-125-14/>

Bode. Todos accesibles fácilmente en una aplicación web al conectarse por medio de un cable *ethernet* a la RP.

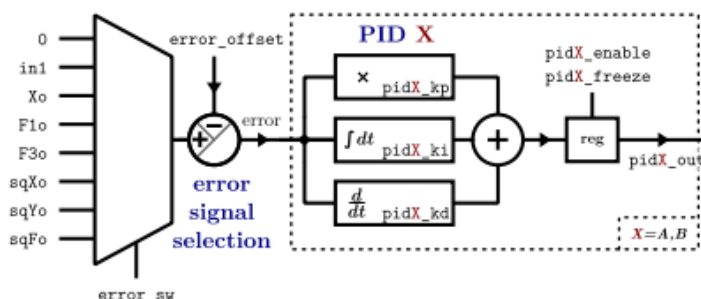
Por otro lado, se exploró a profundidad el trabajo realizado en la tesis de Marcelo Alejandro Luda *Compact embedded device for lock-in measurements and experiment active control*<sup>2</sup> por recomendación de Lorenzo Lenci. En este trabajo de posgrado se construyeron varios plug-in nuevos para la RP que implementan una serie de herramientas muy útiles para la adquisición, procesamiento digital y control en laboratorios de física.

Entre estas herramientas se incluyen filtros PID y amplificadores Lock-in para implementar sistemas de control cuyas capacidades fueron probadas en experimentos de con átomos fríos muy similares a los que se quiere realizar en el Laboratorio de Física Cuántica y Atómica.

Entonces, nuestro segundo paso fue trabajar con estas nuevas herramientas que se encuentran implementadas en dos nuevas aplicaciones. La primera, *Harmonic Lock-In*, cuenta con un amplificador Lock-in armónico de bajas frecuencias (hasta los 50 kHz) cuyo diagrama de bloques se muestra en la figura 1 y dos bloques PID (A y B) que admiten como su señal de error tanto las entradas digitales rápidas de la RP así como de las salidas del amplificador Lock-in. El diagrama de bloques de los PID se pueden ver en la figura 2.



**Figura 1:** Diagrama de bloques del Lock-In implementado por Marcelo Luda en su aplicación para la Red Pitaya. La señal  $ref_i$  representa la señal de demodulación que se utiliza en Lock-in y su frecuencia es configurable desde la aplicación.



**Figura 2:** Diagrama de bloques de los PID implementados en la aplicación.

Luego en la aplicación bajo nombre *Oscilloscope + Lock-in Amplifier*, se agrega un amplificador Lock-in de altas frecuencias hasta 30 MHz. Además, ambas aplicaciones cuentan con todas las funcionalidades básicas de un osciloscopio de dos entradas así como la capacidad de generar rampas para realizar barridos de señales en el experimento de interés. Por último, las dos aplicaciones también cuentan con un sistema de nombre "Lock Control" que permite

<sup>2</sup><https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5080345>

alternar entre diferentes estados del sistema de control. Por ejemplo, permite configurar que se cierre el lazo de realimentación con el PID al cumplirse ciertas condiciones de frontera o al pasar cierto tiempo.

Es importante explicar a fondo que es lo que hace efectivamente un amplificador lock-in. Este implementa una demodulación AM de la señal  $signal\_i$  elegida como entrada en el multiplexor de la figura 1, utilizando la demoduladora  $ref_i$  la cual puede ser una senoide en el caso del Lock-In armónico o una señal cuadrada en el caso del Lock-In de altas frecuencias.

¿Porqué es esto útil? Pues modulando el láser con la misma referencia podemos obtener una señal de error que es proporcional a la derivada de la intensidad transmitida de nuestro láser lo que nos permite establecer un lazo de control mucho más estable. Los detalles de este método lo vamos a explicar en la siguiente sección.

### 4.1. Fabry Perot

Luego de familiarizarnos con la RP, nuestro siguiente paso fue empezar a trabajar con nuestro sistema físico de interés. El lazo de control que se quiere establecer en el sistema de átomos fríos se va a hacer tomando como referencia la frecuencia de transición atómica de los átomos de Rubidio entre dos estados diferentes de excitación. Por lo tanto, como paso intermedio, se necesitaba un sistema que fuera resonante para cierta frecuencia.

Esto es efectivamente lo que hace un interferómetro de Fabry Perot que consiste en una cavidad óptica con dos espejos por la cual entra luz y la intensidad de salida es prácticamente nula salvo cuando se esta en resonancia con la cavidad. Esto se debe a que, cuando la longitud de onda de la luz incidente coincide con la separación de los espejos, se genera una interferencia constructiva aumentando mucho la intensidad de luz transmitida a la salida del Fabry Perot. De hecho, el largo de la cavidad debe ser un múltiplo de la longitud de onda y por lo tanto, hay múltiples valores para la longitud de onda para las cuales se da la resonancia. Este fenómeno es análogo al que sucede con la frecuencia de transición atómica de los átomos fríos y nos permite aplicar las diferentes funcionalidades de la RP. Una imagen de la resonancia de un Fabry Perot se puede ver en la figura 3.

Entonces, como objetivo de esta pasantía fue diseñar un sistema de control de la frecuencia de láser que entra en el Fabry Perot de tal manera que se mantenga lo más estable posible en la frecuencia de resonancia del instrumento.

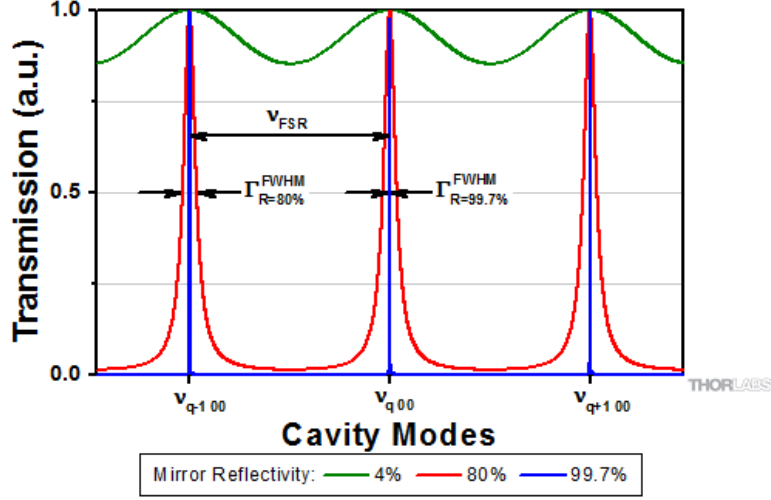
Como parte de la pasantía también se tuvo que caracterizar el Fabry Perot. Dos de sus valores característicos que fueron de particular interés para nosotros son el *Free spectral range*  $\Delta\nu_{FSR}$  que corresponde a la distancia en frecuencia a la que se encuentran dos picos de resonancia de la cavidad. Como también el *Full width at half maximum*  $\Delta\nu_C$  que es la el ancho del pico de resonancia a la mitad de su amplitud máxima. En nuestro caso son:

$$\Delta\nu_{FSR} = 480MHz \tag{1}$$

$$\Delta\nu_C = 16Mhz \tag{2}$$

#### 4.1.1. Señal de error

Para poder realizar el lazo de control lo que primero necesitamos obtener es una señal de error con la cual realimentar nuestro sistema. Vamos a buscar que sea proporcional a la derivada de la curva de resonancia de la intensidad de salida de la cavidad del Fabry Perot y que es luego detectada por un fotodiodo.



