

# Construcción de Detector Homodino con Fuente Láser en la Región del Visible

Andrés Martínez and Hugo Villalba

(Laboratorio de Óptica Cuántica)

(Dated: May 31, 2019)

La detección homodina permite hacer mediciones de las cuadraturas de los campos electromagnéticos. En este proyecto se construyó un detector homodino utilizando elementos tanto ópticos como electrónicos. Para esto, inicialmente se diseñó un interferómetro que permite cambiar la fase del oscilador local y medir diferencias relativas entre la señal a estudiar y la referencia (oscilador local). Para la detección de las señales se utilizaron fotodiodos con sus respectivos circuitos y para la sustracción de las señales se diseñó e implementó un circuito restador con amplificadores operacionales. Finalmente, se hizo la alineación de los elementos ópticos y electrónicos. De esta manera se pudo construir un detector homodino que se encuentra configurado para realizar las mediciones de las cuadraturas de campos electromagnéticos de las señales que se quieran estudiar.

## Introducción

El campo eléctrico consta de componentes reales e imaginarias, de las cuales se puede derivar tanto su magnitud como su fase. Generalmente, en los experimentos es posible medir únicamente la intensidad de los campos electromagnéticos. Sin embargo, a través de las definiciones y medición de las cuadraturas, es posible determinar las componentes reales e imaginarias de dichos campos. Así, un detector homodino es un dispositivo experimental mediante el cual se puede caracterizar completamente un campo en sus componentes complejas.

La manera tradicional de hacer detección homodina es usando un montaje exclusivamente electrónico. Esto permite trabajar sólo con frecuencias bajas. Al introducir luz es necesario reestructurar el diseño e incluir elementos adicionales en el montaje experimental puesto se requiere trabajar con ondas electromagnéticas de alta frecuencia. De esta manera, este proyecto pretendió construir un detector homodino óptico que permitiera medir las cuadraturas de los campos electromagnéticos de distintas señales.

La importancia del proyecto radica en que, en primer lugar, es un área que el Grupo de Óptica Cuántica de la Universidad no ha explorado y recientemente ha surgido el interés en ampliar el campo de estudio del Grupo hacia los problemas relacionados con el ruido de señales. Además de esto, la medición de cuadraturas permite obtener las denominadas funciones de Wigner y -por medio de estas- caracterizar los estados ópticos squeezed. Desde un punto de vista más aplicado, los detectores homodinicos tienen aplicaciones en la teleportación y la distribuciones de llaves en computación cuántica.

## Marco teórico

La literatura a nivel teórico y experimental muestra patrones generales a seguir en el montaje de un detector homodino.

El libro de Bachor [1][2] muestra a nivel teórico la derivación de las cuadraturas de los campos. Las

cuadraturas aparecen de la intención de describir las amplitudes complejas del campo eléctrico en términos de dos magnitudes. Una de ellas describirá la magnitud de la parte real y la otra la magnitud imaginaria, de una amplitud compleja asociada al campo eléctrico. El campo eléctrico puede escribirse como:

$$E(\vec{r}, t) = \frac{1}{2} \left[ \mathcal{E}_c(k_z, t) e^{i(k_z z - \omega t)} + \mathcal{E}_c^*(k_z, t) e^{-i(k_z z - \omega t)} \right]$$

donde  $\mathcal{E}_c$  es un número complejo y se puede expresar como  $\mathcal{E}_c = \mathcal{E}_1 + i\mathcal{E}_2$ . Ahora se hace un análogo al campo eléctrico cuantizado, de tal manera que las cuadraturas son de la forma:

$$\begin{aligned} \hat{X}_1 &= \frac{\mathcal{E}_1}{2iB} = \frac{1}{2}(\hat{a} + \hat{a}^\dagger) \\ \hat{X}_2 &= \frac{\mathcal{E}_2}{2iB} = \frac{1}{2}(\hat{a}^\dagger - \hat{a}) \end{aligned}$$

donde B es una constante. Ahora, a partir de estas cuadraturas es posible recuperar el campo eléctrico:

$$E = \hat{X}_1 \cos(\omega t) + \hat{X}_2 \sin(\omega t)$$

Usando relaciones trigonométricas es posible obtener la fase del campo eléctrico.

