

# Optical frequency reference stabilized to Rb D<sub>2</sub> transition controlled by FPGA lock-in module

## Referencia de frecuencia óptica estabilizada a una transición D<sub>2</sub> de Rubidio controlada por un módulo de lock-in desarrollado en FPGA

M. Luda<sup>1\*</sup>, J. Codnia<sup>1</sup>

1. Departamento de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones DEILAP (CITEDEF-CONICET) - Juan Bautista de La Salle 4397 - (B1603ALO) - Villa Martelli - Prov. Buenos Aires - Argentina

\*E-mail: [mluda@citedef.gob.ar](mailto:mluda@citedef.gob.ar)

Received: 01/12/2017

Accepted: 08/01/2018

DOI: 10.7149/OPA.51.1.49037

### ABSTRACT:

Lock-in measurement is frequently used for tunable laser wavelength stabilization in metrology, spectroscopy atomic physics and quantum optics labs. In particular, wavelength stabilization to atomic transitions is used to build optical frequency references. In this work we present the development of a stabilization module build using FPGA (*Field Programmable Gate Array*) technology for modulating at  $f$  frequency and lock-in demodulating on  $f$  and  $3f$  frequencies. The module is economic, versatile and can be remotely controlled using a Free Software platform. We tested the system performance stabilizing a tunable External Cavity Diode Laser (ECDL) to a Rubidium (Rb) hyperfine transition, achieving an optical frequency standard deviation of 100 kHz, equivalent to an stability of  $2.6 \cdot 10^{-10}$ .

**Key words:** ECDL, lock-in, Rubidium

### RESUMEN:

La modulación y demodulación *lock-in* es utilizada con frecuencia para la estabilización de la longitud de onda de emisión de un láser sintonizable en laboratorios de metrología, espectroscopia, física atómica y óptica cuántica. En particular, la estabilización a una transición atómica particular es utilizada para generar patrones de frecuencia óptica de referencia. En este trabajo se presenta el desarrollo de un módulo de estabilización con tecnología de electrónica programable FPGA (del inglés, *Field Programmable Gate Array*) que permite realizar la modulación a frecuencia  $f$  y demodulación *lock-in* en frecuencias  $f$  y  $3f$ . El módulo es económico, versátil y se puede controlar remotamente usando una plataforma de Software Libre. Se probó el desempeño del sistema estabilizando un láser sintonizable por cavidad externa (ECDL, del inglés *External Cavity Diode Laser*) a una de las transiciones hiperfinas del Rubidio (Rb), logrando una desviación estándar en la frecuencia óptica del orden de los 100 kHz, equivalentes a una estabilidad  $2.6 \cdot 10^{-10}$ .

**Palabras clave:** ECDL, lock-in, Rubidio

### REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] Ye, C. Y., *Tunable External Cavity Diode Lasers*. Texas A & M University, USA: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- [2] Nasim, H., Jamil, Y. "Recent advances in spectroscopy using tunable diode lasers," *Laser Physics Letters*, **10**(4), 43001. (2013).
- [3] Mroziwicz, B. "External cavity wavelength tunable semiconductor lasers - a review," *Opto-Electronics Review*, **16**(4), 347-366. (2008).
- [4] Mantz, A. W. "A review of spectroscopic applications of tunable semiconductor lasers," *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **51**(13), 2211-2236 (1995).

- [5] Wieman, C. E., Hollberg, L. "Using diode lasers for atomic physics," *Review of Scientific Instruments*, **62**(1), 1–20 (1991).
- [6] Siddons, P., Adams, C. S., Ge, C., Hughes, I. G. "Absolute absorption on rubidium D lines: comparison between theory and experiment," *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **41**(15) (2008).
- [7] Hinkley, E. D. "High-resolution infrared spectroscopy with a tunable diode laser," *Applied Physics Letters*, **16**(9), 351–354 (1970).
- [8] Poschinger, U. G. *Quantum Optics Experiments in a Microstructured Ion Trap*. Universitat Ulm. Retrieved from [https://www.quantenbit.physik.uni-mainz.de/files/2015/11/pub\\_phd\\_Poschinger2011.pdf](https://www.quantenbit.physik.uni-mainz.de/files/2015/11/pub_phd_Poschinger2011.pdf) (2010).
- [9] Hilico, L., Felder, R., Touahri, D., Acef, O., Clairon, A., Biraben, F. "Metrological features of the rubidium two-photon standards of the BNM-LPTF and Kastler Brossel Laboratories," *The European Physical Journal Applied Physics*, **4**(2), 219–225. (1998).
- [10] Tetu, M., Cyr, N., Villeneuve, B., Theriault, S., & Breton, M. "Toward the realization of a wavelength standard at 780," *IEEE*, 248–249. (1990).
- [11] Affolderbach, C., Droz, F., Mileti, G. "Experimental demonstration of a compact and high-performance laser-pumped Rubidium gas cell atomic frequency standard," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **55**(2), 429–435 (2006).
- [12] Luda, M., Codnia, J., Azcárate, M. L. "Espectroscopia de la línea d 2 del rubidio mediante un diodo láser realimentado con cavidad externa," *Anales AFA*, **25**(2), 84–87 (2014).
- [13] Ma, W., Yin, W., Dong, L., Wang, L., Li, C., Jia, S. "High-Sensitivity Detection of Methane Near 6106 cm<sup>-1</sup> Using Tunable External-Cavity Diode Laser," *Japanese Journal of Applied Physics*, **44**(4A), 1961–1965 (2005).
- [14] Schulz, S. A. *Scalable Microchip Ion Traps for Quantum Computation*. Universitat Ulm. Retrieved from [https://www.quantenbit.physik.uni-mainz.de/files/2015/11/pub\\_phd\\_Schulz2009.pdf](https://www.quantenbit.physik.uni-mainz.de/files/2015/11/pub_phd_Schulz2009.pdf) (2009).
- [15] Black, E. D. "An introduction to Pound–Drever–Hall laser frequency stabilization," *American Journal of Physics*, **69**(1), 79–87 (2001).
- [16] Fox, R. W., Oates, C. W., Hollberg, L. W. "Stabilizing diode lasers to high-finesse cavities," *Experimental Methods in the Physical Sciences* Vol. 40, pp. 1–46 (2003).
- [17] Saliba, S. D., Scholten, R. E. "Linewidths below 100 kHz with external cavity diode lasers," *Applied Optics*, **48**(36), 6961 (2009).
- [18] Hawthorn, C. J., Weber, K. P., Scholten, R. E. "Littrow configuration tunable external cavity diode laser with fixed direction output beam," *Review of Scientific Instruments*, **72**(12), 4477–4479 (2001).
- [19] Saliba, S. D., Junker, M., Turner, L. D., & Scholten, R. E. "Mode stability of external cavity diode lasers," *Applied Optics*, **48**(35), 6692–700 (2009)
- [20] de Labacherie, M., assedat, G. "Mode-hop suppression of Littrow grating-tuned lasers," *Applied Optics*, **32**(3), 269 (1993).
- [21] Nilse, L., Davies, H. J., Adams, C. S. "Synchronous tuning of extended cavity diode lasers: the case for an optimum pivot point," *Applied Optics*, **38**(3), 548–553 (1999).
- [22] Führer, T., Walther, T. "Extension of the mode-hop-free tuning range of an external cavity diode laser based on a model of the mode-hop dynamics," *Optics Letters*, **33**(4), 372–374 (2008).
- [23] Dutta, S., Elliott, D. S., Chen, Y. P. "Mode-hop-free tuning over 135 GHz of external cavity diode lasers without antireflection coating," *Applied Physics B*, **106**(3), 629–633 (2012).
- [24] Erickson, C. J., Van Zijll, M., Doermann, G., Durfee, D. S. "An ultrahigh stability, low-noise laser current driver with digital control," *Review of Scientific Instruments*, **79**(7), 73107 (2008).
- [25] MacAdam, K. B., Steinbach, A., Wieman, C. "A narrow-band tunable diode laser system with grating feedback, and a saturated absorption spectrometer for Cs and Rb," *American Journal of Physics*, **60**(12), 1098–1111 (1992).
- [26] Dong, L., Yin, W., Ma, W., Jia, S. "A novel control system for automatically locking a diode laser frequency to a selected gas absorption line," *Measurement Science and Technology*, **18**(5), 1447. (2007).
- [27] Blair, D. P., Sydenham, P. H. "Phase sensitive detection as a means to recover signals buried in noise," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, **8**(8), 621–627 (2001).

