

Sintonización de frecuencia de un láser VCSEL mediante técnica DAVS

Aníbal Varela
Juan Laurnagaray
Tomás Rey Deutsch

18 de Junio de 2019

Resumen

En este trabajo se creó un controlador básico para sintonizar la frecuencia de un diodo láser tipo VCSEL utilizando la técnica DAVS. Para ello se observó el espectro de absorción de una muestra de vapor de Rubidio (Rb), para caracterizar y calibrar el láser- Se observó una deriva (cambio) en el tiempo de la frecuencia de emisión del láser, lo que motiva la creación del controlador que mantenga la frecuencia fija en un pequeño rango.

1. Introducción

El objetivo del presente trabajo fue sintonizar la frecuencia de un láser diodo VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser), utilizando la técnica DAVS (Dichroic Atomic Vapor Spectroscopy). Antes de introducir qué es este tipo de láser y qué es esta técnica es necesario conocer el fenómeno físico que utiliza esta técnica: el efecto Zeeman.

Para esto es útil primero repasar algunos conceptos básicos de la mecánica cuántica, en particular el átomo de hidrógeno. En este trabajo se ha utilizado como muestra un gas de rubidio, un elemento que comparte propiedades químicas con el hidrógeno por tener ambos un único electrón de valencia. A este tipo de átomos se los conoce como un hidrogenoides.

La mecánica cuántica predice que el electrón del átomo de hidrógeno (en el caso del rubidio se toma el electrón más externo) solo puede acceder a ciertos niveles de energía discretos mediante la emisión o absorción de cuantos de energía o fotones. La relación entre la energía emitida o absorbida y la frecuencia del fotón, ν , viene dada por

$$E_i - E_f = \nu h \quad (1)$$

donde el término $E_i - E_f$ corresponde a la energía emitida en la transición de estados y h es la constante de Planck.

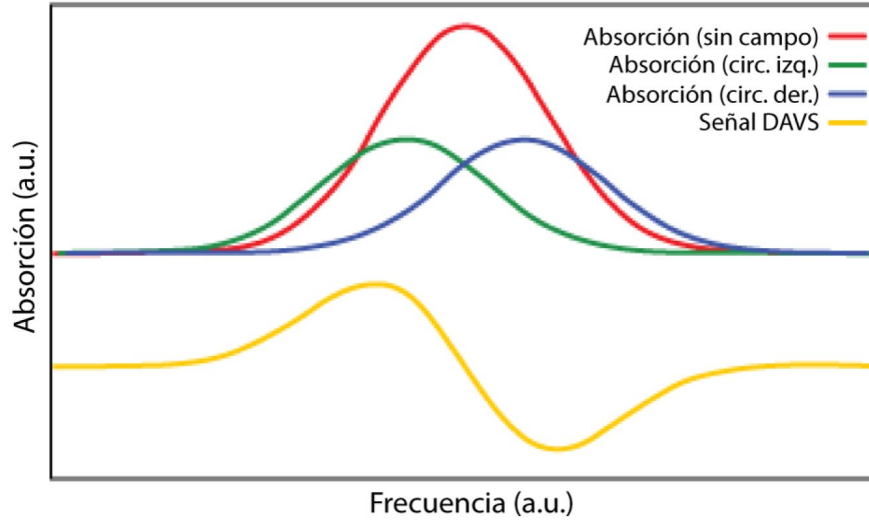


Figura 1: Espectro de absorción en rojo de una onda sin campo, en verde y azul con campo y polarizadas circularmente en sentido izquierdo y derecho respectivamente, abajo en amarillo señal diferencial de estas ultimas dos.

El efecto Zeeman aparece al aplicar sobre la muestra un campo magnético externo, \mathbf{B} . Esto produce un desdoblamiento, en los niveles de energía de la estructura hiperfina del átomo, proporcional a la intensidad del campo manifestandose como un rompimiento en la degeneración de los niveles.

La técnica DAVS surge a partir del efecto Zeeman. Si un haz de luz coherente linealmente polarizada incide sobre una celda con un gas de un elemento atómico este absorbe algunas frecuencias características del elemento, en este caso rubidio. Si el sistema no se encuentra en presencia de un campo magnético externo las frecuencias de absorción son independientes de la polarización del haz incidente. Cuando se lo somete a un campo externo las frecuencias de absorción serán distintas para polarizaciones circular izquierda (ν_i) o circular derecha (ν_d) debido al desdoblamiento de los niveles energéticos por efecto Zeeman. Este nuevo desdoblamiento en frecuencias es simétrico respecto a la frecuencia de absorción sin campo magnético aplicado (ν_0), es decir que $|\nu_0 - \nu_i| = |\nu_0 - \nu_d|$.