A nivel experimental, artículos como el de Madeiros [3], muestran algunos bosquejos de montajes experimentales utilizados en detección homodina y en los cuales nos basamos para el diseño del montaje. Sin embargo, se requirieron modificaciones dados los instrumentos con los que se cuenta en el laboratorio y la electrónica a la que se tiene acceso.

Para medir las cuadraturas, esta literatura sugiere un montaje que consiste en un beamsplitter que recibe dos señales perpendiculares y donde se mide el resultado en las caras opuestas; y, posteriormente, se restan las señales eléctricas generadas por los detectores, que serán proporcionales a la intensidad de cada cuadratura [2]. Las señales de entrada serán la señal a estudiar, que tendrá un campo eléctrico  $E_s$  y un oscilador local que tendrá

un campo eléctrico  $E_{LO}$ . En este caso la frecuencia de ambas entradas sera la misma por lo que este montaje corresponderá a detección homodina y no heterodina. En la Fig. 1 se puede ver un diagrama.

Consideramos detectores que generan una corriente proporcional a la intensidad del campo eléctrico medido, y teniendo en cuenta la forma en que funciona un beam-splitter con balanceo 50/50 [1] se tiene que:  $I_1 = |E_{LO} + E_s|^2$  y  $I_2 = |E_{LO} - E_s|^2$ .

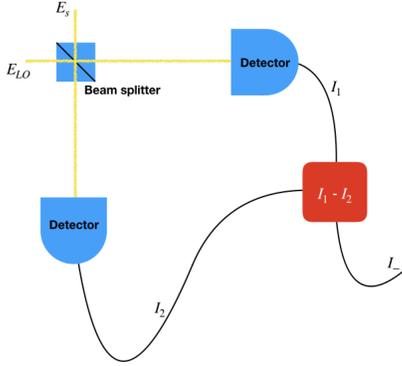


FIG. 1: Montaje genérico para medición homodina.

Ahora veamos que será la corriente  $I_-$ :

$$\begin{aligned} I_- &= I_1 - I_2 \\ &= 4\text{Re}(E_s^* E_{LO}) \end{aligned}$$

Los campos pueden escribirse como  $E_{LO} = \hat{X}_{1LO} \cos(\omega t) + \hat{X}_{2LO} \sin(\omega t)$  y  $E_s = \hat{X}_{1s} \cos(\omega t) + \hat{X}_{2s} \sin(\omega t)$ , ambos con la misma frecuencia. Además debido a que los fotodetectores tienen un efecto integrado se induce un promedio temporal. Por lo tanto:

$$\langle I_- \rangle = \hat{X}_{1s}^* \hat{X}_{1LO} + \hat{X}_{2s}^* \hat{X}_{2LO}$$

Esta expresión puede expresarse como[4]:

$$= |\alpha_{LO}| (\cos(\phi_{LO}) \hat{X}_{1s} + \sin(\phi_{LO}) \hat{X}_{2s})$$

A partir de esta expresión es posible encontrar las cuadraturas de la señal a estudiar por medio de variaciones en la fase del oscilador local.

En cuanto al estado del arte, actualmente varios grupos experimentales miden estas cuadraturas y a partir de ellas generan nuevo conocimiento científico. Un ejemplo de esto es el trabajo *Measurement of the quantum states of squeezed light* realizado por G. Breitenbach et al. en

el cual por medio de las cuadraturas - obtenidas por detección homodina- obtiene las funciones de Wigner que describen los estados espichados (squeezed) de la luz [5]. Otras aplicaciones incluyen aplicaciones en computación cuántica y sistemas de teleportación. Así mismo, actualmente, se han realizado publicaciones en las que se logra obtener las funciones de Wigner para la transición entre estados del campo electromagnético, por medio de la medición de cuadraturas [6].

