

1. Alineación de la Cavidad óptica

La cavidad óptica ya fue construida el semestre pasado [3], sin embargo, se sabe que esta misma es inestable mecánicamente por lo que se procedió a construir una caja para aislarla. Por otro lado, además de lo anterior se procedió a alinear la cavidad, de tal manera que el modo Gaussiano sea optimizado. Para realizar lo anterior se usó el siguiente montaje:

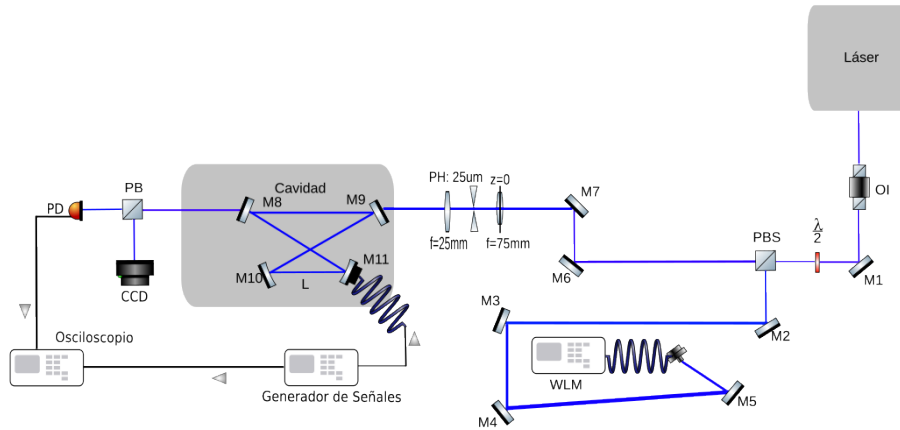


Figura 1: Montaje Experimental para alineación de la cavidad

Aquí se usa como fuente de luz a un láser con longitud de onda 411nm . El láser al salir se encuentra con un aislador óptico el cual evita reflexiones hacia el láser y asegura un funcionamiento correcto. Por otro lado se usa una lamina de media onda la cual se encarga de controlar que tanta potencia se asocia a las polarizaciones paralelas y perpendiculares de la luz, que surgen del Polarized Beam Splitter. En el camino asociado al espejo M_2 se tiene un recorrido que termina en un Wave Length Meter, el cual se encarga de informarnos la longitud de onda del láser de manera precisa. Análogamente el camino asociado a M_5 pasa por un pinHole el cual limpia al perfil espacial de tal manera que este se aproxime más a un modo gaussiano, además pasa por un sistema focal que garantiza al láser entrar con los parámetros correctos del haz gaussiano, de tal manera que la cavidad se comporte según lo diseñado [3] [4]. Por último el láser entra dentro de una cavidad óptica en donde se varía la longitud del grado de libertad L con una función rampa emitida por el generador de señales; tal que pase por un máximo, para esto se usa un Foto-Diodo y una cámara CCD para confirmar el perfil espacial, además se usa un osciloscopio para ver las salidas correspondientes. A continuación se presentan los resultados obtenidos al alinear la cavidad:

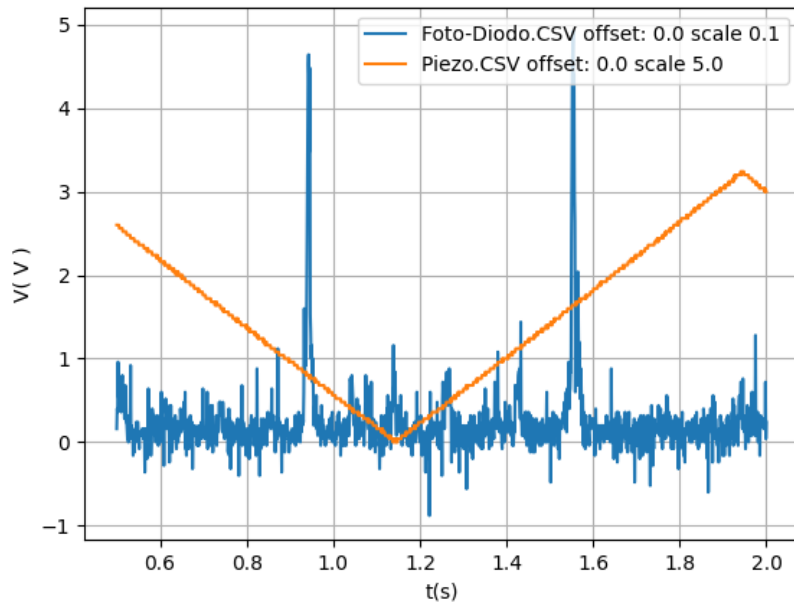


Figura 2: Resultado de la alineación. Se observa un pico correspondiente al modo gaussiano.

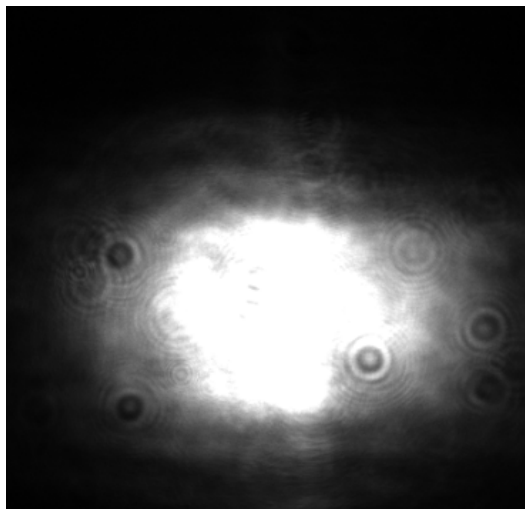


Figura 3: Confirmación del perfil Espacial Gaussiano correspondiente al máximo observado en la figura 1

2. Obtención de la Derivada del Voltaje del Foto diodo respecto al voltaje del piezo eléctrico

Según la propuesta presentada, se tiene que la señal de retroalimentación para el sistema de control es la derivada del voltaje correspondiente al FotoDiodo respecto a la señal del piezo eléctrico. Note además que por el hecho de que la señal de escaneo sea una rampa se pueden realizar la métrica ya comentada con su correspondiente derivada respecto al tiempo, de manera precisa estas mismas se relacionan por un factor de escala α :

$$\frac{dV_{PD}}{dV_P} = \alpha \frac{dV_{PD}}{dt} \quad (1)$$

Por lo anterior se procedió a medir la derivada temporal de la señal del FotoDiodo con un Lock-InAmplifier. A continuación se muestra el montaje y el resultado obtenido:

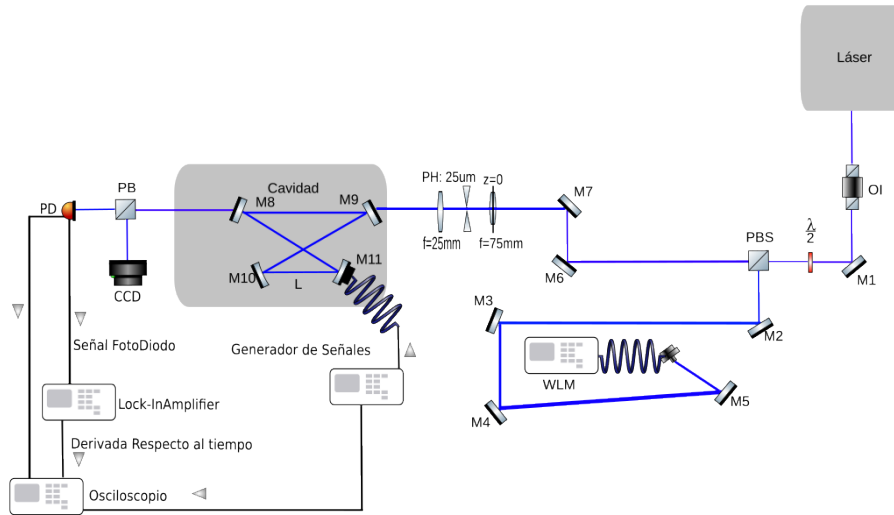


Figura 4: Montaje Experimental para la medición de $\frac{dV_{PD}}{dt}$

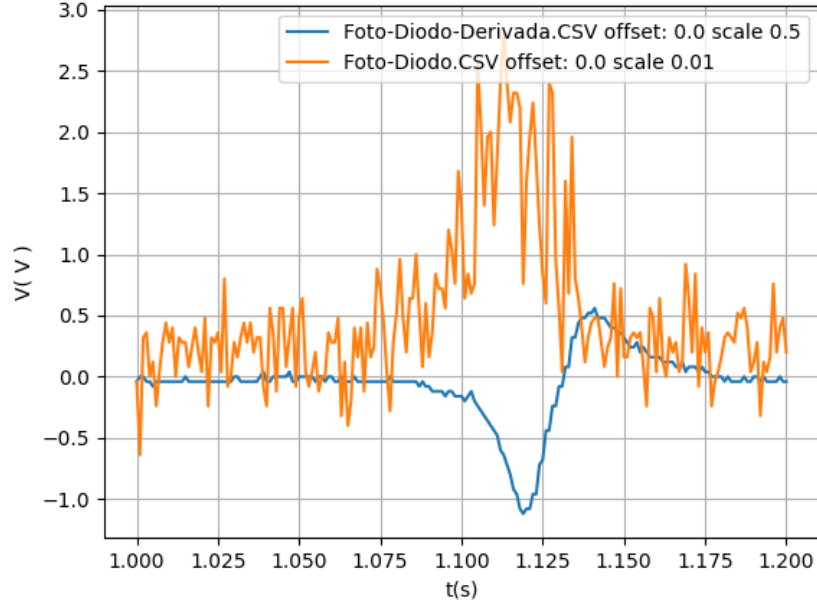


Figura 5: Resultado para la medición de $\frac{dV_{PD}}{dt}$

3. Implementación sistema de Control y Resultados

Basándose en la medición de la derivada del voltaje del fotodiodo respecto al piezo eléctrico, se procedió a implementar un sistema de control proporcional-integral-derivativo (PID) para estabilizar la cavidad óptica. Este tipo de controlador es idóneo para sistemas con dinámicas complejas como la cavidad, permitiendo un seguimiento preciso de la longitud de resonancia de la cavidad.

El controlador PID ajusta la tensión aplicada al elemento piezoeléctrico según la siguiente ecuación:

$$V_P(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

donde $e(t)$ es la señal de error, K_p , K_i y K_d son las ganancias proporcional, integral y derivativa respectivamente. La señal de error se genera a partir de la derivada medida del voltaje del fotodiodo, la cual actúa como una métrica de la alineación respecto a la resonancia de la cavidad.

3.1. Esquema de Control

El esquema general del sistema de control se presenta en la siguiente figura, que muestra la arquitectura del lazo de retroalimentación:

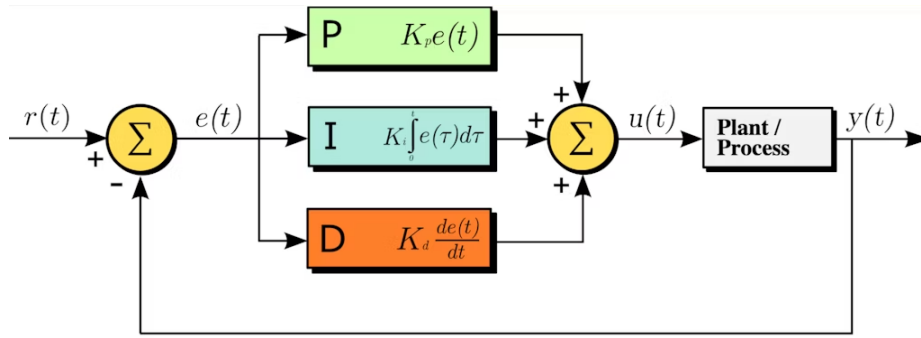


Figura 6: Esquema general del sistema de control PID para la cavidad óptica

El sistema implementa un lazo cerrado donde la señal de retroalimentación proveniente del fotodiodo (la derivada) es comparada con una referencia, la cual es 0, lo que a su vez genera la señal de error que alimenta el controlador PID. Este último genera la señal de control que ajusta el voltaje del elemento piezoeléctrico para mantener la cavidad resonante.

