

Implementación de un esquema de control estabilizador para una cavidad óptica.

1. Introducción

A nivel tecnológico, las correlaciones cuánticas entre pares de fotones se aprovechan en tecnologías cuánticas y ETPA [1]. Por su relevancia, actualmente en el mundo se trabaja en la generación de fotones entrelazados mediante conversión paramétrica espontánea (SPDC) [1]. Sin embargo, el proceso anterior es poco eficiente, típicamente del orden de 10^{-10} [2]. Una forma de aumentar la tasa de generación es usar una cavidad óptica, lo que permite incrementar la eficiencia. Esto requiere mantener activamente la longitud de la cavidad en resonancia, ya que esta no se mantiene estable por perturbaciones externas. En el grupo ya se ha implementado la cavidad óptica [3]; en este proyecto se propone controlar la longitud de esta misma mediante una Red Pitaya en la cual se implementa un PID [4].

2. Cavidad Óptica y su Esquema de Control

Haces gaussianos. Los haces que se propagan dentro de la cavidad no son rayos ideales sino haces gaussianos: su intensidad transversal sigue una distribución $I(r, z) \propto \exp(-2r^2/w(z)^2)$, donde $w(z)$ es el radio del haz en cada punto. La cintura w_0 corresponde al punto de mínimo radio, y la longitud de Rayleigh $z_R = \pi w_0^2/\lambda$ define la distancia a partir de la cual el haz comienza a divergir significativamente. El frente de onda tiene un radio de curvatura $R(z)$ que también varía con la propagación.