## Marco experimental

Para la construcción del detector homodino se realizaron una serie de pasos a nivel experimental que van desde la selección de la fuente láser hasta la alineación de los elementos ópticos y electrónicos, incluyendo el diseño e implementación de un circuito restador.

El primer paso fue seleccionar la fuente láser que se usaría como oscilador local. Dados los recursos disponibles en el laboratorio, se consideró el Láser de Helio(He)-Neón(Ne) [633 nm] como el adecuado dado su disponibilidad y características ópticas como su visibilidad, lo cual facilita los procesos de alineación.

Con el propósito de medir las cuadraturas del campo eléctrico y conociendo el funcionamiento de un beam-splitter balanceado 50/50, se propuso inicialmente un montaje tentativo. Este consistía en un beamsplitter que recibiría la luz del oscilador local por un lado y la señal a estudiar de forma perpendicular por un lado adyacente. El haz del oscilador local pasaría por un juego de 4 espejos antes de incidir en el beamsplitter, de forma que se pudiera variar su fase ajustando los espejos. Además, se ubicarían dos fotodiodos en las caras opuestas a las de incidencia del oscilador local y la señal a estudiar de forma que en uno de estos se pudiera detectar la intensidad de la suma de los campos eléctricos y en el otro se pudiera detectar la intensidad de la resta. Posteriormente las corrientes generadas por los fotodiodos se restarían y se analizarían en un osciloscopio para obtener las cuadraturas. Este montaje puede observarse en la Fig. 2. Sin embargo, a medida que se fue implementando el montaje se decidió hacer algunas variaciones que permitieron simplificar el montaje y aprovechar los recursos disponibles en el laboratorio.

La primera observación fue que el juego de cuatro espejos para variar la fase del oscilador local era innecesaria y que este proceso se podía lograr con un solo espejo. Esto debido a que los movimientos de este espejo estarán en el orden de nanómetros, por lo que al variar la posición del espejo el haz no dejaría de incidir en el beam-splitter. Por otra parte, se decidió que la fuente Láser para el oscilador local y la señal a estudiar (en el caso donde se estudiaría una señal coherente) sería

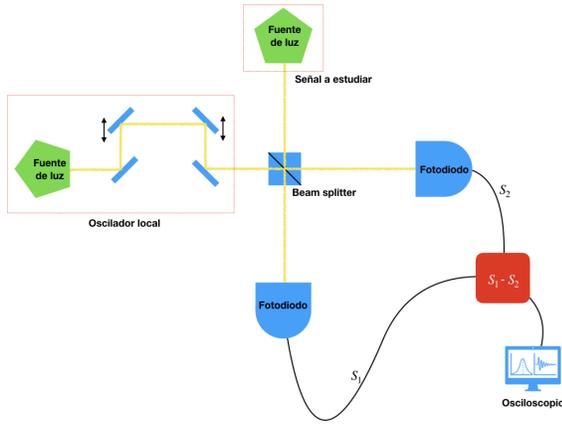


FIG. 2: Montaje inicial.

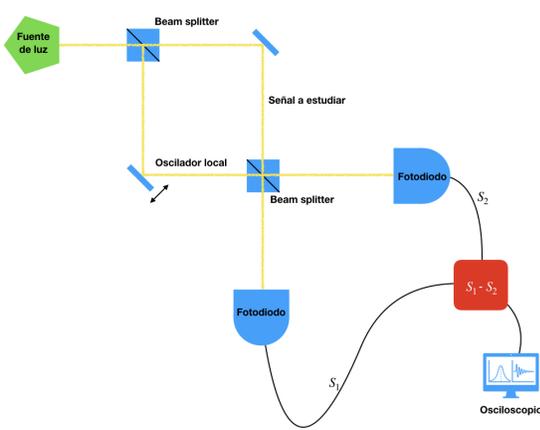


FIG. 3: Montaje definitivo.

la misma. Esto se logra dividiendo el haz antes de que entre al experimento, con un beamsplitter balanceado 50/50, y permite usar una sola fuente. El montaje modificado puede observarse en la Fig. 3.