Bajo estas consideraciones se define la señal DAVS como la diferencia de los espectros de absorción para cada una de las polarizaciones (derecha e izquierda). En la figura 1 se ve un esquema del espectro sin campo magnético, en rojo, y el espectro con campo magnético para una onda incidente polarizada circularmente izquierda, en verde, y derecha, en azul. En la parte inferior, en amarillo, se observa la diferencia entre la curva verde y la curva azul. Esta señal es de especial interés para la creación de un controlador que permita fijar una frecuencia de emisión del láser.

2. Armado experimental

Para el armado experimental se hizo uso del SKDAV (Dichroic Atomic Vapor Spectroscopy Kit) de Thorlabs- Este consiste de un polarizador lineal, una celda con vapor de Rubidio (GC25075-RB Rubidium Vapor Cell) la cual cuenta con un calentador para controlar la temperatura de la muestra y dos imanes- Además, se utilizó una lámina retardadora de $\frac{\lambda}{4}$ de onda junto con un prisma de Wollaston, dos espejos y un detector que cuenta con dos foto-diodos y 3 outputs que corresponden a los dos canales, de cada foto-diodo, y su resta.

Como se mencionó en la introducción, se trabajó con un láser diodo tipo VCSEL de emisión de frecuencias en el infrarrojo que se alimentó con una fuente ITC4001 de Thorlabs. Esta fuente permite controlar tanto la corriente de alimentación como la temperatura del láser, la cual se varía mediante una placa Peltier. El detector con los foto-diodos se conectó a un osciloscopio Tektronix TDS1002B y junto con la fuente de Thorlabs se conectaron a una computadora. La adquisición de datos se hizo utilizando los comandos proporcionados por el fabricante, del osciloscopio y de la fuente, mediante códigos en el lenguaje Python.

En la figura 2 puede verse un esquema del armado experimental en el que todos sus componentes están fijos a una mesa óptica. Allí puede verse que el haz emitido por el láser pasa a través de un polarizador lineal, por lo que la luz que atraviesa la muestra y llega al prisma de Wollaston con la lámina de $\frac{\lambda}{4}$ de onda está linealmente polarizada. Este último dispositivo separa la luz incidente en sus dos componentes de polarización circular y las dispersa hacia dos espejos cuya posición se varía para, una vez reflejados, cada uno de los haces llegue a un foto-diodo distinto.

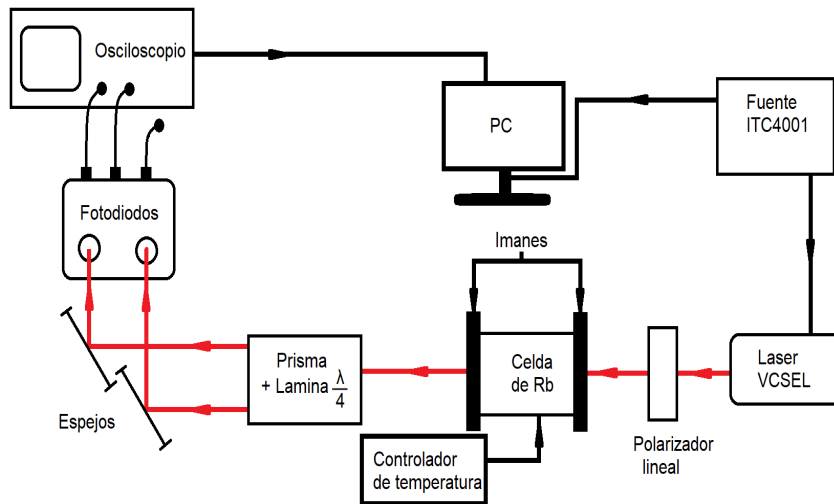


Figura 2: Armado experimental, puede verse la disposición de todos los componentes, la línea roja representa la trayectoria del láser.

Como se mencionó en la introducción la polarización circular de cada onda produce un corrimiento en sentidos opuestos, debido a los sentidos de las polarizaciones mismas.