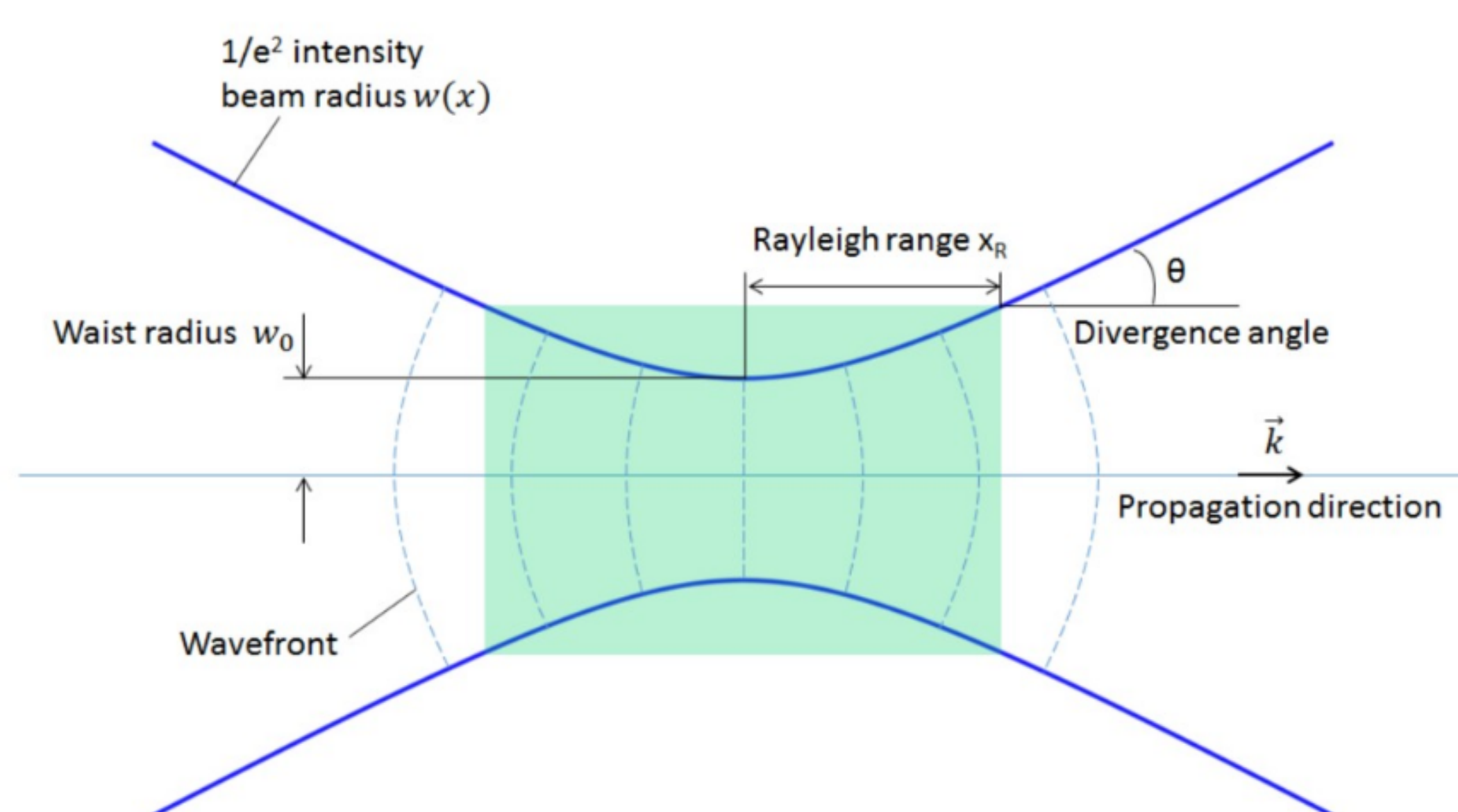


Figure 1: Perfil de un haz gaussiano: cintura w_0 , radio $w(z)$ y frente de onda con curvatura $R(z)$.

Toda esta información se condensa en un parámetro complejo q , que se transforma al atravesar elementos ópticos mediante matrices $ABCD$.