**Figura 3:** Resonancia de un cavidad de Fabry Perot para diferentes niveles de reflectividad de los espejos interiores.

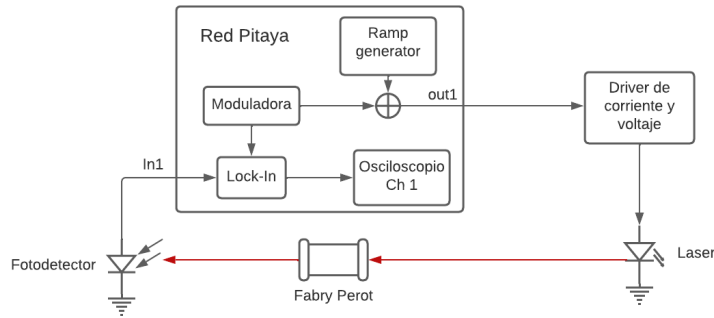
El láser que utilizamos cuenta con una red de difracción ajustable por medio de un componente piezo-eléctrico el cual podemos controlar a partir de un voltaje. Entonces, introduciendo voltajes sobre la red, podemos cambiar la frecuencia de nuestro láser. Es así, que aplicando una señal sinusoidal en el piezo podemos modular el láser.

En más detalle, lo que se está haciendo es introducir un factor variable en el tiempo en la fase del campo eléctrico que compone el láser como se muestra en la ecuación 3.

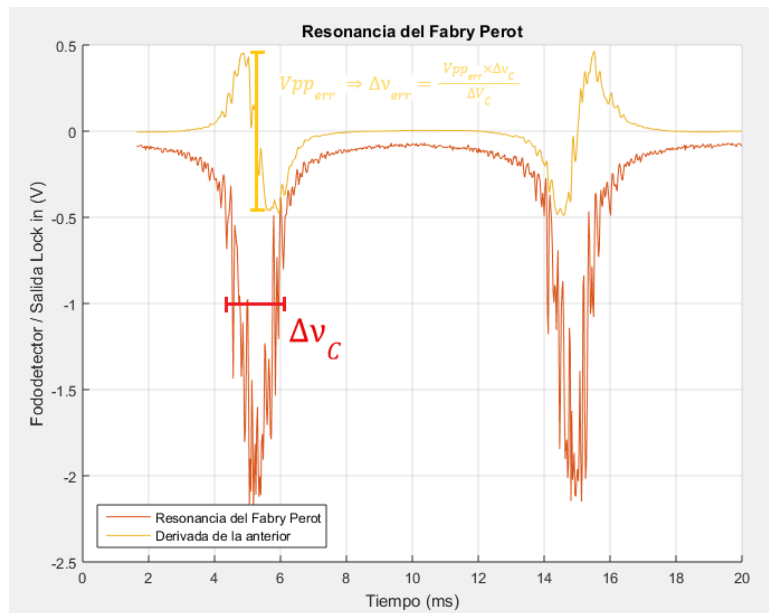
$$E(t) = E_o e^{i\omega_o t + A \cdot \sin(\omega_{ref} t)} \quad (3)$$

donde  $\omega_{ref}$  es la frecuencia de modulación elegida desde la interfaz gráfica de la RP. Luego, suponiendo  $A$  muy chico se puede aproximar el campo por su desarrollo de Taylor de primer orden que será lineal en función a la moduladora y por lo tanto se puede usar el esquema de Lock-in descrito antes para obtener la derivada de la intensidad. El diagrama de bloques utilizado para generar la señal de error se puede ver en la figura 4. En la figura 5 se puede observar la señal de error graficada junto con el pico de resonancia del Fabry Pérot.

Como el máximo y mínimo de la derivada corresponde al máximo a los puntos se pasa por la mitad de la amplitud máximo del pico de resonancia se puede deducir lo siguiente. Entre el máximo y mínimo de la señal de error hay una variación de frecuencia del láser de  $\Delta\nu_C$ , o sea  $16 \text{ MHz}$ . Con este luego se medirá la estabilidad del láser.



**Figura 4:** Diagrama de bloques del sistema para obtener la señal de error. El bloque *Ramp Generator* se utiliza para generar una rampa para barrer la frecuencia del láser utilizando la red de difracción a través del driver. A la rampa se le suma la moduladora que va también a la red de difracción y nos permite con el *Lock-in* generar la señal de error.



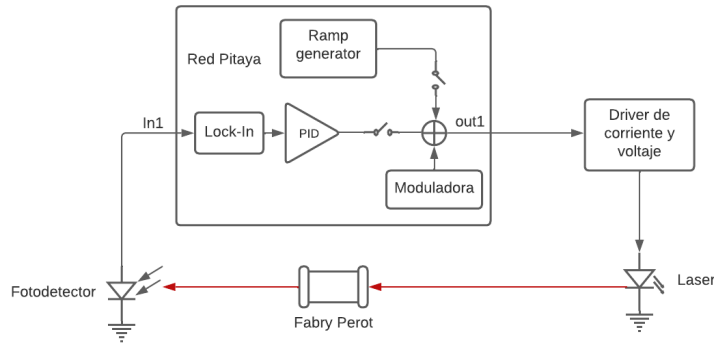
**Figura 5:** Señal de error generada a partir del diagrama de bloques de 4.

#### 4.1.2. Lazo de control lento

Una vez que se pudo obtener correctamente la señal de error, se pasó a realizar el lazo lento. Para ello se planteó el esquema de la figura 18 con el cual se pudo cerrar correctamente el lazo y así establecernos de manera constante en el pico de resonancia de nuestro Fabry Perot. Se pudo establecer que la frecuencia del láser tiene una estabilidad del orden de los 12 MHz.

#### 4.1.3. Lazo de control rápido

Nuestro siguiente objetivo fue agregarle a nuestro lazo de control lento el lazo rápido que actuara sobre la corriente. Para lograr esto, se encontraron varios inconvenientes. El primero es que el piezo es un dispositivo mecánico y por lo tanto no responde a las altas frecuencias a las cuales queremos modular el láser.