En cuanto al restador electrónico considerado en el montaje, se decidió hacer una implementación basada en amplificadores operacionales. Para evitar cambios a las señales de entrada (las generadas por los fotodetectores) se montaron dos seguidores de voltaje que se ubicarían entre las señales y el restador. Además se montaron los circuitos correspondientes a los fotodiodos.

## Resultados

Tal como se propuso, el primer paso fue diseñar el oscilador local. Este consiste en un espejo móvil en el que el haz láser se refleja y mediante un piezoelectrico se varía en el orden de nanómetros el camino óptico del láser, variando así la fase del haz. Es importante notar que al ser tan pequeña la variación en el camino es

posible mantener el haz del láser enfocado y centrado en el beamsplitter aún cuando se está variando el camino con un solo espejo.

En cuanto a la parte electrónica, el primer paso fue seleccionar los fotodiodos. Dado que en el laboratorio se cuenta con las referencias FDS010 y FDS100 de ThorLabs Optics, se consideró conveniente realizar la selección del fotodiodo hasta después de la alineación de las partes óptica y electrónica, puesto dicha elección va a depender de la mejor área eficaz de captación de luz de acuerdo al patrón de interferencia temporal observado. Sin embargo, los circuitos sugeridos por el fabricante (FIG. 4) para cada fotodiodo se implementaron tal como se muestra en la FIG. 5.

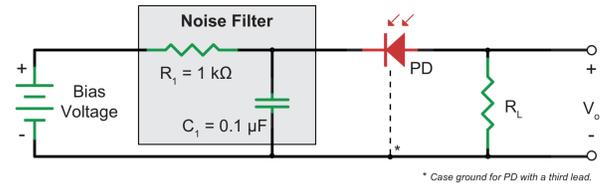


FIG. 4: Diagrama del circuito para un fotodiodo.

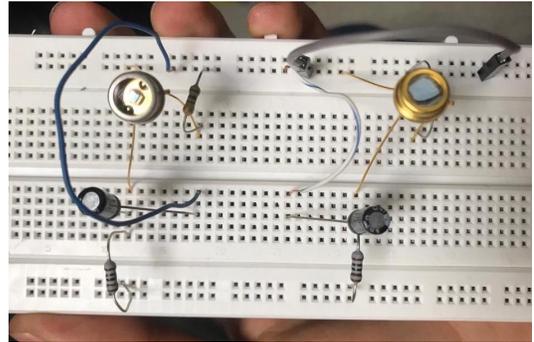


FIG. 5: Diagramas e implementación de los circuitos para el funcionamiento de los fotodiodos FDS010 y FDS100 de ThorLabs.

Al realizar las pruebas de los fotodiodos se notó que la resistencia que determina la ganancia ( $R_L$ ) era mejor reemplazarla por un potenciómetro para poder ajustar la ganancia, dependiendo de la intensidad del haz, sin tener que hacerle muchas modificaciones al circuito. Dado que en el laboratorio se cuenta con fotodiodos de otras referencias con circuitos ya implementados, se usaron estos, los cuales son los que se muestran en 6.

El segundo paso, y el más dispendioso, fue el diseño e implementación del circuito restador de las señales detectadas por los fotodiodos. La primera aproximación fue la implementación de un circuito restador tradicional con un amplificador operacional de referencia LM741



FIG. 6: Fotodiodo con su respectivo circuito. A través de un potenciómetro es posible variar la amplificación de la señal y así ajustarlo a la intensidad de fuentes a estudiar.

y resistencias de tolerancia del 5%. El diagrama del circuito se presenta en 7.