La alineación es una parte fundamental de este experimento dado que una mala alineación puede llevar a no poder ver la señal deseada. Como fue mencionado en la introducción, se quiere la señal diferencial con la que luego se construirá un controlador para sintonizar la frecuencia, lo cual solo es posible si las ondas polarizadas circularmente que llegan a los foto-diodos tienen la misma amplitud o aproximadamente la misma. Esto último se logra variando el ángulo relativo entre el polarizador lineal, la lámina y el prisma de forma tal que las señales que se observan en el osciloscopio para ambos canales se superpongan. Para corroborar que la alineación es correcta se debe seguir la trayectoria del láser hasta los foto-diodos. Al ser el haz infrarrojo debe hacerse utilizando una tarjeta detectora de luz infrarroja, que se coloca antes de la incidencia en cada componente del armado, por ejemplo antes de los espejos, para que la reflexión hacia los foto-diodos sea la adecuada.

Luego de verificarse una correcta alineación y ver en la pantalla del osciloscopio que las señales de las ondas polarizadas circularmente tuvieran la misma amplitud, se realizaron mediciones modulando la señal de corriente con una función triangular de frecuencia 20 Hz y con una variación de amplitud de $0,1\%$ alrededor de un setpoint de 14 mA . Fijando la temperatura del láser a $23,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ se tomaron mediciones variando la temperatura de la celda de Rb sin campo magnético.

Posteriormente se realizaron mediciones con el campo magnético, las cuales se hicieron adquiriendo ambos canales y la resta para obtener la señal diferencial, de ahora en adelante señal DAVS. Uno de los objetivos es poder ver el espectro de absorción del Rubidio, como se detallará mas adelante se realizó una calibración para obtener este espectro a partir de la señal adquirida por el osciloscopio.

Se observo además la respuesta del sistema cuando se varia la temperatura de la celda de Rubidio y por ultimo se realizaron mediciones de la deriva de la señal adquirida y a partir de esto se creo un controlador para contra-restar este efecto indeseado.

3. Análisis de resultados

3.1. Medición del espectro y calibración

Como fue mencionado en la sección anterior, una vez alineado el sistema se alimentó al láser con una señal triangular de corriente modulada con una frecuencia de 20 Hz y un *depth* de $0,1\%$. En adelante nos referiremos a ella como señal modulada. En la figura 3 se puede ver la pendiente positiva de esta señal y el espectro de absorción del rubidio sin un campo magnético externo.

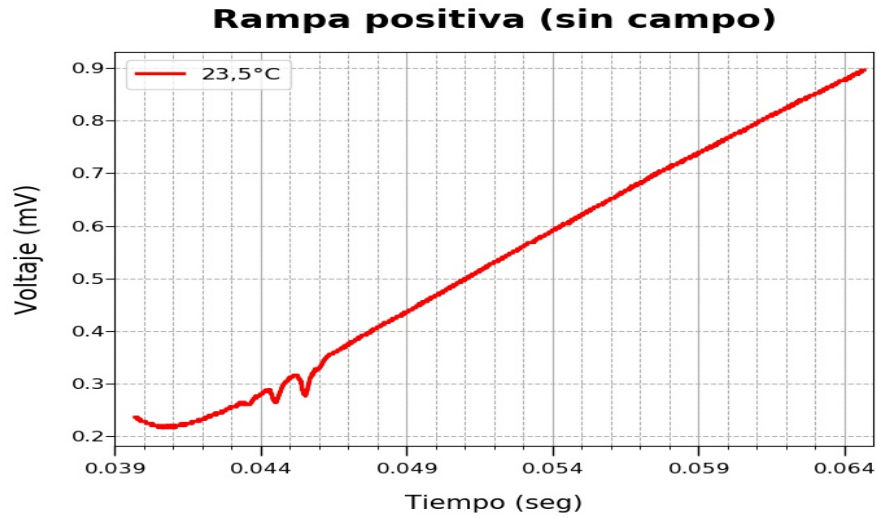


Figura 3: Espectro de absorción sobre modulación triangular, sin campo magnético.

Luego se colocaron los imanes en la celda de Rb y se realizó la misma medición. En la figura 4 se graficaron las señales de los dos canales en donde se observa que están desplazadas entre sí. Como se explicó en la introducción, esto se debe a que los átomos de Rb están en presencia del campo magnético y cobra relevancia el efecto Zeeman.