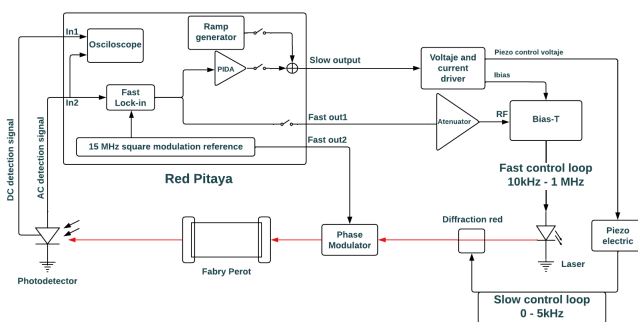


**Figura 6:** Diagrama de bloques para el lazo de realimentación lento. La señal de error obtenida a la salida del *Lock-In* pasa un PID donde solo se utiliza el control proporcional e integral con constantes  $k_p = 0,025$  y  $\tau_i = 179ms$  respectivamente. En un principio, se barre la frecuencia del láser con la rampa y cuando se llega a un pico de resonancia se abre el interruptor que conecta la misma con la salida y se cierra el lazo conectando la salida del PID.

Por lo tanto se moduló por otro método que consistió en utilizar un modulador de fase que es un dispositivo óptico que permite modular directamente la luz del láser. Por otro lado, se encontró también la limitante del ancho de banda del fotodetector que estábamos usando que llegaba apenas a los cientos de  $kHz$ . Se tuvo que probar diferentes detectores teniendo que tener en cuenta el compromiso entre ganancia y ancho de banda.

Otra limitante con la que nos encontramos fue la cantidad de salidas/entradas rápidas de la RP. Para poder realizar el lazo de control rápido, necesitamos una salida rápida para la moduladora y otra para corregir la corriente que entra la láser por medio de un Bias-T<sup>3</sup>. Entonces, nos quedamos sin salidas rápidas para el lazo lento.

Por suerte, como para el lazo lento se realizan correcciones sobre el piezo de la red de difracción del láser, no se necesita gran ancho de banda para esta señal. Entonces, se pudo utilizar para la señal de control una de las salidas lentas de la RP quedando el esquema general de conexiones como muestra la figura 7.



**Figura 7:** Diagrama de bloques para el control rápido. El lazo de control lento queda igual al de la figura 18 mientras que se agrega el lazo rápido cuya señal de realimentación se conecta directamente al láser por medio del Bias-T. En este esquema, también se barre la frecuencia del láser con la rampa hasta encontrar un pico de resonancia en cuyo momento se desconecta la rampa de la salida y se cierran los interruptores para las señales de control rápido y lento.

<sup>3</sup>Componente de radiofrecuencia que permite sumarle a una señal de baja frecuencia otra de radiofrecuencia

Para más detalle de la configuración específica de cada bloque de la red pitaya referirse a la sección 7.2 del anexo.

## 5. Conclusiones y resultados

A partir de los esquemas de control explicados antes se realizaron repetidas mediciones sobre la estabilidad del láser en lazo cerrado.

Con la primera configuración, se alcanzó una estabilidad del orden de  $850\text{kHz}$  medido en un periodo de  $30\text{ms}$  a una tasa de muestreo de  $100\text{kSa/s}$ . Esto equivale a una *Allan deviation* [1] de  $\frac{\Delta\nu}{\nu} = 2,24 \times 10^{-9}$ . Donde  $\nu$  es la frecuencia del láser que es de  $385\text{THz}$ .

Agregando el control por corriente a nuestro esquema se logró una desviación media de la frecuencia del láser de  $412\text{kHz}$  que equivale a  $\frac{\Delta\nu}{\nu} = 1,07 \times 10^{-9}$ .



Informe final

---

Responsable  
técnico:

Lorenzo Lenci

Dr. Lorenzo Lenci  
Grado 3, Laboratorio de Física Cuántica y Atómica, Ins-  
tituto de Física, Facultad de Ingeniería

Estudiante:

Julián Evia

Julián Evia

## 6. Anexo: Guía de uso para la Red Pitaya en el laboratorio

### 6.1. Introducción

A pedido del laboratorio, se realizó una guía de uso de la Red Pitaya (RP) con el objetivo que quede documentado el trabajo que se realizó en la misma. Se describirá las mayores fortalezas y limitaciones con la que cuenta el hardware así como una guía práctica de como utilizarla para establecer un lazo de control digital para estabilizar la frecuencia de un diodo láser

### 6.2. Fortalezas y limitaciones

La gran ventaja con la que cuenta la Red Pitaya es poder establecer un lazo de control de manera rápida, repetible, con gran precisión y permitiendo variar la transferencia del lazo de realimentación cuando el lazo se encuentra cerrado.

A pesar de esto, la RP cuenta con solo con dos entradas y salidas rápidas (mayor ancho de banda,  $125\text{Mhz}$ ) con conexiones SMA. Esto limita los esquemas de realimentación que podemos establecer. Por ejemplo, como se verá más adelante no se puede establecer al mismo tiempo un lazo de control sobre la corriente y piezo de un láser utilizando la señal propia de modulación de la RP con solo con estas salidas. Como alternativa, la RP cuenta con salidas analógicas con ancho de banda (señales lentas) reducido con conexiones Dupont macho.

### 6.3. Herramientas

Para poder controlar la RP, se utilizó dos herramientas desarrolladas por Marcelo Luda en su tesis de doctorado [2], *Oscilloscope+Lock-In+PID* y *Harmonic Lock-In+PID*. En las dos se encuentra las mismas herramientas con diferentes variaciones. Para ver más la implementación explícita de cada una de las herramientas ver la tesis de Marcelo Luda [2]. También tomamos referencia del trabajo realizado en la universidad de Darmstadt, Alemania [3]. A continuación se describen los instrumentos y herramientas contenidos en las dos aplicaciones estudiadas.

#### 6.3.1. Osciloscopio

Ambas aplicaciones tienen todas las capacidades de un osciloscopio de dos canales. Como se puede ver en la figura 8, la selección de las señales que muestran los dos canales se encuentra en la primera ventana desplegable a la izquierda. No solo se puede seleccionar las entradas analógicas rápidas, sino también cualquier señal intermedia dentro de la RP. Por ejemplo, se puede ver la señal generada a partir del Lock-In interno de la RP. En el menú desplegable a la derecha en la figura 8 se encuentra todas las opciones de trigger, escalas, entre otros. Un detalle importantes es que las entradas de la RP son de  $\pm 1\text{V}$ . Si se quisiera ver una señal de mayor amplitud, las entradas rápidas cuentan con un jumper que atenúa la señal de entrada permitiendo señales de entrada de alto voltaje (hasta  $\pm 30\text{V}$ ) similar a las puntas x10 de una punta de osciloscopio. Para compensar la atenuación generada en la entrada, la herramienta cuenta en su submenú *Gain Settings* la opción de *High Voltaje (HV)*.