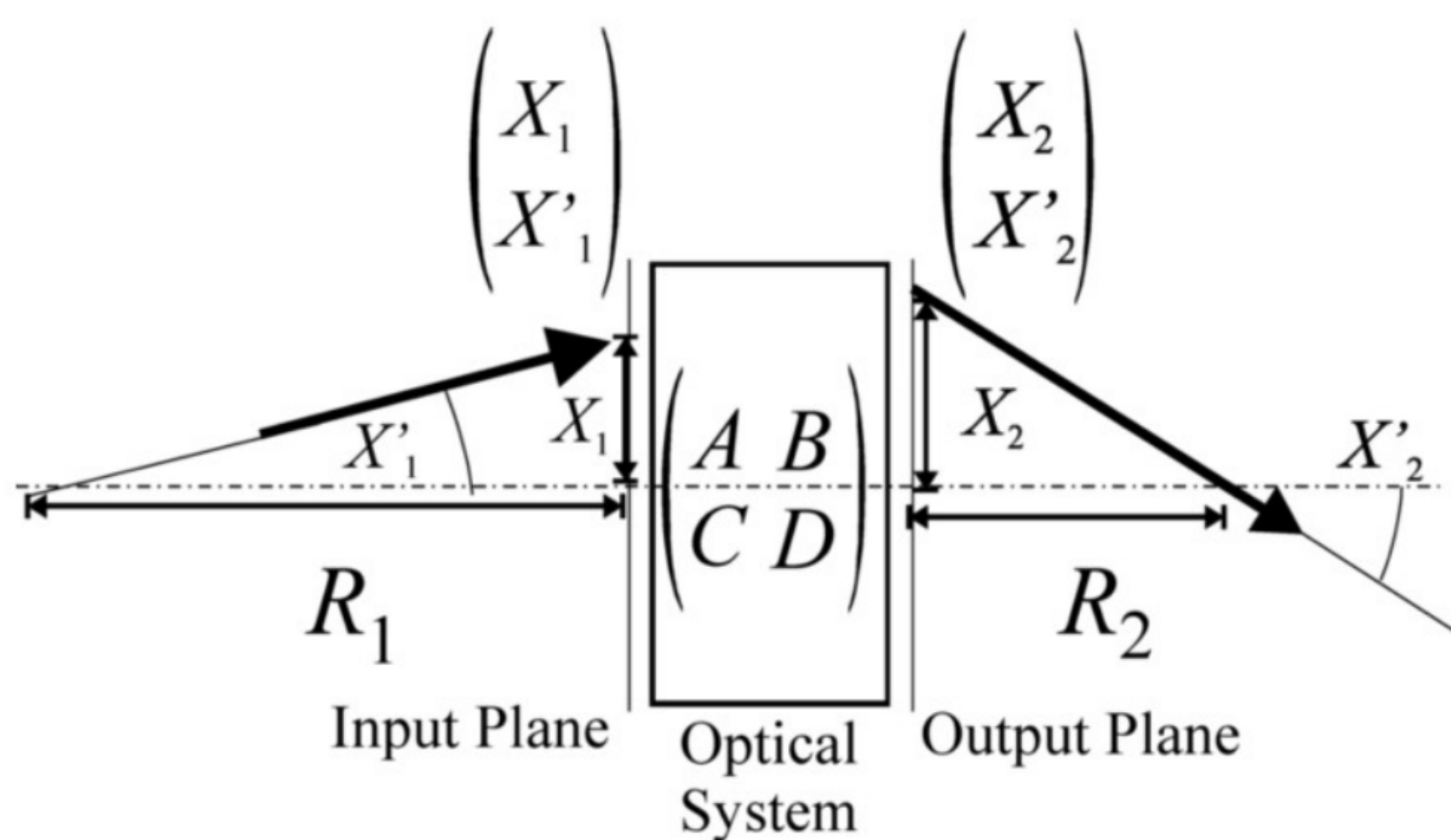


Figure 2: Transformación de q mediante el formalismo $ABCD$.

Cavidad óptica. Cavidad tipo corbatín de cuatro espejos (2 curvos, 2 planos). Uno va montado sobre un piezoeléctrico (PZT) que ajusta la longitud para mantener la resonancia.

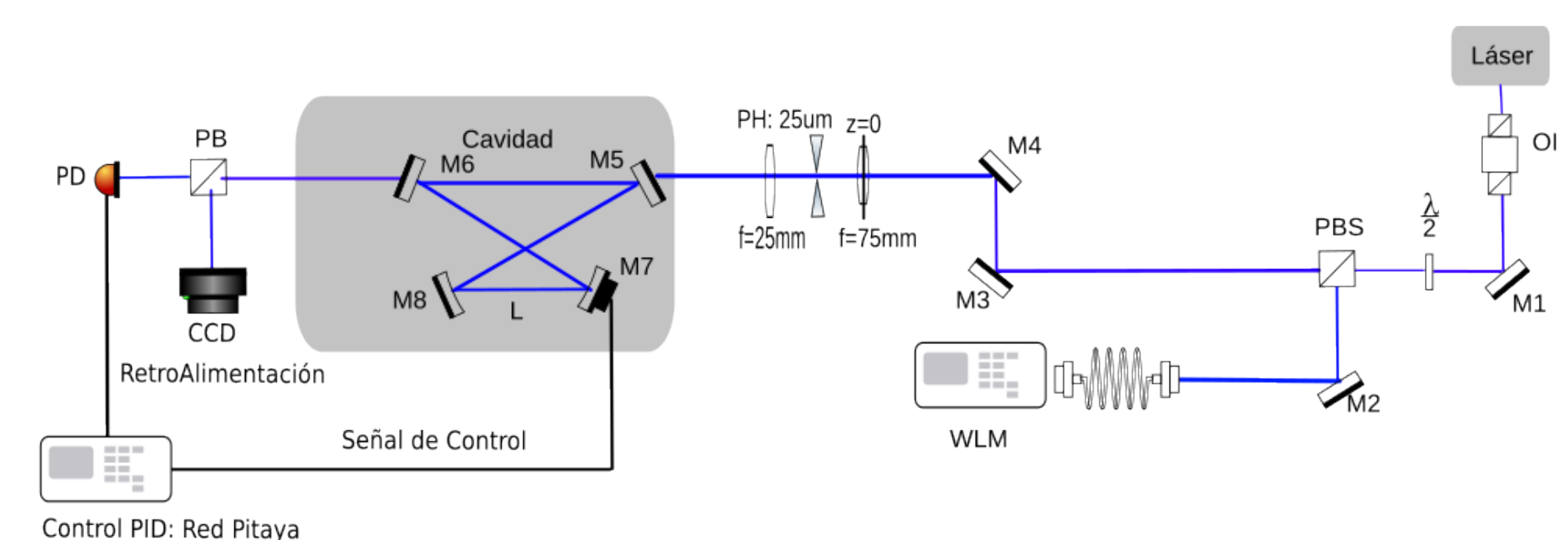


Figure 3: Cavidad tipo corbatín. El PZT varía la longitud L para mantener la resonancia.