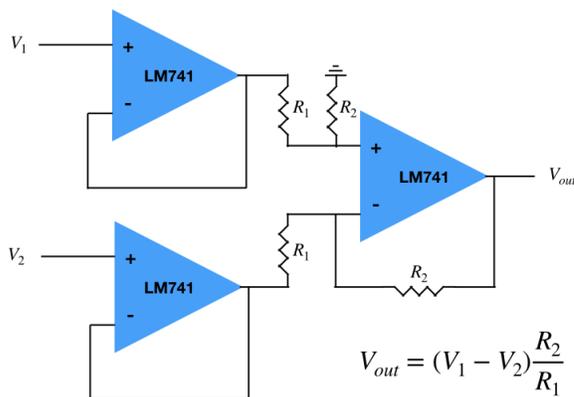


FIG. 7: Diagrama inicial del circuito restador

Se hizo una simulación para verificar que el diseño del circuito correspondía a un restador y así poder evaluar los potenciales resultados. A pesar que los resultados fueron satisfactorios, al realizar la implementación y posteriores pruebas de los circuitos tal como se planearon se observó que la señal era obtenida de la resta era muy ruidosa, incluso cuando se incorporaban seguidores de voltaje para mantener las señales de entrada estable. Debido a estos problemas asociados con el ruido, se decidió implementar el mismo circuito pero usando un amplificador de instrumentación de referencia AD620AN e incluir resistencias adicionales en los seguidores de voltaje para limpiar la

señal. El diagrama de estas modificaciones se muestra en FIG. 8.

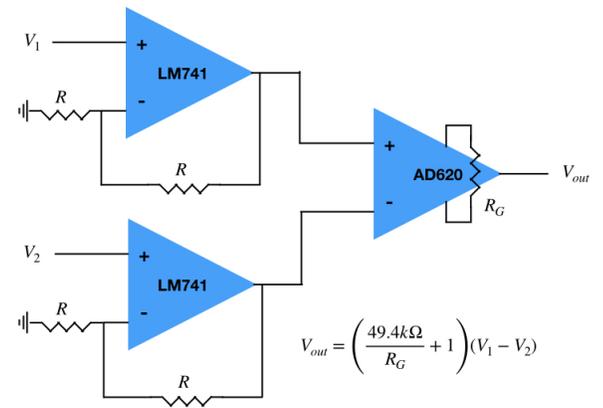


FIG. 8: Diagrama del circuito restador usando amplificadores operaciones LM741 y LM358

Una vez se verificó -a través de una simulación- que este circuito estaba funcionando correctamente, se hizo su implementación en una baquelita electrónica para evitar inclusión de ruido por tener partes electrónicas con demasiada movilidad. Sin embargo, teniendo en cuenta que pueden presentarse fallas de los elementos debido a posibles cortos circuitos, se garantizó que en el montaje definitivo los elementos dañados se pudieran reemplazar fácilmente. La implementación del restador y los respectivos seguidores de voltaje en las baquelitas se presenta en FIG10.



FIG. 9: Circuito restador usando amplificadores operacionales AD620 implementado en baquela electrónica. Las señales de entrada son aisladas con seguidores de voltaje construidos con LM741

Al realizar la conexión del circuito 10 y hacer las re-

spectivas pruebas, el circuito -específicamente el amplificador operacional- explotó. Se pensó que este incidente se debió a errores en la soldadura sobre la baquelita. Por tanto, se hizo un diseño para la impresión del circuito, tal como se observa en

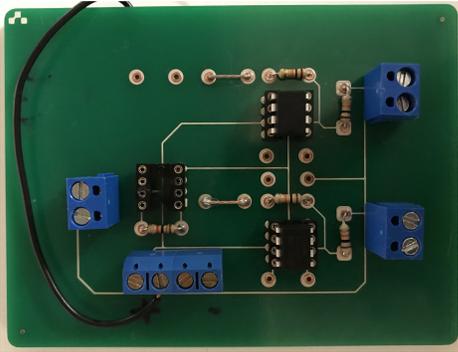


FIG. 10: Impresión del prototipo del circuito restador y seguidores de voltaje implementado con OPAMs AD620 y LM741, respectivamente.