#### 6.3.2. Generador de señales

Como muestra la figura 9, se puede configurar las salidas rápidas y lentas de la RP. En la herramienta *Harmonic Lock In* las salidas lentas no funcionan. Como se verá más adelante, la RP cuenta con dos lock-in, uno rápido y uno más lento (llamado armónico). Las señales de mayor interés para nosotros van a ser las siguientes:

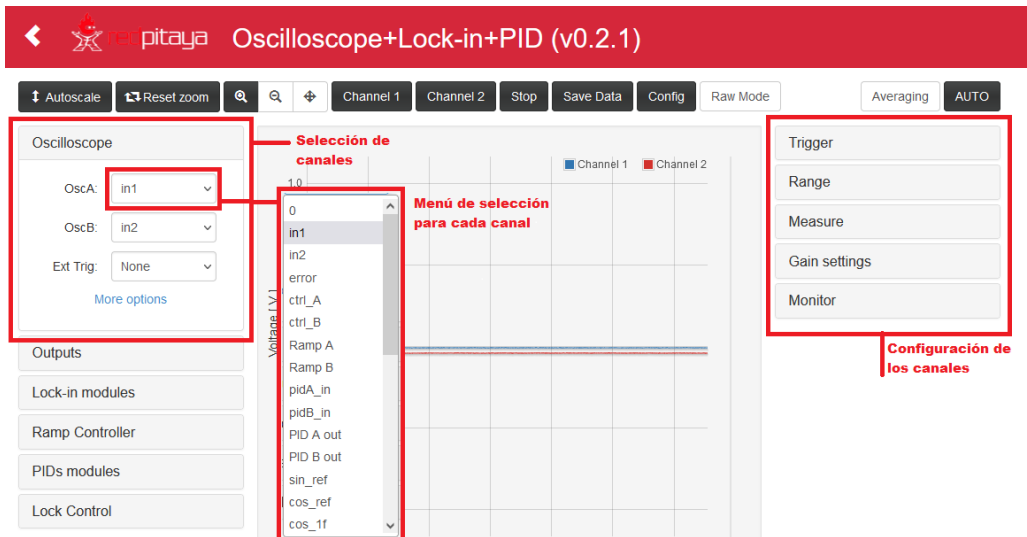


Figura 8: Herramienta de osciloscopio de la RP

- square\_ref y cos\_f que son las moduladoras que genera la RP para modular el laser y para demodular en su Lock-In interno.
- Las señales de salida del Lock in rápidos y del armónico,  $sqFo$  y  $Xo$  respectivamente. Estas serán nuestras señales de error para el lazo de realimentación como se discutirá más adelante.
- PIDA out y PIDB out que son las salidas de los PID que implementa la RP.
- Ctrl\_A y Ctrl\_B, que corresponden a las salidas de los PID A y B, a las cuales se puede sumar una rampa (activandola como se verá mejor más adelante).

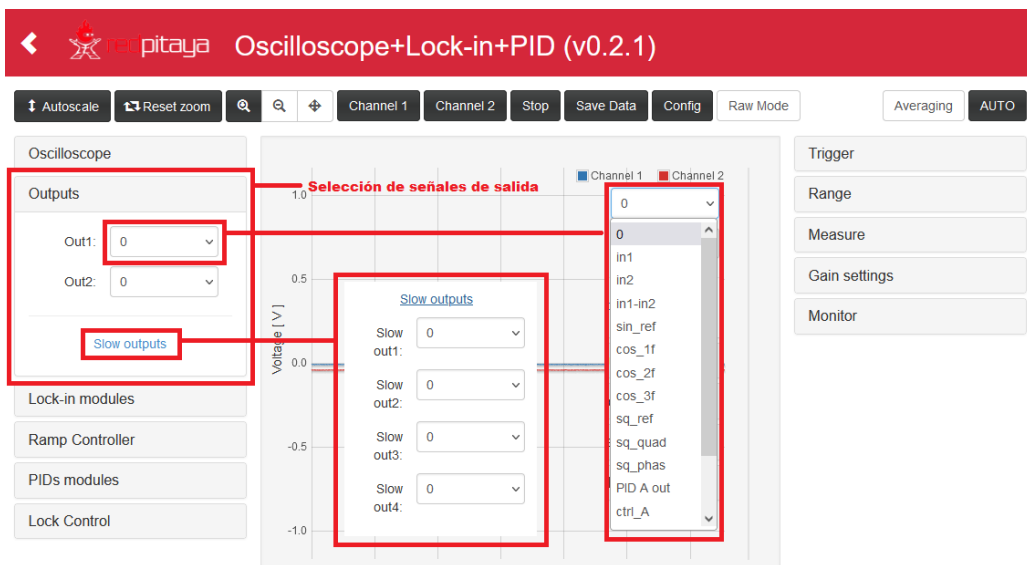


Figura 9: Herramienta de generador de señales de la RP

## 6.4. Generador de rampa

Esta herramienta permite generar una rampa que se suma a la salida en la señal de nombre `Ctrl_A`. Conectándola al piezo que controla la red de difracción, permitiendo barrer la frecuencia del láser.

La figura 10 muestra los tres campos que permiten controlar las propiedades de la rampa. El primero, determina la frecuencia de la rampa y los otros dos la amplitud de subida y la de bajada respectivamente. Los valores enteros que se colocan en los cuadros de texto no son directamente el valor en  $mV$ . Por ejemplo, un valor de 5000 son  $610mV$  como puede verse también en la figura. También se encuentra tres check boxes para poder habilitar o no la rampa, reiniciar el scan, cambiar la dirección o generar un diente de cierra en vez. El factor *Ramp B factor* determina la rampa B a partir de la A multiplicándola por el cociente entre este factor y 4096.