- [28] Wang, W., Major, A., Paliwal, J. "Grating-Stabilized External Cavity Diode Lasers for Raman Spectroscopy - A Review," *Applied Spectroscopy Reviews*, 47(2), 116–143 (2012).
- [29] Steck, D. *Rubidium 87 D Line Data v1.6*. Los Alamos. Extraído de <http://steck.us/alkalidata> (2003).
- [30] Steck, D. *Rubidium 85 D Line Data*. Los Alamos. Extraído de <http://steck.us/alkalidata> (2003).
- 

## 1. Introducción

### 1.a. Láseres sintonizables de diodo y sus aplicaciones

En las últimas décadas los avances en la tecnología de láseres semiconductores han permitido el desarrollo de una gran diversidad de fuentes de luz coherente monomodo longitudinal, sintonizables y centradas en una variedad de rangos de longitudes de onda  $\lambda$ , que van desde el ultravioleta hasta el infrarrojo medio. Estas características de emisión se obtienen a partir del control preciso de la longitud de la cavidad del diodo laser y, en la mayoría de los casos, diferentes métodos de realimentación óptica con respuesta espectral selectiva. Suelen usarse los acrónimos en inglés para referirse a las tecnologías que dan nombre a cada tipo de laser: DFB (*Distributed FeedBack*, o realimentación distribuida), DBR (*Distributed Back Reflection*, o reflexión distribuida), ECDL (*External Cavity Diode Laser*, o diodo láser con cavidad externa) y VCSEL (*Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers*, o láser de emisión superficial con cavidad vertical) son algunas de las más utilizadas y han sido extensamente estudiadas en libros [1] y revisiones [2,3].

Estas fuentes de luz fueron incorporadas a laboratorios de óptica de diferentes campos, entre los que se destacan las áreas de espectroscopia [2,4], física atómica y molecular [5,6,7], óptica cuántica [8] y metrología [9,10,11]. Para los dos primeros, la realización de barridos en longitud de onda sirve para hacer espectroscopia de absorción de ultra alta resolución, midiendo el espectro de transmitancia en configuraciones experimentales que permiten observar la estructura electrónica de un gas atómico [6,12] o molecular [7], medir densidades relativas [12] o detectar presencia de elementos o sustancias particulares [13]. En el tercer caso, la posibilidad de variar  $\lambda$  se utiliza para controlar estados electrónicos de átomos y moléculas individuales [8,14], condensados de Bose-Einstein o gases enrarecidos de forma coherente para estudiar su naturaleza cuántica o explotarla para procesar información. La posibilidad de controlar  $\lambda$  con mucha precisión es indispensable para lograr un control coherente, así como también para aplicar algunas técnicas usuales en estos laboratorios, como el enfriamiento láser. Por último, la posibilidad de estabilizar la frecuencia de emisión de modo que coincida con una transición atómica particular permite construir patrones ópticos de referencia utilizados en metrología para la determinación de distancias y tiempos con alta precisión y trazabilidad [10,11].

La longitud de onda de emisión de los diferentes tipos de láser semiconductores depende de un conjunto de variables como la corriente de alimentación, la temperatura de la juntura o de condiciones geométricas de la óptica utilizada, cuando se utiliza una cavidad externa. La imposibilidad de un control absoluto de estas variables impone derivas, ruidos o inestabilidades en el modo de emisión. Cuando la precisión en el control de  $\lambda$  es crítica se deben aplicar técnicas de estabilización que involucran una referencia espectral externa y un sistema realimentado de estabilización. Por ejemplo, se suele utilizar un interferómetro Fabry-Perot para estabilizar la longitud de onda del láser a uno de sus picos de reflectancia aplicando la técnica Pound-Drever-Hall [15,16], lo que permite reducir las derivas de mediano plazo (por ejemplo, en tiempos mayores al minuto), así como también reducir el efecto de ensanchamiento del ancho de línea que producen las variaciones rápidas de  $\lambda$ . De modo análogo, aplicando el sistema realimentado para estabilizar el láser a un espectro atómico o molecular se construye una fuente de luz coherente para metrología.