3.2. Montaje Experimental

El montaje experimental para la implementación del sistema de control se muestra en la siguiente figura:

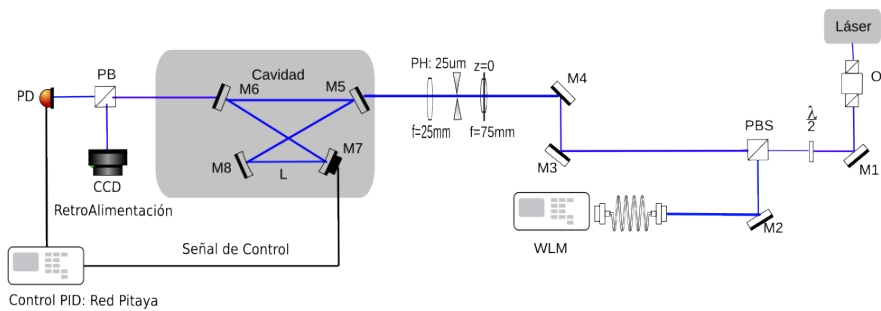


Figura 7: Montaje experimental para la implementación del sistema de control PID

El controlador fue implementado utilizando una tarjeta de adquisición de datos y procesamiento en tiempo real (una red pitaya). La señal del fotodiodo es adquirida continuamente, procesada para obtener su derivada mediante modulación, lo que a su vez alimenta al algoritmo PID. Los parámetros del controlador fueron sintonizados, en base a obtener un resultado aceptable, es decir, de acuerdo a periodo de minutos de estabilización y apreciación visual de amplificación de la potencia del láser.

3.3. Resultados

Los resultados obtenidos tras la implementación del sistema de control se presentan en la siguiente figura:

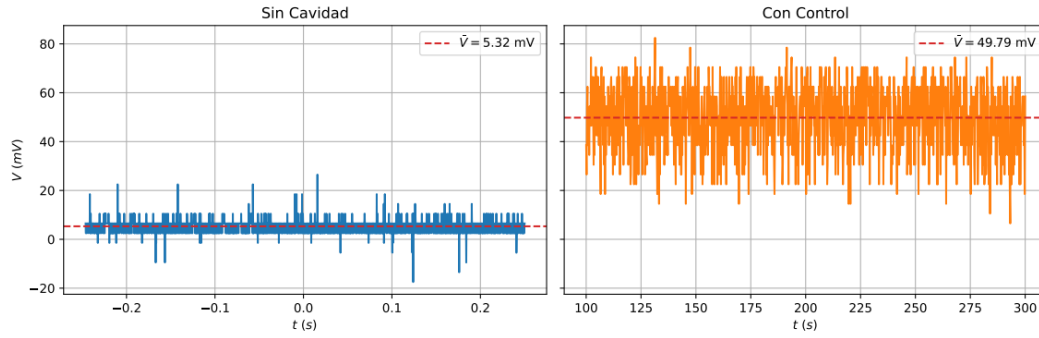


Figura 8: Resultados del control PID sobre la cavidad óptica. Se observa a la izquierda el voltaje medido por el fotodiodo sin la cavidad óptica y el voltaje medido por el fotodiodo a la derecha con cavidad óptica

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema de control PID con parámetros $K_p = 50$, $K_i = 5$, $K_d = 20$ logra mantener la cavidad óptica estable en la resonancia. Un resultado particularmente significativo es la amplificación de aproximadamente un factor de $10\times$ en la potencia intracavidad durante períodos de estabilidad, lo cual se mantiene por varios minutos. Considerando que la potencia del láser incidente medida fuera de la cavidad es de aproximadamente 16 mW, esta amplificación corresponde a una potencia intracavidad estimada de ~ 150 mW. Este resultado demuestra la efectividad del confinamiento óptico logrado mediante la alineación precisa de la cavidad y la estabilización conseguida por el sistema de control PID. El factor de amplificación es entonces $10\times$.