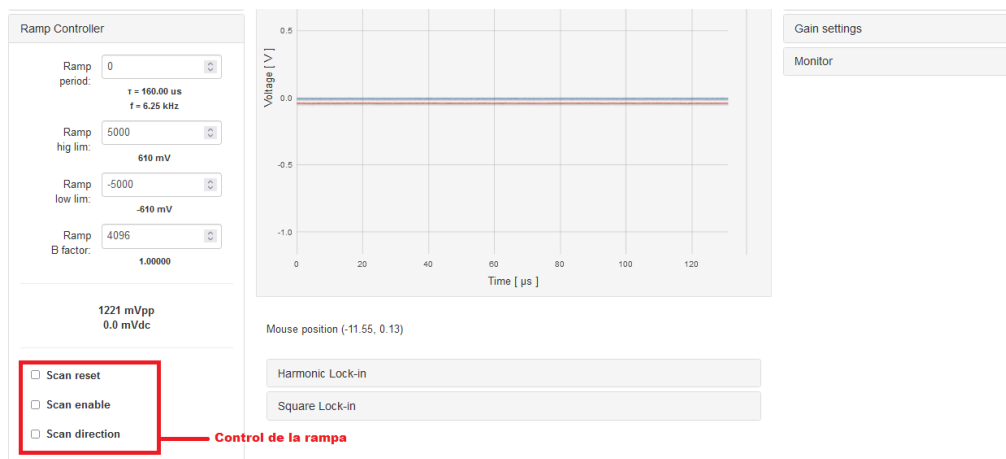


Figura 10: Menú de configuración de la rampa

### 6.4.1. PID

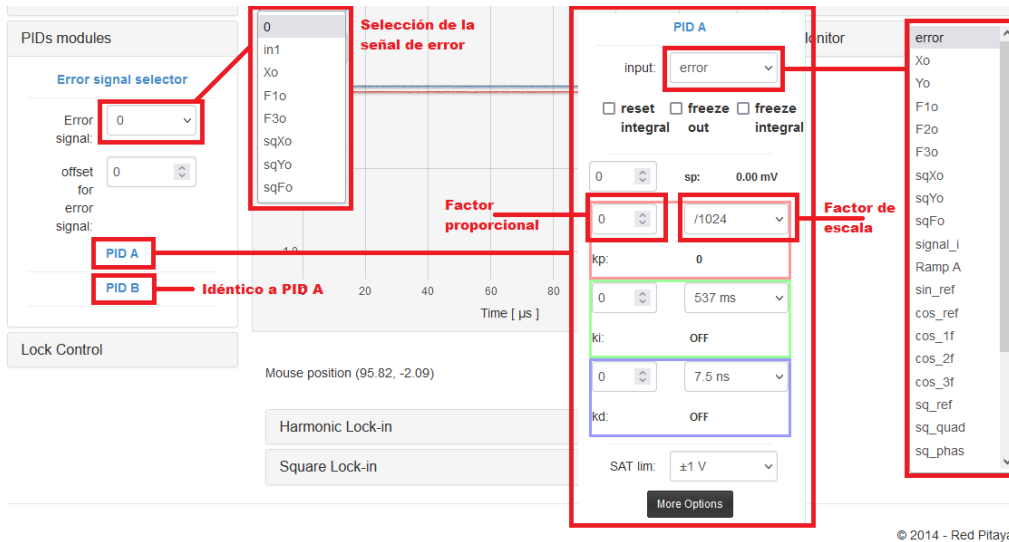
Ambas aplicación cuentan con dos bloques PID, A y B, independientes con entrada configurable a partir de una gran lista de posibles opciones. Primero se puede seleccionar una señal de entrada del PID, denominada como *error*, y agregarle un offset a la misma tanto positivo como negativo como se muestra en la figura 11. Luego, esta señal de error se puede seleccionar como entrada en cada uno de los PID o usar otra señal, permitiendo además que los PID actúen sobre señales diferentes.

Como muestra la figura 11, en cada bloque PID se puede configurar la constante de proporcionalidad, integral y derivativa por medio de un factor de escala y otro proporcional.

Una aclaración importante, es que la salida de cada bloque A y B, que se llaman `PID_out A` y `PID_out B` respectivamente son multiplicadas por un factor  $-1$ . Como ya se menciona antes, a la salida de cada PID se puede sumar a la rampa de igual nombre en las señales de nombres `Ctrl_A` y `Ctrl_B` como muestra la figura 11.

### 6.4.2. Lock-in

Entre ambas aplicaciones hay dos Lock-in diferentes. Uno armónico, que realiza la demodulación en fase de una entrada elegida utilizando una sinusoidal de referencia que puede llegar

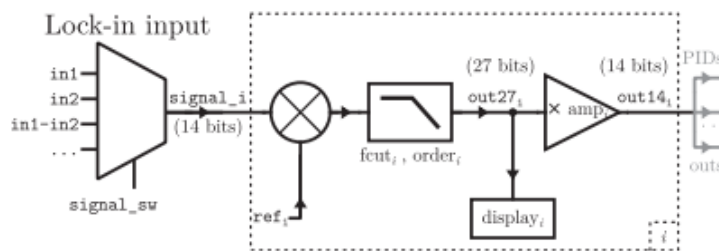


**Figura 11:** Configuración de los PID internos de la RP. Notar que en el menú desplegable del PID A el botón *More options* esta precionado. Sin este no fuera el caso, la configuración del PID A se ve reducida con menos opciones para la señal de entrada y no aparece la constante de escala para los tres bloques.

hasta los  $50kHz$ , y que se encuentra en ambas aplicaciones. Mientras que en *Oscilloscope+Lock-In+PID* se encuentra un Lock-In de alta frecuencia utilizando señales cuadradas hasta los  $30MHz$ .

Un diagrama de bloques válido para las dos versiones se puede ver en la figura 12. El lock-in implementa una demodulación AM de la señal  $signal_i$  elegida como entrada en el multiplexor de la figura, utilizando la demoduladora  $ref_i$ . Luego, se filtra la señal obtenida con un LPF de frecuencia de corte y orden configurable y se puede amplificar la señal por un factor de potencia de dos.

En la figura 13 se puede ver una tabla donde se encuentra el nombre de la señal de salida del Lock-In para cada posible demoduladora utilizada.



**Figura 12:** Diagrama de bloques de los Lock-In implementados internamente en la RP.

### Harmonic Lock-in

Esta herramienta se encuentra en ambas aplicaciones pero cuenta con funcionalidades diferentes en las dos. La versión más completa se encuentra en *Harmonic Lock In+PID*. El menú de configuración de esta herramienta se muestra en la figura 14. En la casilla *Period* se puede elegir la frecuencia de la moduladora y en *Phase* el desfase que cuenta la misma. Bajo la ventana de *Demodulation* se puede configurar por separado cuatro demodulaciones, con un coseno

i	ref <sub>i</sub>	Signal equation	fcut <sub>i</sub> name	order <sub>i</sub> name	amp <sub>i</sub> name	out2 <sub>i</sub> name	out1 <sub>i</sub> name
1	cos_ref	$\cos(2\pi ft)$	lpf_FL_tau	lpf_FL_order	sg_amp1	X	Xo
2	sin_ref	$\sin(2\pi ft)$	lpf_FL_tau	lpf_FL_order	sg_amp1	Y	Yo
3	cos1f	$\cos(2\pi ft - \phi)$	lpf_FL_tau	lpf_FL_order	sg_amp1	F1	F1o
4	cos2f	$\cos(2\pi 2ft - 2\phi)$	lpf_F2_tau	lpf_F2_order	sg_amp2	F2	F2o
5	cos3f	$\cos(2\pi 3ft - 3\phi)$	lpf_F3_tau	lpf_F3_order	sg_amp3	F3	F3o
6	sq_ref	$\text{sgn}(\cos(2\pi f_{sq}t))$	lpf_sq_tau	lpf_sq_order	sg_amp_sq	sqX	sqXo
7	sq_quad	$\text{sgn}(\sin(2\pi f_{sq}t))$	lpf_sq_tau	lpf_sq_order	sg_amp_sq	sqY	sqYo
8	sq_phas	$\text{sgn}(\cos(2\pi f_{sq}t - \phi))$	lpf_sq_tau	lpf_sq_order	sg_amp_sq	sqF	sqFo