Los láseres de tipo ECDL son utilizados a menudo en todas las aplicaciones mencionadas debido a que son muy versátiles. Se componen de un diodo laser con una cavidad externa formada por una red de difracción, cuyo ángulo y distancia determinan la longitud de onda de emisión. Existe una extensa bibliografía sobre instrumentación aplicada a este tipo de láseres. En ella se cubren aspectos como la reducción del ancho de línea [17], eliminación de desplazamientos angulares en el haz de salida [18], la extensión del rango de barrido de  $\lambda$  a partir de consideraciones geométricas [19,20,21] y a partir del control simultáneo de la corriente y la posición de la red [22,23], circuitos de bajo ruido para el control de la corriente y temperatura [5,24] y la construcción de un montaje completo que combine varias de estas características y elementos para aplicaciones específicas [5,25]. La operación del láser requiere finalmente varios módulos de control (corriente, temperatura y posición de la red) que se suman al instrumental y electrónica necesaria para implementar las técnicas de estabilización basadas en *lock-in* ya mencionadas, como las reportadas en [25].

Esto incrementa la complejidad de los armados experimentales, especialmente los que requieren varios ECDL estabilizados operando en simultáneo, como es el caso de los laboratorios de trampas de iones [8,14]. Es por ello que se hace cada vez más necesaria la simplificación, compactación y automatización de estos sistemas de control. Por ejemplo, en [26] se reporta la implementación del sistema de estabilización *lock-in* mediante una placa de adquisición, una computadora personal y software.

Para este trabajo se desarrolló un amplificador *lock-in*, que es el dispositivo que permite implementar la técnica de "detección sensible a fase" [27] (para simplificar, usaremos *lock-in* para referir al dispositivo y al tipo de medición) y se lo utilizó para estabilizar un láser de tipo ECDL a una referencia espectral externa. La técnica permite medir con precisión la amplitud y fase de una señal relativa a una referencia periódica, que puede ser local o externa, aplicando un esquema de detección homodina y un filtro de paso bajo. En el proceso de medición se filtran las componentes espectrales cercanas a la frecuencia de la referencia y se eliminan las restantes, por lo que la técnica es de utilidad para realizar mediciones en entornos ruidosos. En el apartado 1.b. se hace una descripción pormenorizada de su implementación en este caso particular. El dispositivo está basado en un sistema embebido que combina un procesador y una capa de electrónica programable FPGA (acrónimo del inglés, *Field Programmable Gate Array*). Esta tecnología permite procesar múltiples señales digitales en paralelo y en tiempo real y con un funcionamiento autónomo que no se ve afectado por los factores que limitan a un procesador, como las interrupciones del hardware o la carga de ejecución del sistema operativo. Una FPGA programada funciona como un circuito electrónico de lógica digital físicamente cableado que desempeña tareas de filtrado y procesamiento elemental en tiempo real. El sistema de modulación y de-modulación *lock-in* está implementado íntegramente en la capa FPGA, mientras que el procesador ejecuta un sistema operativo Linux que permite monitorear el estado del sistema de estabilización y controlar sus parámetros de forma remota a través de la red. El resultado es un módulo compacto, pequeño, versátil y de bajo costo, que permitiría reducir considerablemente la instrumentación de control y estabilización de láseres sintonizables.

Se probó el desempeño del sistema estabilizando el ECDL a una de las transiciones atómicas hiperfinas de un gas de Rubidio, generando una fuente de luz láser que puede ser utilizada como patrón metrológico de referencia de longitud de onda. En el apartado 1.b se describe la técnica de estabilización usando *lock-in*. En 2.a. se explican las características del ECDL utilizado para esta experiencia. En el apartado 2.b. se explican los detalles del dispositivo de estabilización desarrollado. En el apartado 3. se muestran las mediciones que se hicieron para evaluar el desempeño del sistema realizando espectroscopia de absorción saturada de una celda de Rubidio y estabilizando la longitud de onda del laser a una de esas líneas espectrales.

### **1.b. Estabilización *lock-in* de la longitud de onda de un laser a una referencia espectral**

La técnica consiste en realizar una medición *lock-in* modulando la longitud de onda de un láser en las cercanías de un pico de absorción o de transmisión de una referencia espectral externa. La referencia puede ser un sistema natural, como el espectro de un gas atómico o molecular, o un sistema de diseño artificial, como la transmisión o reflexión en un interferómetro.

Se excita el sistema de referencia con un láser modulando  $\lambda$  con una señal sinusoidal de frecuencia  $f_{\text{mod}}$  determinada. La amplitud de la respuesta del sistema estará, por ende, modulada en la misma frecuencia (fig. 1) pero se encontrará en fase o en contrafase con la modulación original, dependiendo de qué lado del pico se halla  $\lambda$ . Multiplicando la señal de respuesta del sistema por la señal de modulación  $f_{\text{mod}}$  y eliminando las componentes de alta frecuencia con un filtro de paso bajo se construye una señal ERROR, cuyo signo permite saber en qué dirección hay que corregir  $\lambda$  para ubicarse en el máximo/mínimo del pico. Procesando esa información se crea la señal de control (CTRL) que modifica las variables de operación del laser para corregir  $\lambda$  y cerrar el lazo de realimentación. De esta forma, ante la modificación de parámetros externos no controlados, si la longitud de onda se aparta del pico de referencia el sistema modificará de forma automática los parámetros controlados para contrarrestar este apartamiento.

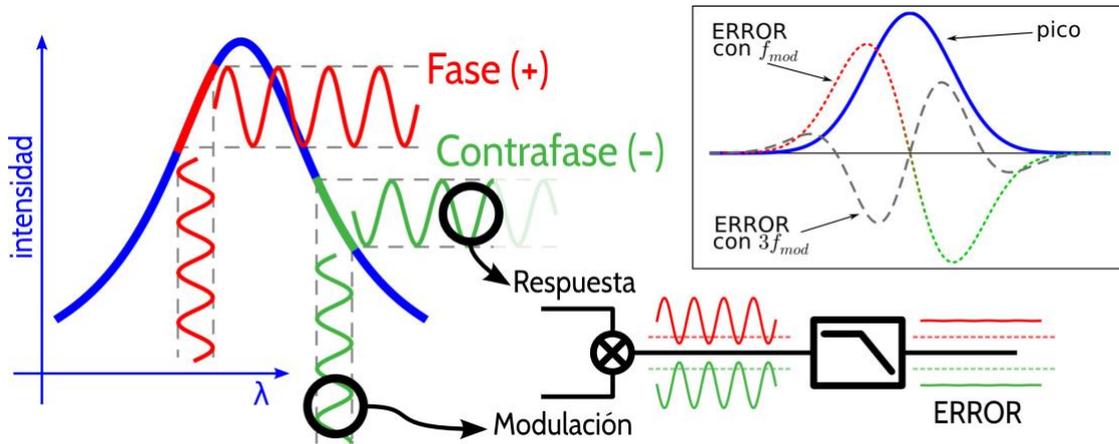


Fig.1. Ejemplo de modulación y demodulación *lock-in* para generación de una señal de error. A la izquierda el gráfico representa un pico de una referencia espectral y la respuesta del sistema ante una modulación de  $\lambda$  de un lado u otro del máximo. A la derecha se esquematizan los pasos para la construcción de la señal de ERROR, mediante multiplicación de la respuesta con la modulación original  $f_{mod}$  (o del triple de frecuencia,  $3 f_{mod}$ ) y un filtro de paso bajo. En el recuadro se representa la señal de ERROR construida utilizando la modulación en  $f_{mod}$  y  $3f_{mod}$ .