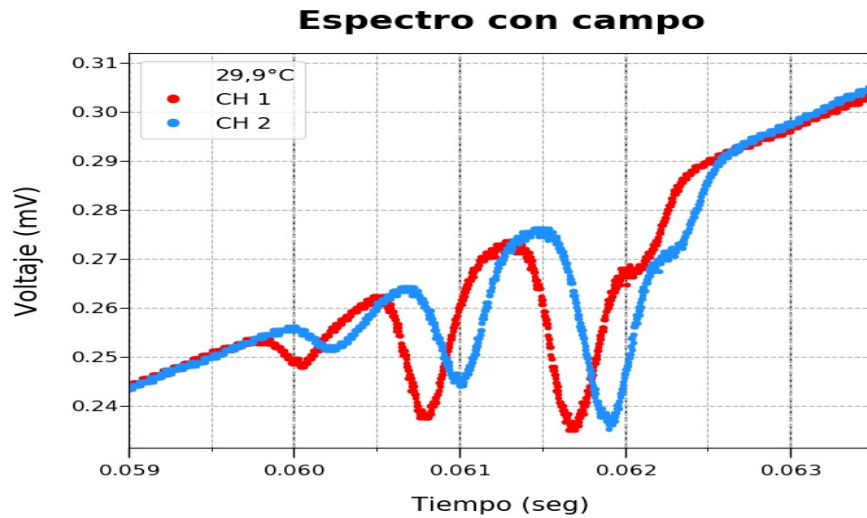


Figura 4: Espectro de absorción, con campo magnético, puede verse el desplazamiento de las señales.

El siguiente paso una vez hecha la medición de la señal con el campo magnético es hacer la señal DAVS, la cual es simplemente la resta de las señales obtenidas de las polarizaciones en sentidos contrarios- Esta puede verse en la figura 5.

La señal DAVS es importante porque los ceros corresponden a las longitudes de onda de absorción del espectro sin campo. Sin embargo lo que se obtiene del osciloscopio es una gráfica del voltaje en función del tiempo. Para pasar del eje de tiempo a un eje de frecuencia o longitud de onda es necesario hacer una calibración. Para esto se aprovecha que los valores de longitud de onda de absorción del Rb ya han sido muchas veces medidos y se encuentran tabulados. Lo que se hace entonces es buscar una relación entre los valores de tiempo correspondiente a los picos de absorción y los tabulados para convertir el eje de tiempo en uno de longitud de onda.

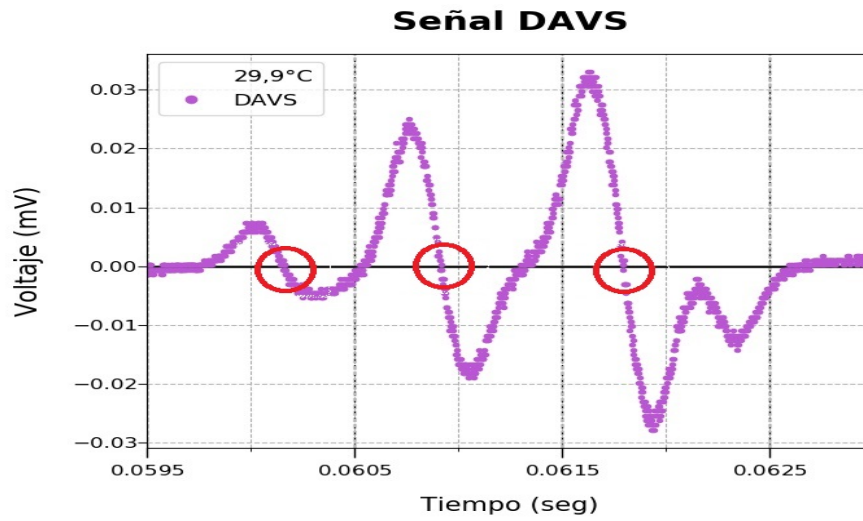


Figura 5: Señal diferencial, notar que los ceros, en círculos rojos en la figura, corresponden a las frecuencias de absorción del Rubidio.

La calibración se hizo utilizando una señal adquirida sin el campo magnético, ya que este provocaría un corrimiento. Como ya fue mencionado se realizaban las mediciones con una señal triangular de corriente. Es decir que el espectro está montado sobre esta, por lo que uno de los pasos previos a la calibración fue restar esta señal triangular de modo que el espectro estuviera sobre una recta horizontal. En la figura 6 se ve el resultado.

A partir de los datos de la tabla 1 se realiza la calibración. En la figura 7 se ve el resultado, junto con el ajuste, que como se observa es lineal. El ajuste se hace con 3 puntos los cuales corresponden a los primeros puntos marcados en azul en la figura 6. El ultimo punto sin embargo se utilizó para corroborar que la calibración fuera correcta.