**Figura 13:** En la columna de más a la derecha se puede ver el nombre que utilizan las aplicaciones de la RP para identificar la salida de los Lock-In dependiendo de la demoduladora utilizada que se puede ver en la tercera columna.

y seno con la frecuencia elegida anteriormente y un coseno desfasado una, dos o tres veces la fase elegida antes. Cada configuración se encuentra bajo las subventanas  $Xo$  &  $Yo$ ,  $F1o$ ,  $F2o$  y  $F3o$  respectivamente. En cada una de estas subventana, se puede configurar el valor del LPF y el factor de amplificación.

El lock-in armónico presenta alguna diferencia entra las dos aplicaciones. La más importante, es que en *Harmonic Lock-In+PID* se cuenta con la capacidad de sumar la sinusoidal de referencia que se utiliza para demodular a la salida Ctrl\_A o B junto a la rampa y a la salida del PID respectivo. Esto permite simplificar mucho el esquema de la realimentación como se discutirá más adelante. La amplitud de la onda sinusoidal que se suma a estas señales se puede configurar en el submenú auxiliar.



**Figura 14:** Menú de configuración del Harmonic Lock In para la aplicación *Harmonic Lock-In+PID*

### Fast square Lock-in

El Fast square Lock-in solo está presente en *Oscilloscope+Lock-In+PID* y se configura e utiliza de igual manera que el *Harmonic Lock-in* explorado antes. Cuenta con selección de la frecuencia de oscilación, desfasaje, frecuencia de corte del LPF y amplificación de la señal resultante. Lo único con lo que no cuenta es con la capacidad de sumar a la señal Ctrl\_A o B la moduladora lo cual hace que sea necesario utilizar una de las salidas rápidas para poder modular en fase el láser. Esto trae complicaciones como se discutirá más adelante. El menú de configuración de esta herramienta se puede ver en la figura 15.

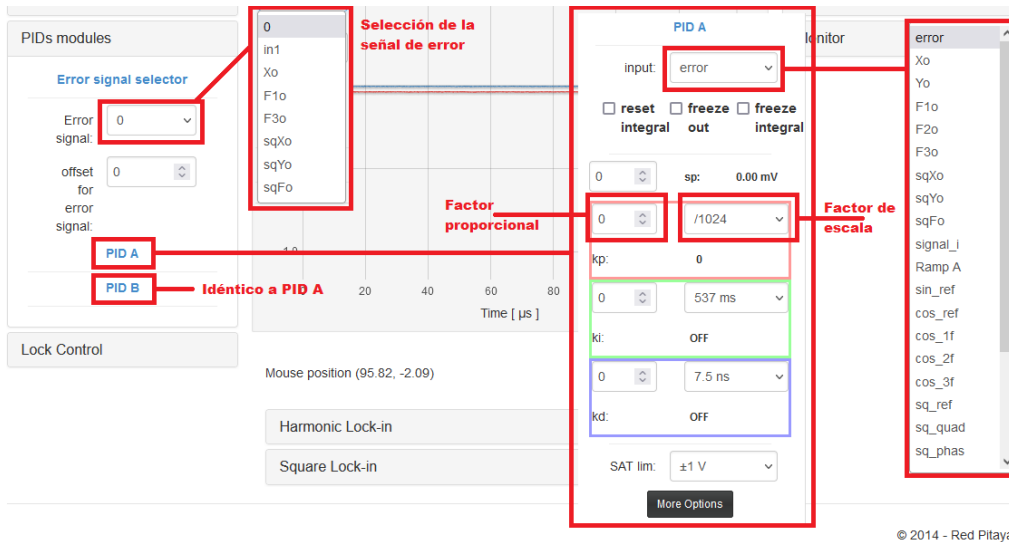


Figura 15: Menú de configuración del Fast square Lock-In.

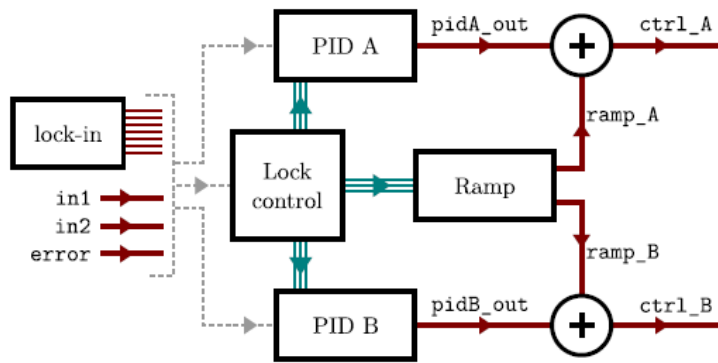
### 6.4.3. Lock control

Un esquema de bloques de como funciona el *Lock Control* se muestra en la figura 16. Este permite, controlar el prendido y apagado de los diferentes bloques que lo componen y de esta manera obtener a la salida en las señales Ctrl\_A y B la suma de las señales deseadas. Además, tiene capacidad de *Re-Lock* del sistema una vez que se cerró el lazo y de medición de la respuesta al escalón aunque estas opciones no se exploraron en profundidad.

Una de las mayores ventajas de la RP frente al montaje puramente analógico del sistema de control es la capacidad de cerrar el lazo de realimentación en el punto deseado con un simple click. El menú de configuración del *Lock control* se observa en la figura 17. En los botones marcados como 1 se encuentra el control maestro de la activación tanto de la rampa como de los PID a la salida Ctrl\_A o B. Es decir, cuando esta presionada la rampa, como muestra en la figura 21 esta se encuentra sumada la señal Ctrl\_A.

Lo siguiente a configurar es el lockeo del sistema. Por ejemplo, en un principio se puede tener la señal Ctrl\_A solo con la rampa para barrer la red de difracción y se desea que, cuando se cierre el lazo, se apague la rampa y se prenda el PID A. Para esto se debe seleccionar en la figura 17 en las opciones marcadas como 2 PID A y no tener seleccionada la rampa. Luego, es necesario elegir el trigger para el lockeo. Hay tres opciones, por tiempo, por nivel de una señal o por tiempo y nivel. La primera opción consiste en que, pasado el tiempo especificado se realizan los cambios a las señales de control especificadas antes. Por nivel se da el cambio cuando la señal de referencia alcanza cierto valor y por tiempo y nivel se deben cumplir las dos condiciones. Para hacer más fácil la configuración el botón *Choose from graph* permite elegir el punto en la pantalla del osciloscopio y se completan automáticamente los valores de tiempo y nivel con los del cursor.