La estabilidad conseguida es del orden de minutos. El sistema demuestra ser robusto frente a perturbaciones típicas del ambiente de laboratorio, como fluctuaciones acústicas y térmicas. De esta manera, se ha implementado satisfactoriamente un sistema de retroalimentación automática que asegura el funcionamiento óptimo de la cavidad óptica, estableciendo una base sólida para futuras mediciones y experimentos que dependan de esta plataforma estabilizada, como lo es SPDC [1].

3.4. Comparación Visual: Cavidad sin Control vs con Control

Por último se presenta a continuación una comparación visual mediante capturas del perfil espacial del láser obtenidas con la cámara CCD, contrastando el comportamiento de la cavidad sin aplicar control (lazo abierto) y con el sistema de control PID activado (lazo cerrado). Esta comparación visual complementa el análisis numérico y permite apreciar de manera directa el impacto del control en la calidad y estabilidad del modo óptico.

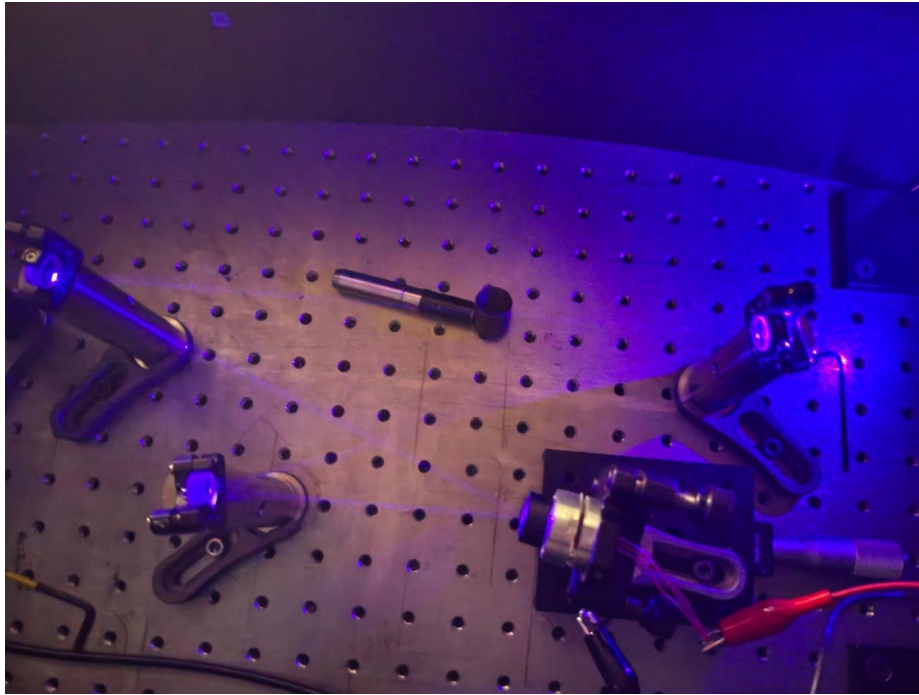


Figura 9: Intensidad visual del patrón del haz de luz dentro de la cavidad sin estabilizar.