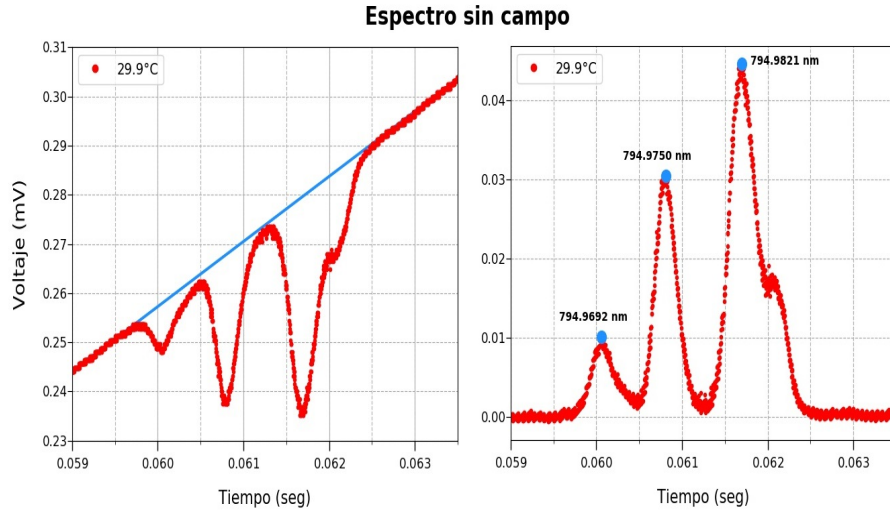


Figura 6: Espectro del Rb sin campo magnético, a la izquierda sobre la señal triangular y a la izquierda con la señal triangular restada.

$\lambda_{tabulado}$ 749,9 +	λ_{medido} 749,9 +
69.2 pm	(69.1 ± 0.4) pm
75.0 pm	(75.1 ± 0.4) pm
82.1 pm	(82.1 ± 0.4) pm
85.5 pm	(85.2 ± 0.4) pm

Cuadro 1: A la izquierda valores utilizados para hacer el ajuste, a la derecha los obtenidos luego de hacer la calibración.

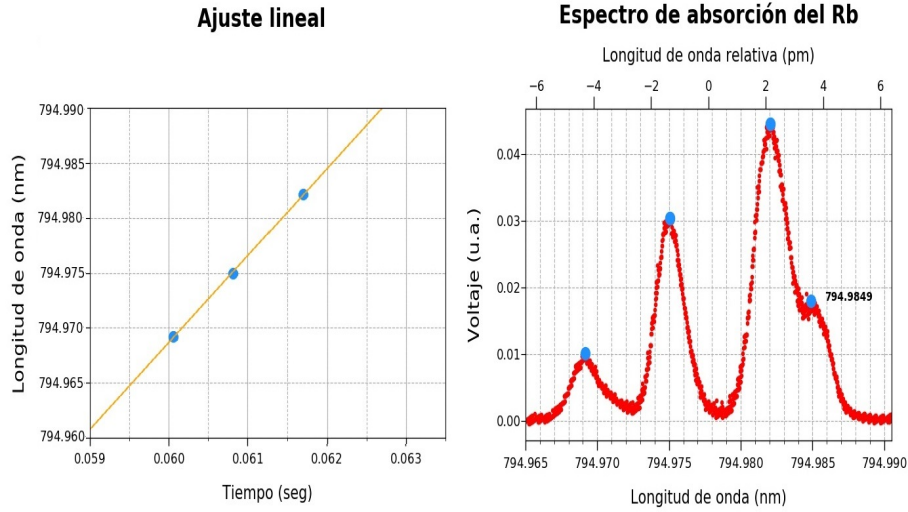


Figura 7: Calibración realizada

En este punto se ha conseguido uno de los primeros objetivos del experimento, que es obtener el espectro de absorción del rubidio.

3.2. Variación de la temperatura de la celda de Rubidio

Utilizando la calibración hecha previamente se midieron los espectros de absorción para diferentes temperaturas de la celda de rubidio, como puede verse en la figura 8. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la amplitud de los picos de absorción. Esto puede atribuirse a la desorción de los átomos de Rb en las paredes de la celda. Es decir, al aumentar la temperatura hay mas átomos de rubidio que interactúan con el láser y absorben más fotones. A pesar de que esta imagen muestra que los picos están aproximadamente en el mismo lugar, esto es debido solamente a la naturaleza de la calibración.

Previamente a realizar el intercambio del eje de tiempos por longitud de onda se notó, que los picos se encontraban en distintas posiciones a medida que se variaba la temperatura de la celda. Este comportamiento se muestra en la figura 9.