La señal de ERROR construida a partir de filtrar la modulación  $f_{mod}$  corresponde al peso de la componente armónica fundamental de la serie de Fourier de la respuesta del sistema, que es muy similar a la primera derivada del pico espectral respecto a  $\lambda$ . Si en su lugar se utiliza el peso del 3er componente armónico ( $3 f_{mod}$ ) el peso obtenido es muy similar a la 3ra derivada. Cualquier armónico impar puede ser utilizado para formar ERROR, ya que en estos casos la señal se anula cuando  $\lambda$  se ubica en el extremo del pico. El cero en la señal de error sirve entonces para ubicar los extremos del espectro en las aplicaciones de espectroscopia de alta resolución y permite saber cuando el sistema se encuentra estabilizado en las aplicaciones de estabilización a una referencia espectral. La utilización de armónicos superiores es útil muchas veces para reducir efectos de curvatura del fondo sobre el que se monta la respuesta espectral del sistema.

## 2. Láser sintonizable con sistema de estabilización

### 2.a. El láser sintonizable: ECDL

Este tipo de láser de diodo sintonizable es muy versátil y tiene amplia utilización en laboratorios y productos comerciales para el ámbito científico [1,22,25]. Consiste en un láser semiconductor cuyo haz de salida es colimado sobre una red de difracción. La red se coloca de forma que el orden 1 de difracción se reinyecte dentro de la cavidad del diodo y el orden cero sea la salida del láser. En este trabajo utilizamos la configuración Littrow [1,18], que es la que se muestra en la fig. 2, cuya ventaja sobre otras configuraciones posibles, como la Littman-Metcalf [1], es una reducción en las pérdidas de la cavidad externa, al usar una sola reflexión en la red de difracción. Si sólo se controlan los factores geométricos de la cavidad externa (ángulo de incidencia sobre la red de difracción, longitud de la cavidad, etc) como parámetros de sintonización la configuración de Littman-Metcalf permite lograr barridos sin saltos de modo en la longitud de onda con mayor facilidad [28] que con la configuración Littrow. Sin embargo, si se sincroniza el barrido angular con un barrido en la corriente de alimentación del diodo laser, se puede extender el rango sin saltos de modos en ambas configuraciones a amplitudes similares. En este trabajo se implementó el barrido sincronizado, descrito más adelante.

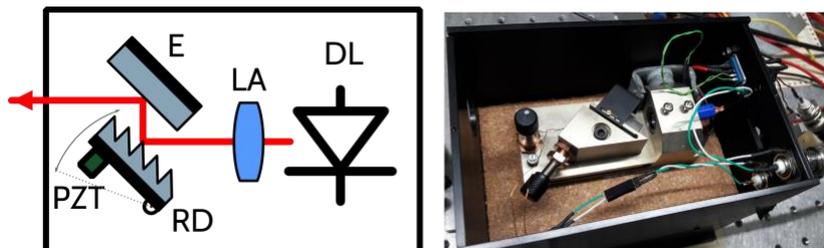


Fig.2. Izquierda, esquema de ECDL (láser sintonizable, *External Cavity Diode Láser*) con sus partes (E: espejo, LA: lente esférica, DL: diodo láser, PZT: transductor piezoeléctrico, RD: red de difracción). Derecha, foto del ECDL construido en el laboratorio.

El diodo láser, operado en régimen continuo, posee un espectro de emisión para corrientes cercanas e inferiores al umbral de operación que puede alcanzar los 2 nm de ancho a mitad de altura, mucho mayor al ancho de línea que se logra al superar el umbral. La longitud de onda de emisión para una corriente que supere el umbral será, idealmente, la del modo de mayor intensidad de ese espectro. Al incorporar la realimentación óptica mediante la red de difracción la cavidad externa formada impone una pérdida selectiva controlada con el ángulo de la red, que permite seleccionar en qué modo del espectro de baja corriente emitir al superar el umbral. Esto permite extender el rango de longitudes de onda en que se puede operar, seleccionando el modo de emisión del láser de entre los modos de ese rango de 2 nm. Esta característica los vuelve una fuente versátil para aplicaciones espectroscópicas.

El montaje del ECDL utilizado para esta experiencia fue construido en latón, con tornillos micrométricos que permiten modificar la inclinación de la red de difracción en dos ángulos para la alineación gruesa. Se utilizó una lente esférica y un tubo para lentes (*lens tube* Thorlabs SM2M30) para colimar el haz y montar el diodo. La red de difracción (Thorlabs GR13-1850, 1800 l/mm) fue montada sobre un transductor piezoeléctrico (PZT, Piezomechanik PSt150/4/5 bS) que permite un control fino sobre su posición. Todo el sistema fue montado sobre una celda Peltier que permite variar la temperatura. El diodo láser fue extraído de una grabadora de CD y caracterizado. Su longitud de onda típica a temperatura ambiente y sin red de difracción es 781,0 nm, determinado mediante un medidor de longitud de onda HighFinesse Wavemeter Meter LSA, que permite además reconstruir parte del espectro de la luz emitida en un entorno de la longitud de onda de emisión. Se seleccionó este diodo por la cercanía con la transición  $D_2$  del Rubidio, que es encuentra en 780,24 nm (384,23 THz de frecuencia óptica).

La temperatura del sistema fue controlada usando un sistema realimentado de estabilización implementado mediante un circuito electrónico análogo al de [5]. El circuito utiliza un termistor adherido al latón en una posición cercana al diodo para medir la temperatura y compararla con un punto de trabajo de referencia y corregir la corriente que circula por la celda Peltier para seguir esa referencia. El sistema permitió controlar la temperatura con una estabilidad del orden del  $\sim$ mK durante tiempos de hasta una hora. A partir de la caracterización del diodo láser se determinó que hay un desplazamiento de  $\lambda$  con la temperatura de 98,8 pm/°C.