Control PID. La idea es simple: en resonancia, el voltaje del fotodiodo V_{PH} es máximo respecto al voltaje del PZT V_P , por lo que su derivada se anula. Se define la señal de error

$$e(t) = \frac{dV_{PH}}{dV_P},$$

y la Red Pitaya (FPGA) calcula en tiempo real el voltaje a aplicar al PZT:

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

Cada término corrige una parte: K_p el error actual, K_i las derivas lentas, K_d amortigua oscilaciones rápidas. El lazo se cierra de tal manera que la señal de error este siempre cerca de

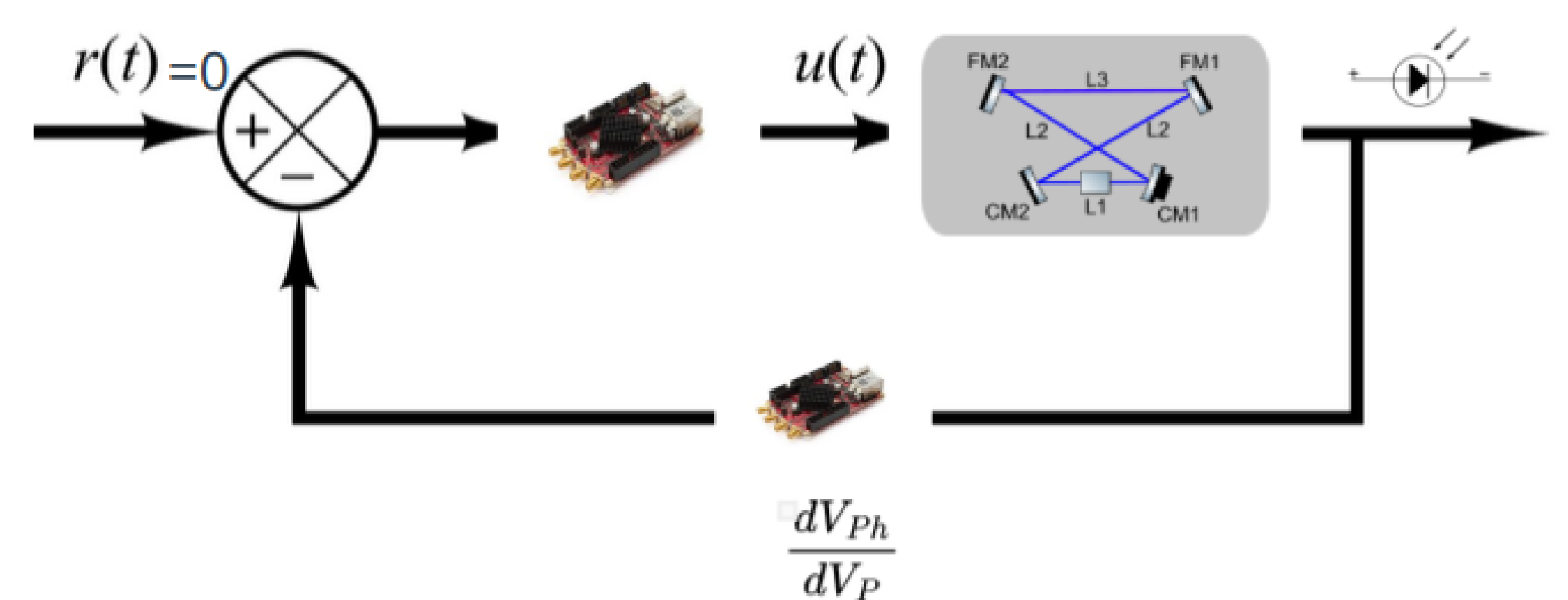


Figure 4: Lazo de control: la señal de la cavidad alimenta al PID en la Red Pitaya, que ajusta el PZT.