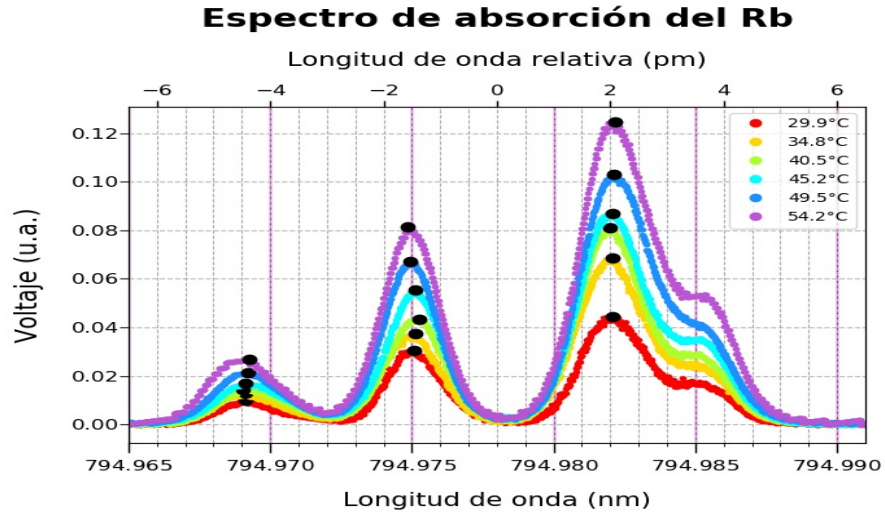


Figura 8: Barrido de temperatura de la celda de Rubidio, en función de la longitud de onda

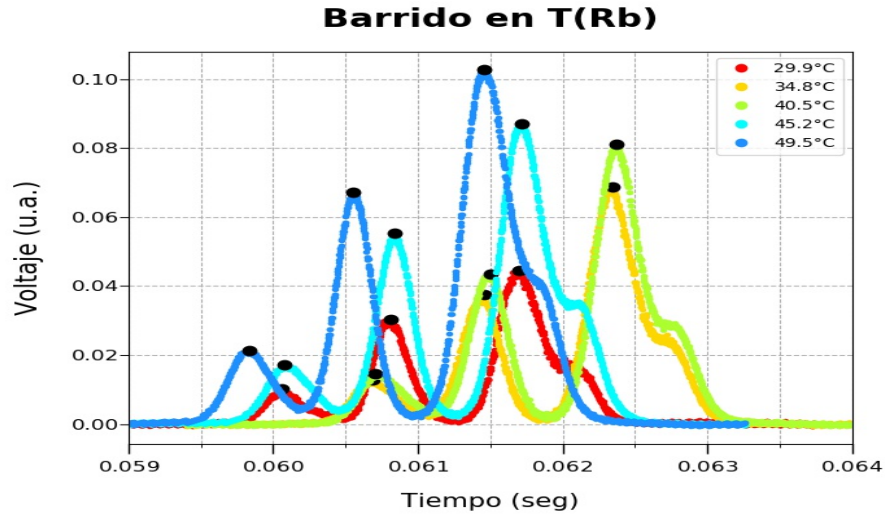


Figura 9: Barrido de temperatura de la celda de Rb en función del tiempo, se puede observar el desplazamiento.

3.3. Detección de deriva y construcción del controlador

Como se comentó en la sección anterior, se realizó una medición de 47 minutos de la señal DAVS en la que se dejó fija la temperatura y se adquirieron datos del osciloscopio cada 1 minuto. Una imagen representativa de lo que se observó puede verse en la figura 10. Esto deja en evidencia la existencia de lo que ahora en más llamaremos una deriva, es

decir un corrimiento de la señal aún cuando no se han hecho modificaciones de corriente o modificaciones de la temperatura del láser o la celda de rubidio durante la medición. Esto es lo que motiva el principal objetivo del trabajo, que es la creación de un controlador que permita contrarrestar este efecto de deriva.