Para el control de la corriente se utilizó una fuente de corriente controlada por voltaje basada en un circuito integrado de diseño específico para uso en diodos laser (teamwavelength FL500). El PZT se controló con una fuente de voltaje PI E-660.OE de 0 a 100 V, controlada por una señal de entrada de 0 a 10 V.

Como se mencionó en la introducción, uno de los aspectos críticos para la utilización del láser en espectroscopia es poder realizar barridos de longitud de onda sin saltos de modo [23]. Para ello es necesario sincronizar el barrido de  $\lambda$  que se realiza al variar la corriente con el que se realiza al variar la diferencia de potencial sobre el PZT [22,23]. Se caracterizaron ambos barridos de forma independiente obteniendo los valores 4,35(6) pm/mA y -0,72(4) pm/V<sub>PZT</sub>.

Se construyó un circuito de adaptación de voltaje que permite realizar un barrido sincronizado a partir de una única entrada de voltaje CTRL de  $\pm 1$  V. Dada esa entrada, se adaptaron las amplitudes con amplificadores operaciones (regulables mediante resistencias variables de tipo cermet trimpot) para generar dos salidas, una para alimentar el controlador de corriente y otra para alimentar el controlador del PZT. Además, se agregó una entrada para la incorporación de la señal de modulación, que es atenuada y sumada a la señal de control de corriente.

Sincronizado la variación de corriente y de diferencia de potencial en el PZT se lograron barridos sin saltos de modo de 30 pm de extensión, suficientes para cubrir los 20 pm del espectro completo de la transición  $D_2$  de ambos isótopos del Rubidio.

## 2.b. Módulo de estabilización lock-in implementado en FPGA

Para la implementación del módulo de *lock-in* se utilizó un dispositivo FPGA Red Pitaya v1.1, de un valor de mercado de u\$s 300. Estos incorporan en hardware dos conversores analógico-digital (ADC) y dos conversores digital-analógico (DAC) de 14 bits, con una tasa de actualización de 125 MSa/s y que funcionan en el rango de  $\pm 1$  V. Estos cuatro puertos están conectados directamente a la FPGA para su utilización en el procesamiento de señales. El dispositivo está basado en el integrado Zync 7000 de Xilinx que además de un FPGA implementa un procesador ARM Cortex-A9 de doble núcleo de 650 MHz en el que se puede ejecutar un sistema operativo. El proyecto Red Pitaya pone a disponibilidad de los usuarios un sistema operativo

Linux de Software Libre que se puede cargar desde una tarjeta de memoria microSD y permite controlar parámetros de operación del hardware programable, mapeando direcciones de memoria del sistema operativo a registros de la implementación FPGA. El dispositivo incluye un puerto Ethernet RJ45 para conexión a red y operación remota.

El circuito implementado en la capa FPGA fue programado en Verilog y sintetizado usando Xilinx Vivado v2015.2 . Consiste en un oscilador que genera una señal sinusoidal SIN extraída de un vector de 2520 registros de 14 bits. La dirección de lectura del vector es suministrada por un contador cuya frecuencia de operación surge de un divisor de frecuencia aplicado al reloj del sistema. A su vez, se dispone de otros dos vectores del mismo largo, uno de ellos con la misma información de la onda sinusoidal SIN, el otro con una función sinusoidal del triple de frecuencia SIN3F. Las direcciones de memoria de estos últimos son suministradas por el contador mencionado sumado a un *off-set*, que permite implementar un desfase  $\phi$  respecto a la modulación (ver figura 3).

La señal SIN es suministrada al DAC1 para generar la modulación que se aplicará en el control de corriente para modular la longitud de onda de emisión del láser. La respuesta del sistema ingresa al FPGA por el ADC1 y se la multiplica por las señales SIN y SIN3F. Cada una de estas es procesada luego por filtros de paso bajo de orden 2, con frecuencia de corte configurable, para eliminar las componentes de la modulación y conformar las señales F1 y F3 respectivamente. Un de-multiplexor permite seleccionar cual de las dos utilizar como señal de ERROR que es procesada luego por un filtro Proporcional-Integrador-Derivador (PID).

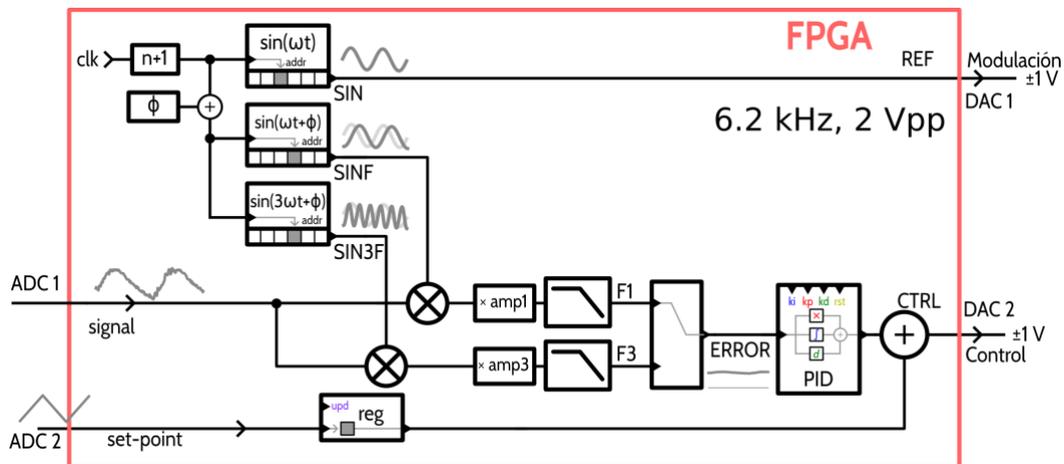


Fig.3. Diseño del circuito FPGA implementado. La respuesta del sistema ingresa por el ADC1 y es multiplicada por las señales SIN y SIN3F y luego filtrada con un pasabajos para generar señales de error F1 y F3 respectivamente. Un demultiplexor permite seleccionar cuál de estas dos utilizar como entrada del filtro PID para cerrar el lazo de realimentación. El ADC2 permite ingresar una señal de *set-point* que se suma a la salida del PID para conformar la señal de control CTRL, lo que permite definir un punto de trabajo particular o realizar barridos  $\lambda$ .