Para poder cerrar el lazo, habilitar el botón de *Lock* que indica a la RP de empezar a buscar una de las condiciones especificadas antes para cerrar el lazo de nuestro sistema. Por último, esta herramienta cuenta con capacidad de auto lockeo que permitirían prender de manera automático la rampa cuando el sistema se desestabiliza y encontrar devuelta la condición de lockeo y cerrar el lazo correctamente.



**Figura 16:** Diagrama de flujo de los datos en el RP, entran por una de las entradas a un Lock-In (o no), su salida entra en alguno de los PID cuya salida se ve sumada con la rampa. El prendido y apagado de cada uno de los bloques se encuentra controlado por el Lock-control. *Imagen extraída de [2]*



**Figura 17:** Menú de configuración del Fast square Lock-In.

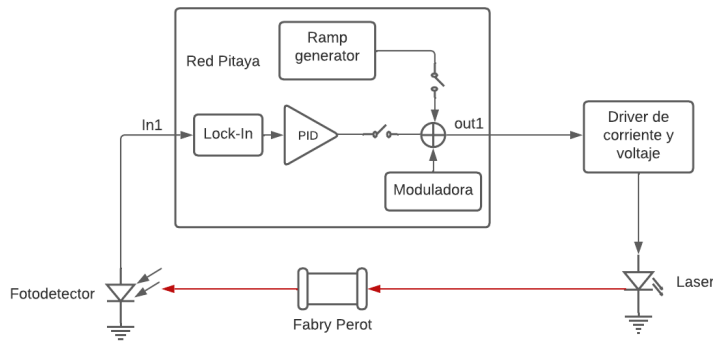
## 6.5. Como establecer un lazo de control con la RP

Con todas la herramientas exploradas, vamos a establecer un lazo de control sobre un sistema que permita estabilizar la frecuencia de un didod láser. Se utilizará la resonancia de un Fabry-Perot para generar la señal de error del sistema de control. Analizamos ahora el caso en el cual se controla la frecuencia del láser solo actuando sobre el piezoeléctrico que sostiene la red de difracción. El detector en uso debe tener un ancho de banda mayor a los 100 kHz. El esquema del sistema de control se muestra en la figura 18.

Debido a que el piezo es un dispositivo mecánico alimentado por un gran voltaje tiene un ancho de banda acotado de los pocos kHz. Entonces, no es de interés establecer un lazo de control con gran ancho de banda pues el piezo solo va a poder corregir variaciones de baja frecuencia. Además, debemos realizar la modulación y control del láser con una sola salida rápida y por lo tanto la aplicación *Harmonic Lock-In + PID* es la que mejor se ajusta a nuestras necesidades.

Empecemos primero configurando la rampa con un periodo de  $2,5Hz$  y una amplitud pico a pico de  $120mV_{pp}$  como muestra la figura 19. Podemos configurar la salida con la señal *Ctrl\_A*





**Figura 18:** Diagrama de bloques para el lazo de realimentación lento donde out1 representa una de las salidas rápidas de la RP configurada en Ctrl\_A e In1 una de las entradas rápidas.

para poder ver en el osciloscopio de la RP la resonancia del Fabry Perot <sup>4</sup>. Luego, el Lock-in lo configuramos para utilizar una sinusoidal de  $3,1kHz$ , elegimos una frecuencia de corte de  $303Hz$  y un factor de amplificación de  $\times 16$ . También tenemos que configurar para que la sinusoidal de referencia se sume a la señal Ctrl\_A con una amplitud de 10 ( $1V = 8192int$ ). Todo esto se puede ver en la figura 20.

Seleccionando la señal  $F1o$ <sup>5</sup> en el osciloscopio podemos ver la derivada de la entrada y con esto podemos ajustar la fase para maximizarla. En el osciloscopio la derivada puede saturar en  $\pm 1V$ , esto quiere decir que el factor de amplificación elegido en el Lock-in es muy grande.

Una vez hecho esto, podemos configurar el PID para la realimentación. En este caso vamos a seleccionar directamente como entrada  $F1o$  Usaremos solamente el integrador con constante  $\tau_i = 358ms$ .

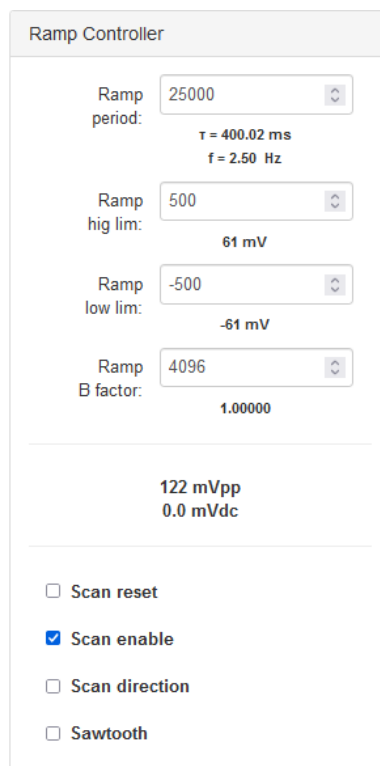
Un punto importante a tener en cuenta es cual va a ser el signo correcto de la señal de realimentación del piezo para que se cierre el lazo. Lo más sencillo es probar, si no se cierra con la primera opción se puede hacer que la multiplicación del PID sea negativa o cambiando la fase de la derivada 180 en el Lock-In. Como regla general, si deseamos lockearnos en un pico de resonancia que sucede durante una subida de la rampa, buscamos una señal de realimentación que tenga signo contrario a las variaciones de nuestro sistema. Es decir, si nos movemos ligeramente hacia la derecha del pico esto se ve como un pequeño incremento positivo en el voltaje sobre el piezo. Entonces la señal de corrección debe ser contraria, osea un decremento en el voltaje aplicado. Entonces, teniendo en cuenta que los bloques PID invierten su salida (multiplican por  $-1$ ), es necesario que la señal de error  $F1o$  tenga el mismo signo que la derivada del pico de resonancia sobre el cual nos vamos a lockear.

Para configurar el Lock control, debemos primero seleccionar que el Control A sea activado y la rampa apagada cuando se cierre el lazo. Luego, elegimos como trigger el tiempo y con el botón *Choose from graph* podemos seleccionar el tiempo en el cual el lazo se debe cerrar a partir de la pantalla del osciloscopio. La configuración de este bloque se puede ver en su totalidad en la figura 21

Con todo esto hecho, el sistema ya quedó configurado y en cualquier momento se puede hacer clic sobre el botón de *Lock* del menú para cerrar el lazo.