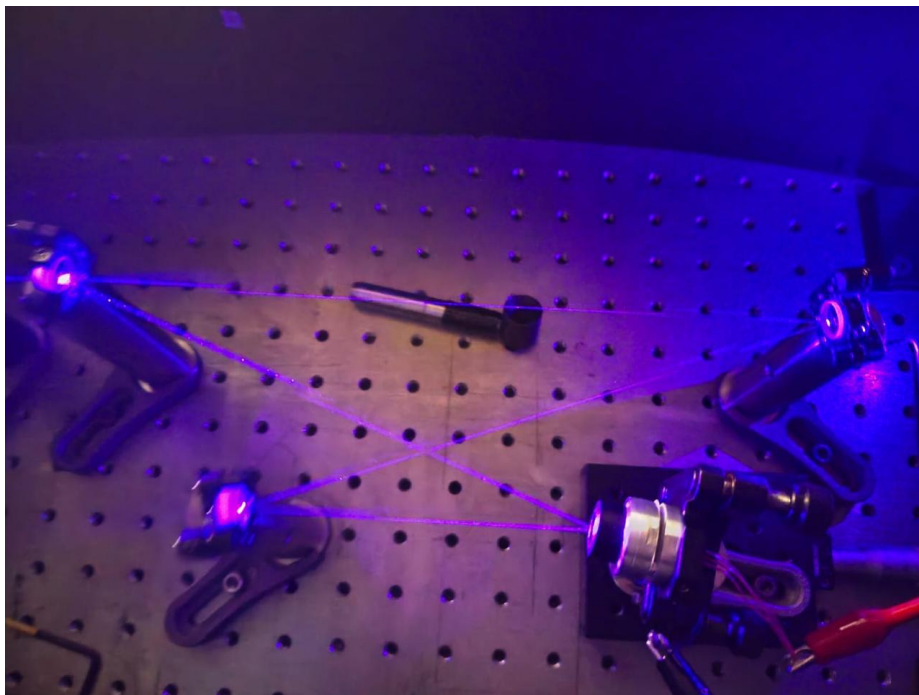


Figura 10: Intensidad visual del patrón del haz de luz dentro de la cavidad con el esquema de control. Se observa una mayor intensidad respecto a la figura anterior

En el caso sin control (Figura 9), el patrón del haz es menos intenso. En contraste, con el sistema de control PID activado (Figura 10), el patrón del haz es notablemente más intenso. Esta mejora visual es una confirmación

cualitativa de que el controlador está estabilizando efectivamente la cavidad.

4. conclusiones

En este trabajo se implementó un esquema de control estabilizador basado en un controlador proporcional-integral-derivativo (PID) para la cavidad óptica tipo corbatín del grupo de Óptica Cuántica de la Universidad de los Andes, utilizando la plataforma de código abierto Linien sobre la tarjeta Red Pitaya STEMLab en conjunto con el actuador piezoeléctrico ThorLabs PA2JEW. Se evidenció también la efectividad de los controladores PID cuando se aplican a sistemas inherentemente no lineales, siempre que el control opere en una vecindad estrecha del punto de operación deseado. El sistema implementado logró mantener la cavidad estabilizada en la condición de resonancia durante intervalos del orden de minutos, alcanzando una amplificación promedio de aproximadamente $\times 10$ veces la potencia entrante. Este resultado constituye un avance significativo respecto al trabajo previo [3], en el cual se reportaba una amplificación de $\times 8$ únicamente en el pico máximo sin estabilización sostenida, y representa la primera estabilización activa exitosa de una cavidad óptica realizada en el grupo de Óptica Cuántica. Como trabajo futuro, se contempla la inclusión del cristal BBO dentro de la cavidad para la generación de pares de fotones entrelazados mediante conversión paramétrica espontánea descendente, aprovechando la amplificación del haz de bombeo proporcionada por el sistema estabilizado. Este paso permitiría aumentar considerablemente la tasa de generación de pares entrelazados y abriría la posibilidad de utilizar la cavidad estabilizada como recurso experimental para futuros experimentos en óptica cuántica del grupo, tales como la caracterización de correlaciones cuánticas, la implementación de protocolos de criptografía cuántica o la exploración del fenómeno de absorción de dos fotones inducida por entrelazamiento (ETPA).

Referencias

- [1] S. Magnitskiy, D. Frolovstev, V. Firsov, P. Gostev, I. Protsenko, and M. Saygin. A spdc-based source of entangled photons and its characterization. *Journal of Russian Laser Research*, 36(6):618–629, 2015.
- [2] K. Ogata. *Modern control engineering*. Prentice hall, 2010.
- [3] J. C. Pinilla Valencia. Realce de la producción de pares de fotones entrelazados mediante la construcción de una cavidad óptica. 2026.
- [4] O. Svelto, D. C. Hanna, et al. *Principles of lasers*, volume 4. Springer, 1998.