El PID puede ser configurado a partir de registros modificables desde el sistema operativo. Los registros son de 14 bits con signo, permitiendo valores de entre -8192 y 8191. Son **kp** (proporcional), **ki** (integrador), **kd** (derivador) y **rst** (que permite borrar el registro de memoria del integrador cuando **rst**≠0). La salida *S* del PID se puede calcular a partir de la entrada *E* usando la ecuación (1), y constituye la señal de corrección a aplicar al controlador del sistema para cerrar el lazo de realimentación.

$$S = E \cdot P + \int_0^t \frac{E(t)}{\tau} \cdot dt + \frac{dE}{dt} \cdot T \quad ; \quad (1)$$

$$P = \frac{kp}{16} \quad \tau = \frac{0,5}{ki} \text{ seg} \quad T = \frac{8 \cdot kd}{1024} \text{ ns}$$

La segunda entrada ADC es utilizada para leer una señal *set-point* (punto de trabajo de donde parte CTRL) que se puede utilizar para realizar un barrido de voltaje suministrado desde un dispositivo externo, como un generador de funciones. Esta señal es sumada a la de corrección para formar la señal de CTRL, que será aplicada al segundo DAC. El circuito permite “congelar” el *set-point* desde el sistema operativo, guardando

el último valor en un registro y dejando de leer la entrada ADC. Esto permite pasar de un modo de operación de barrido de CTRL a otro de estabilización con lazo de realimentación mediante controles de software.

Las diferentes señales SIN, SIN<sub>F</sub>, SIN<sub>3F</sub>, los ADC y la señal de ERROR pueden ser visualizadas a partir de una aplicación de tipo osciloscopio incorporado en el diseño original de la FPGA del proyecto Red Pitaya. Podemos seleccionar cualquiera de estas dos señales a través de dos multiplexores para que alimenten dos memorias, que luego pueden ser leídas por el sistema operativo como el canal 1 y 2 de un osciloscopio digital. Esto permite hacer diagnóstico del funcionamiento del sistema, ajustar los parámetros del PID, la relación de fase  $\varphi$  más conveniente y tener visualización en tiempo real del desempeño del sistema de estabilización.

El diseño está pensado para realizar el siguiente procedimiento. Con las constantes del PID en cero, se utiliza la señal del *set-point* para hacer barridos de CTRL y medir así el espectro de referencia. Se puede ubicar el *set-point* en un lugar particular y, midiendo la señal de entrada y la de SIN<sub>F</sub>, variar  $\varphi$  hasta que estén en fase, lo que resulta conveniente para optimizar la amplitud pico-pico de la señal de ERROR. Luego, se realizan barridos en torno al pico al que se intentará estabilizar  $\lambda$ . Se puede programar en el sistema operativo un algoritmo que lea constantemente la señal de ERROR y, bajo algún criterio (que puede ser tan simple como superar un umbral determinado), congele el registro de *set-point* y configure valores del PID predeterminados por el usuario. A partir de ese momento se cierra el lazo de realimentación y el sistema evoluciona hasta minimizar el módulo del ERROR, estabilizando el láser al pico seleccionado.

### 3. Estabilización a una transición D<sub>2</sub> de un gas de Rubidio

Para evaluar el desempeño del sistema se realizaron varias pruebas de estabilización del láser a una de las transiciones hiperfinas de la línea D<sub>2</sub> del Rubidio. Para ello, se utilizó una configuración experimental para espectroscopia de absorción saturada [6,12,25] como muestra la figura 4.

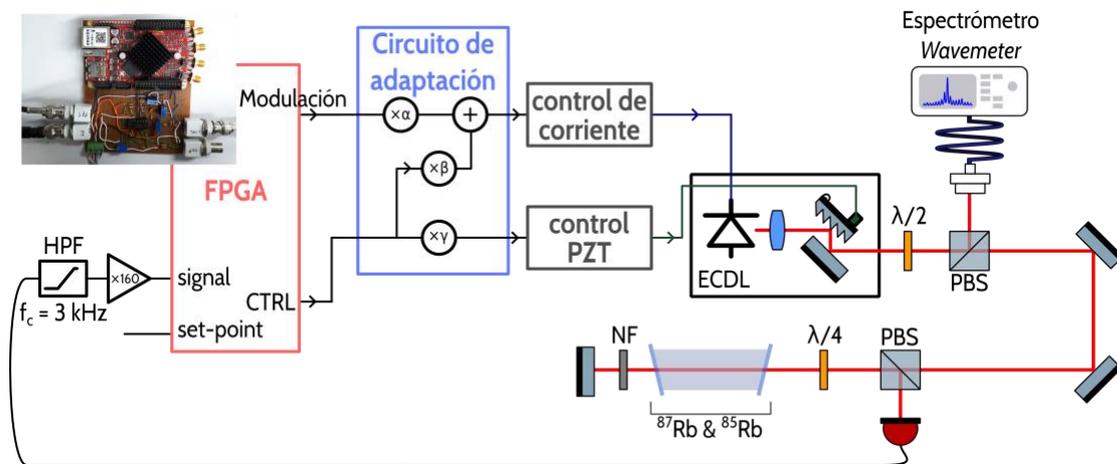


Fig.4. Esquema de control del ECDL (láser sintonizable, *External Cavity Diode Laser*) para reemplazar el espectro de absorción saturada de una celda de Rubidio. El circuito de adaptación de voltaje combina las salidas del módulo FPGA (electrónica programable *Field Programmable Gate Array*) de modulación y CTRL (señal de control) para controlar de forma sincronizada la corriente y el piezoeléctrico (PZT) del ECDL, logrando así barridos sin saltos de modo. El haz del láser es registrado por un espectrómetro de tipo interferencial (*Wavemeter*, medidor de longitud de onda que permite inferir parte del espectro) de forma continua. Se utilizan separadores de haz por polarización (PBS), filtros neutros (NF) y láminas de onda ( $\lambda/2$  y  $\lambda/4$ ) para controlar la dirección, polarización e intensidad de los haces en el armado experimental y un filtro de paso alto (HPF) para acondicionar la señal del fotodiodo a la entrada de la FPGA.

El módulo FPGA se complementa con un circuito de adaptación de voltaje para controlar de forma simultánea la corriente y el PZT del ECDL. Se utilizó una lámina de media onda y un cubo separador de haz por polarización (PBS, por sus siglas en inglés *Polarization Beam Splitter*) para dividir la intensidad en dos caminos: uno para registrar la longitud de onda con el *Wavemeter*, el otro para la espectroscopia del gas de Rubidio con absorción saturada. Para aplicar esa técnica, otro PBS junto con una lámina de cuarto de onda fue utilizado para recuperar el haz que es reflejado en un espejo para pasar dos veces por la celda. En la pasada de ida, el haz actúa como *pump* (haz de saturación). En la de vuelta, es atenuado con filtros neutros para actuar como *probe* (haz de medición). La respuesta del sistema es medida con un fotodiodo y filtrada con un filtro de paso alto para eliminar la componente constante y quedarse solo con la parte modulada.