<sup>4</sup>Recordar en tener activada la rampa en el control maestro del Lock control

<sup>5</sup>que corresponde a demodular utilizando la  $\cos(2\pi f - \Phi)$  donde  $\Phi$  es el desfase elegido en el menú del Lock-in.



**Figura 19:** Configuración de la rampa para establecer el lazo de control lento. No es necesario utilizar estos mismos valores ya que es solo un ejemplo. El criterio a tomar es que la rampa sea mucho más lenta que la moduladora.

## 7. Configuraciones exploradas

### 7.1. Control por piezo, lazo lento

La configuración más simple que se puede realizar con la RP es la explorada en las sección 6.5 donde se realimenta el sistema por medio del piezo de la red de difracción en la cavidad del láser.

### 7.2. Control por corriente y piezo, lazo lento y rápido

Partiendo desde la base de la configuración anterior pero utilizando la aplicación *Oscilloscope + Lock-in + PID*, la idea es incorporar una nueva señal de control de mayor ancho de banda al sistema. Se va a usar la corriente del láser para realizar esta corrección. Para esto es necesario incorporar un Bias-T a la entrada de corriente de láser para poder sumar una señal AC (la señal de control) a la DC que va a ser la corriente de alimentación del láser.

Acá hay que tener cuidado, pues la entrada RF de los Bias-T tienen un ancho de banda que suele empezar desde algún valor en las decenas o cientos de  $kHz$  hasta los  $GHz$ . El límite superior no nos importa, pero el inferior limita el ancho de banda en el cual se puede corregir con esta nueva señal de error. Además, esto seguramente significa que haya una banda oculta entre el ancho de banda del lazo lento y el comienzo del rápido.

En nuestro caso, el Bias-T tiene un límite inferior de  $10kHz$ , entonces tendremos una banda entre el polo que impone el piezo y  $10kHz$  en la cual las señales de error se van a ver atenuadas y no corregirán del todo bien.

**Figura 20:** Configuración del Lock-In para establecer el lazo de control lento. La fase se eligió tal que maximizara la amplitud de la señal F1o que corresponde a la salida del Lock-In.

Con esto dicho, el esquema de la configuración es el que se muestra en la figura 23. Notar que fue necesario utilizar una de las salidas de ancho de banda reducido para establecer el control por el piezo, lo cual no es un problema por la naturaleza de ancho de banda chico de este lazo.

En el proceso de establecer este esquema nos encontramos con ciertas particularidades de la RP. Primero, analizando el espectro de la señal que sale por los PID este contiene una gran cantidad de ruido en frecuencia que lo agrega la RP. En el lazo lento, debido a que se integra con una constante del orden de los milisegundos, se filtra este ruido y no afecta al lazo. Pero al intentar utilizar el PID B para el lazo rápido, como esta señal de corrección cuenta con mayor ancho de banda, el ruido desestabiliza el sistema.

Es por esto que se decidió utilizar directamente la salida del Lock-in como señal de corrección y atenuarla de manera analógica por afuera de la RP. Notar que es necesario atenuar bastante la señal y se utilizaron varios atenuadores en serie llegando a tener  $16dB$  de atenuación.

### 7.3. Exportación e importación de configuraciones

Las aplicaciones de las RP permite exportar todos los datos de una configuración e importar los de una previamente guardada. Para hacer esto se puede ver en la figura (AGREGAR) el menú que se despliega al tocar el botón de *Config* en la parte superior de la pantalla. Adjunto

Lock Control

Re-lock system

Step Responce Measurement

Scan enable

PID A enable

PID B enable

Trigger Lock

Lock Now

config

Scan enable

PID A enable

PID B enable

Trigger type: Time trigger

Time trigger: 16984120

T = 135.873 ms

Choose from graph

Auto-zoom

**Figura 21:** Configuración del Lock Control para establecer el lazo lento.

a esta guía se encuentran los archivos correspondientes a las dos configuraciones exploradas antes.

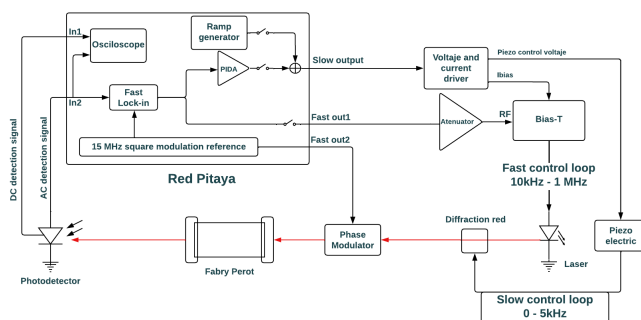


Figura 22: Diagrama de bloques para el esquema de control de corriente más el piezo.

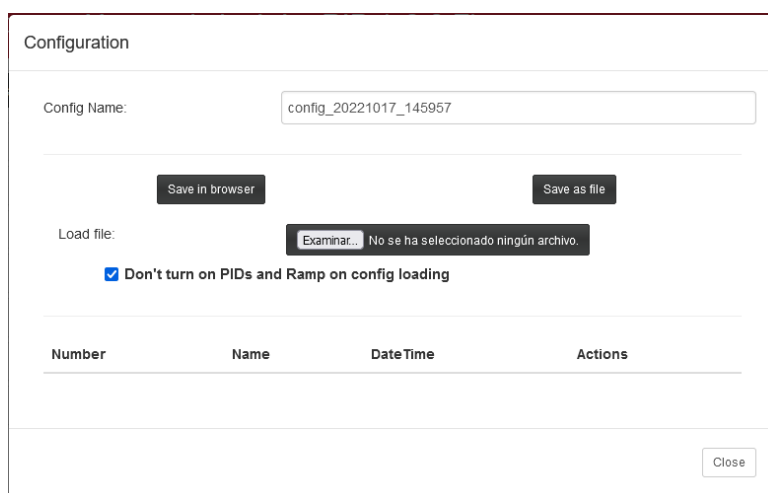


Figura 23: Menú para exportar e importar configuración de las distintas aplicaciones de la RP.

## Bibliografía

- [1] Wikipedia, the free encyclopedia. (2022, October) Allan variance. Wikipidia.
- [2] C. T. S. Marcelo Alejandro Luda, Martin Drechsler and J. Codnia, “Compact embedded device for lock-in measurements and experiment active control,” Review of scientific instruments, Departamento de Física and IFIBA, FCEyN, UBA, Pabellón 1, Ciudad Universitaria, 1428 Buenos Aires, Argentina, 2019. [Online]. Available: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5080345>
- [3] M. S. T. Preuschoff and G. Birkl, “Digital laser frequency and intensity stabilization based on the STEMLab platform (originally Red Pitaya),” Review of scientific instruments, Institut für Angewandte Physik, Technische Universität Darmstadt, Schlossgartenstr. 7, 64289 Darmstadt, Germany, 2020. [Online]. Available: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0009524>