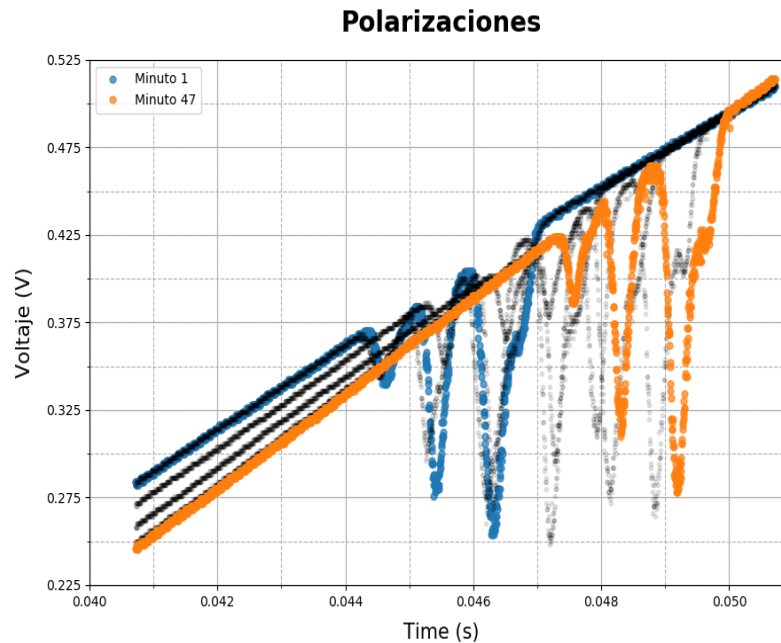


Figura 10: La señal en azul y naranja son las mediciones tomadas en el minuto 1 y minuto 47, se puede ver claramente el desplazamiento.

Para la construcción del controlador se utiliza el hecho de que al variar la temperatura de la celda la señal del láser detectada por el sensor cambia, lo que se ve reflejado en el osciloscopio como un desplazamiento de la señal al igual que la deriva. Esto es algo que ocurre también al variar la corriente pero la diferencia es que los cambios mínimos que permite hacer la fuente ITC4001 en corriente provocan un desplazamiento muy grande de la señal, en cambio los desplazamientos son mas pequeños con la mínima variación de temperatura que permite hacer la fuente que es de un milikelvin. Es por este motivo que se elige este parámetro, es decir la temperatura, para hacer las correcciones. Lo primero que se hizo fue hacer un barrido de temperatura del láser, con la pantalla del osciloscopio sobre la señal DAVS, se fijó la corriente (es decir que se apagó la modulación) con la que se alimenta al láser y se adquirieron las señales de voltaje del osciloscopio en cada temperatura. En este punto hay que aclarar que una vez fija la corriente los datos que recoge el osciloscopio es un señal de tensión continua. Lo que se hizo fue hacer un promedio de esta señal para quedarse con un valor y poder hacer un gráfico de cada valor de tensión promediado en función del valor de temperatura correspondiente a esa medición. Luego,

se afino el barrido de temperatura para pararse sobre el cero (la raíz de la función) que se utilizará para hacer las correcciones en el controlador. El gráfico puede verse en la figura 11, a la derecha se ve la parte de la señal a utilizar.

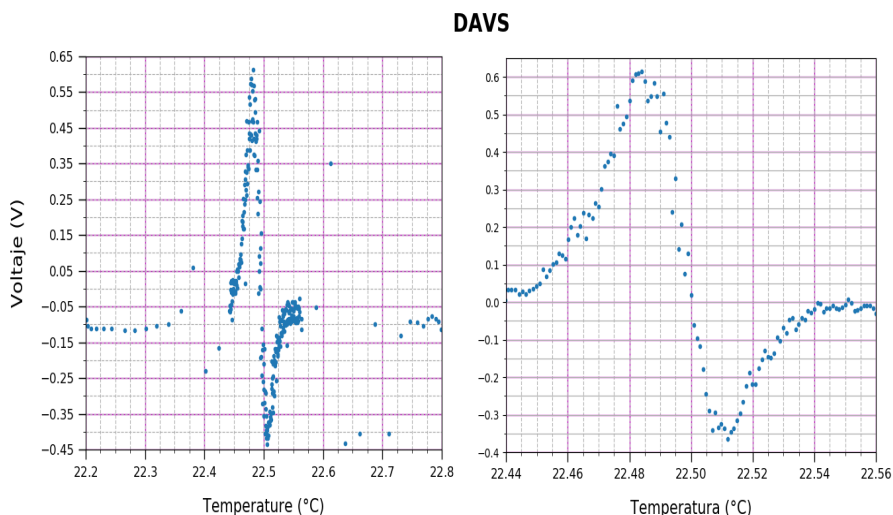


Figura 11: Voltaje en un función de la temperatura del láser, a la izquierda señal DAVS completa, a la derecha un barrido mas fino sobre el pico con el que se creara el controlador.

Es importante observar de la figura que el voltaje y la temperatura se comportan de forma opuesta, es decir, cuando uno aumenta el otro disminuye y viceversa.