Se utilizó una celda con Rb en abundancia natural (28%  $^{87}\text{Rb}$  - 72%  $^{85}\text{Rb}$ ), Triad Technology Inc. TT-RB-75-V-x, con densidad en estado gaseoso determinada por la presión de vapor para la temperatura ambiente, de aproximadamente 25°C. Para esa temperatura el ensanchamiento Doppler calculado es de 512 MHz [6] de frecuencia óptica (aproximadamente 1 pm para esa longitud de onda).

En la figura 5 se puede ver la medición de intensidad a la salida de la celda. Los pozos corresponden a la absorción del Rubidio al sintonizar una transición electrónica. Cada pozo corresponde a uno de los desdoblamientos hiperfinos de los niveles  $5^2S_{1/2}$  para el  $^{87}\text{Rb}$  y  $^{85}\text{Rb}$ , ensanchados por efecto Doppler. Los picos corresponden a las transparencias inducidas por saturación del nivel superior, que exponen los picos de desdoblamiento hiperfino de los niveles  $5^2P_{3/2}$  de ambos isótopos.

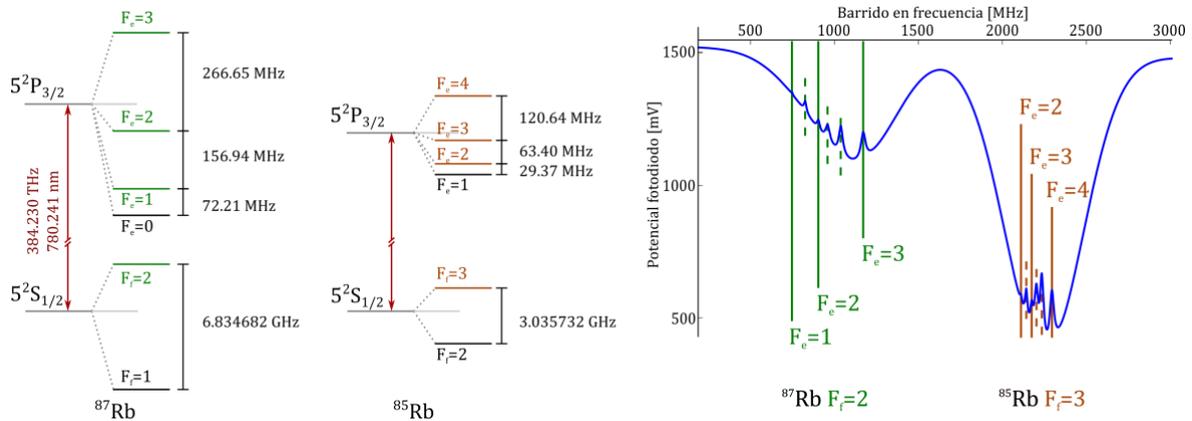


Fig.5. Izquierda, estructura de niveles del  $^{87}\text{Rb}$  y  $^{85}\text{Rb}$  para la transición  $D_2$  incluyendo el desdoblamiento hiperfino, construido a partir de los datos de [6,29,30]. Se utilizaron diferentes escalas para las separaciones de niveles de los estados  $5^2S_{1/2}$  y  $5^2P_{3/2}$ . Derecha, espectroscopia de absorción saturada de la celda de Rubidio medida mediante un barrido en longitud de onda. Se expresa el barrido en magnitudes de frecuencia para comparación con los datos de la estructura. Los picos señalados con líneas de puntos son picos de cross-over, que aparecen en la frecuencia media entre picos de transiciones reales. Los colores y los valores de F permiten asociar los picos medidos a las transiciones graficadas en la estructura de niveles.

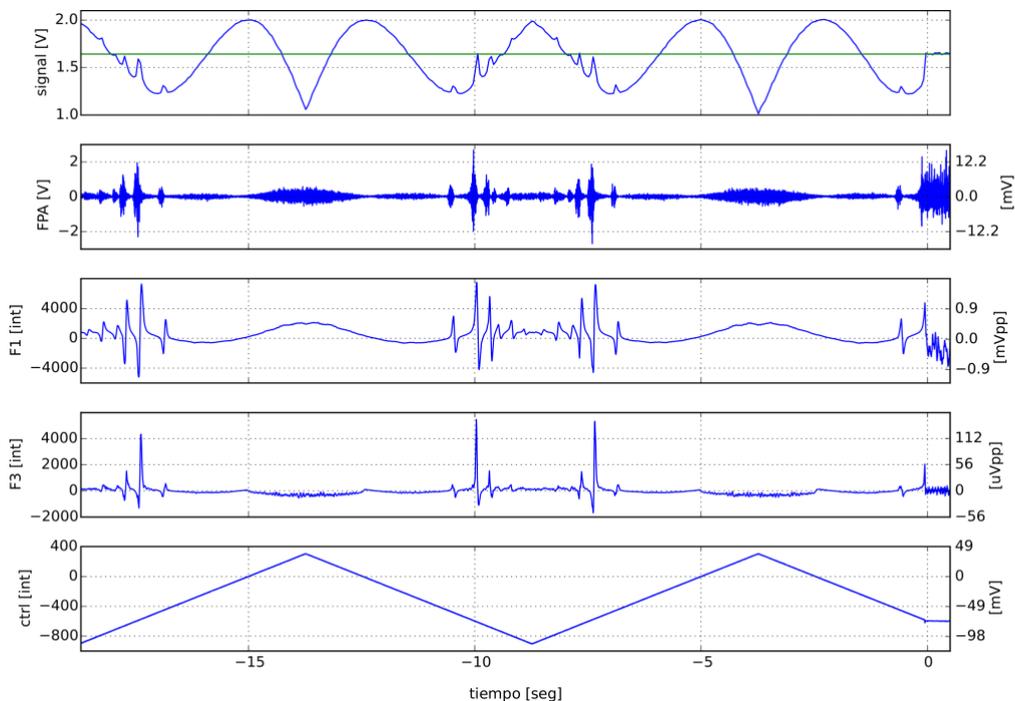


Fig.6. Procesamiento de la señal de espectroscopia saturada durante un barrido de longitud de onda centrado en la transición  $D_2$   $F_e=2$  del  $^{87}\text{Rb}$ . La primera curva (*signal*) es la señal de medida por el fotodiodo. La segunda (FPA) corresponde a la salida del filtro amplificador de paso alto. La tercera (F1) y la cuarta (F2) corresponden a la demodulación de  $f_{\text{mod}}$  y  $3 f_{\text{mod}}$  respectivamente. La última la señal de control, operada con un barrido triangular hasta el segundo cero, en que se opera en modo realimentada para estabilizar el laser. Las señales demoduladas incluyen una amplificación digital. La escala de la derecha representa las amplitudes que tendrían estas señales en la señal del fotodiodo original si no se hubiese aplicado ninguna amplificación. Mediante la amplificación *lock-in* se pudo acceder a señales cuya intensidad sería del orden de decenas de  $\mu\text{V}$  en la señal medida de forma directa.