5. Referencias

- [1] Yanhua Shih. Entangled biphoton source-property and preparation. *Reports on Progress in Physics*, 66(6):1009, 2003.
- [2] Robert W Boyd, Alexander L Gaeta, and Enno Giese. Nonlinear optics. In *Springer Handbook of Atomic, Molecular, and Optical Physics*, pages 1097–1110. Springer, 2008.
- [3] Juan Camilo Pinilla. Realce de la producción de pares de fotones entrelazados mediante la construcción de una cavidad óptica, 2025. Director: Mayerlin Nuñez Portela.
- [4] Katsuhiko Ogata. *Modern control engineering*. Prentice hall, 2010.

3. Resultados

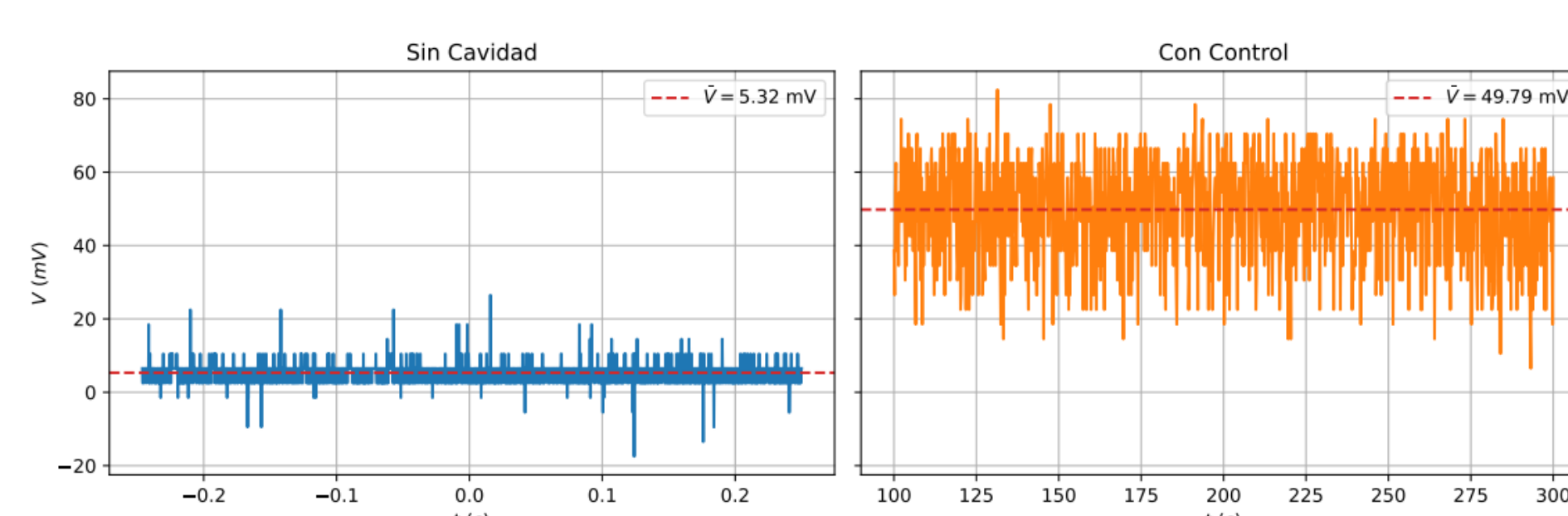


Figure 5: Resultados del sistema de control, se puede observar un factor de aumento de potencia de alrededor de $x9$ respecto a la del láser original.



Figure 6: Video de Youtube de visualización de resultados.

4. Conclusiones

Se implementó un PID que estabiliza una cavidad corbatín a $411nm$ durante minutos. Es la primera estabilización de una cavidad óptica en la Universidad de los Andes y un paso clave para la generación de fotones entrelazados vía SPDC.