Con todo esto entonces, se propuso estabilizar la longitud de onda de emisión del láser a partir de mantener el voltaje alrededor de un valor fijo de longitud de onda conocida, variando la temperatura según fuera necesario. Para llevar a cabo esto, se fija el valor inicial en $22,50\text{ }^{\circ}\text{C}$, el cual corresponde aproximadamente al punto de voltaje cero, y se enciende el controlador. No tiene sentido mantener el voltaje observado en un único valor ya que estaríamos haciendo correcciones en temperatura constantemente. Por esto se establece un intervalo de valor absoluto $0,2\text{ V}$ alrededor del cero, dentro del cual el controlador busca mantener la tensión. Si el voltaje se encuentra dentro de ese rango entonces la temperatura no se varía. El voltaje se mide cada un cierto intervalo de tiempo y se modifica la temperatura según el valor del voltaje detectado. Por ejemplo en caso de detectarse por encima del intervalo (voltaje medido mayor a $0,2\text{ V}$) el controlador disminuye el voltaje aumentando la temperatura en $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cuando se encuentre por debajo se disminuye la temperatura y en caso de medirse dentro del intervalo se la deja igual.

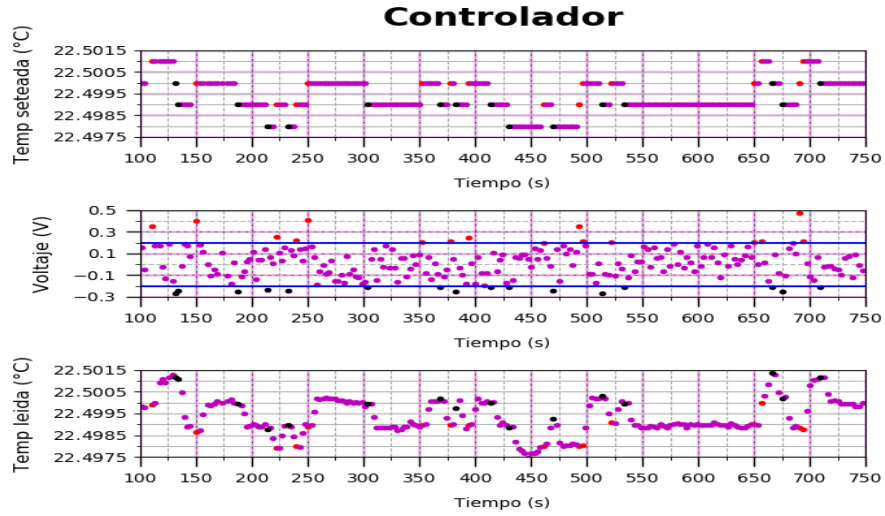


Figura 12: Los puntos rojos son lecturas de voltaje por arriba del intervalo, las violetas dentro del intervalo y los negros lecturas por debajo del intervalo.

En esta etapa se realizó una medición durante aproximadamente 15 minutos, en los cuales se encendió el sistema de control y se realizaron mediciones del voltaje leído por el osciloscopio, la temperatura seteada y leída por la fuente. Los datos obtenidos pueden verse en la figura 12. Los puntos rojos representan los momentos en que el controlador midió un voltaje por encima del intervalo, los violetas cuando el valor de voltaje medido se encontró dentro del intervalo, y por debajo puntos negros.

Se puede ver en ultima figura mencionada que el controlador funcionó de la forma esperada. Además se puede ver que la evolución de la temperatura es suave en los intervalos de tiempos que se midió mientras que el voltaje presenta fluctuaciones considerables.

Sin embargo, no se pudieron tomar mediciones de más de quince minutos ya que no nos alcanzó el tiempo con lo que no se pudo verificar que este controlador funcionara para tiempos de aproximadamente 45 minutos en los que se observaba que había una deriva apreciable.

4. Conclusiones

Se logró observar con éxito el espectro de absorción de la muestra de rubidio y se comprobó que efectivamente la técnica DAVS permite una facilidad a la hora de crear un controlador para estabilizar la frecuencia de emisión del láser.

A su vez, se observó que el controlador funcionó de la forma esperada en el intervalo de tiempo medido. Sin embargo no se realizaron mediciones lo suficientemente largas como

si se hizo para la detección de la deriva lo cual deja la incerteza de si efectivamente se contrarresta el efecto de deriva en un tiempo lo suficiente largo.

Por ultimo se observó que al variar la temperatura de la celda de rubidio existe un desplazamiento de la señal (figura 9). Se descartó la hipótesis de que este efecto sea producto de la deriva que fue detectada con todos los parámetros del sistema fijos, debido a que esa deriva tiene una tendencia a desplazar la señal en frecuencia en un sentido determinado, a diferencia de lo observado al variar la temperatura de la muestra de Rb donde esto último no se ve. Un posible camino sería estudiar cómo afecta la variación de la temperatura de Rb en la posición temporal del espectro de absorción.