Para la operación del módulo FPGA se configuró la frecuencia de la señal de modulación en 6,2 kHz y los filtros de paso bajo con una frecuencia de corte en 120 Hz. Los picos producidos por absorción saturada tienen una amplitud del orden de los 100 mV, bastante menor a la señal de base de 1,5 V. El efecto de la modulación se vuelve imperceptible y difícil de medir con los 14 bits de resolución de la FPGA. Por ende, se decidió incorporar un filtro amplificador de paso alto con frecuencia de corte en 3 kHz y amplificación por 160. De esta forma se pudieron demodular señales de ERROR con una resolución de al menos 7 bits efectivos.

En la figura 6 se pueden apreciar las mediciones correspondientes a un barrido de longitud de onda centrado en la transición  $D_2 F_i=2$  del  $^{87}\text{Rb}$ , midiendo la señal de un fotodiodo a la salida de la celda, la salida del filtro de paso alto, la demodulación *lock-in* para F1 y F3 y la señal de control CTRL. En  $t=0$  se enciende el sistema de estabilización y se puede ver que la señal ERROR tiende a cero y la respuesta del fotodiodo permanece fija.

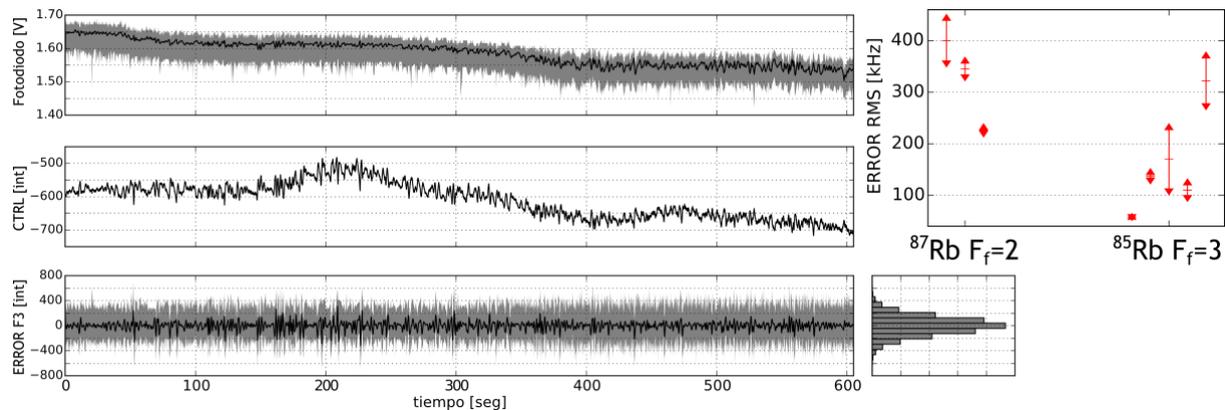


Fig.7. Señales del fotodiodo (arriba), control CTRL (medio) y ERROR F3 (abajo) para el sistema de estabilización a lo largo de 10 minutos. Las curvas en gris son las mediciones sin procesar y las curvas en negro son las mediciones procesadas con un filtro numérico de media móvil. A la derecha de la señal F3 se muestra un histograma de las mediciones, centrada en cero y con desviación estándar 150 int. Para el pico estabilizado se obtuvo una pendiente de 660 int/MHz lo que equivale a una estabilidad RMS de 226(13) kHz. Arriba a la derecha se reportan otras estimaciones de estabilidad calculadas a partir de ensayos de estabilización análogos a este.

Para evaluar el desempeño del sistema se relevó la desviación estándar de la señal de ERROR durante el tiempo de estabilización activa para cada pico particular y, usando la pendiente  $d\text{ERROR}/d\lambda$  para ese pico, se comparó con la desviación equivalente en frecuencia óptica. Aplicando este criterio se calcularon estabilidades de hasta 100 kHz RMS de frecuencia óptica (correspondientes a 0,2 femtometros de longitud de onda), lo que representa una estabilidad de  $2,6(6) \cdot 10^{-10}$ . En la figura 7 se pueden ver las señales del fotodiodo, de CTRL y de ERROR (F3) para un tiempo de estabilización activa de 10 minutos a la transición  $^{87}\text{Rb } f_i=2 \rightarrow f_e=3$ . También se incluyen valores de estabilidad calculados a partir de varios ensayos similares al reportado.

### 3. Conclusiones

Los ensayos realizados permitieron evaluar las capacidades del módulo de estabilización *lock-in* diseñado en FPGA. Los resultados permiten estimar estabilidades RMS en el orden de  $10^{-10}$ , valores que se pueden superar mejorando la aislación mecánica y acústica del ECDL y haciendo un ajuste sistemático de las variables configurables del PID. El sistema demostró ser un prototipo apto para su utilización en la estabilización de láser en experimentos en laboratorios de metrología, espectroscopia atómica / molecular y óptica cuántica. La implementación en un solo dispositivo del sistema completo de modulación, demodulación *lock-in*, control de barrido y monitoreo resultó ser una alternativa viable a los armados experimentales de estabilización de longitud de onda de un laser que requieren de instrumental dedicado (osciloscopio, generador de funciones y amplificador *lock-in* comercial) en combinación con electrónica de diseño específico, como en el caso de [8]. Además, es una opción compacta, versátil y programable en forma

remota, lo que facilitará su incorporación en experimentos que requieran estabilización, utilizando un sistema embebido dedicado en lugar de múltiples instrumentos de aplicación general.

### **Reconocimientos**

Al Ministerio de Defensa de la Nación Argentina, por el financiamiento de este proyecto.