Nuevamente, al realizar las pruebas del circuito, el amplificador de diferenciación AD620 explotó. Dados los inconvenientes presentados con este amplificador, se reconsideró el diseño del circuito restador. Esta vez usando amplificadores LM358, cuya configuración es dual; por lo que se utilizaron dos integrados, conservando el diseño inicial del restador planeado con LM751 (FIG: 8), pero implementados el LM358, tal como se muestra en FIG. 11

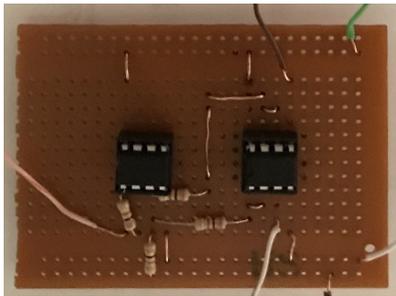


FIG. 11: Circuito restador usando amplificadores operacionales LM358 implementado en baquela electrónica. Las resistencias son del mismo valor ( $3k\Omega$ ) para obtener ganancia de 1.

Las pruebas realizadas con este último circuito fueron satisfactorias puesto los resultados concordaron significativamente bien con las predicciones y cálculos realizados. El circuito, además de realizar la resta esperada, cuenta con la ventaja de que la señal obtenida es poco ruidosa, excepto en los puntos donde las señales de entrada cambian de signo. Sin embargo, esto no representa mayor problema puesto en el detector homodino se trabaja sólo con señales positivas. Las pruebas realizadas fueron hechas con señales provenientes de un generador,

con características como: señales de igual amplitud, frecuencia y fase; de igual amplitud y frecuencia pero distinta fase, como las señales de detección homodina; finalmente, señales de igual amplitud, pero fase y frecuencia distintas. Los resultados se presentan en FIGS 12 13 14.

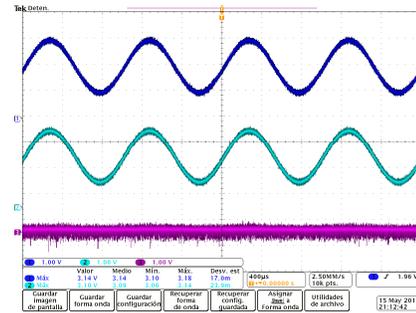


FIG. 12: Resta de señales positivas con igual amplitud, frecuencia y fase

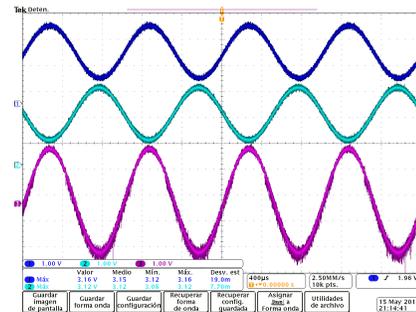


FIG. 13: Resta de señales positivas con igual magnitud, frecuencia pero fases distintas

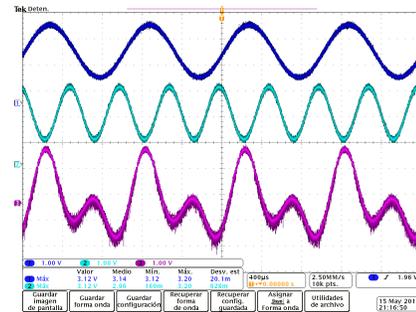


FIG. 14: Resta de señales con igual magnitud pero distintas fases y frecuencias

Teniendo el oscilador local y la parte electrónica implementados, el paso siguiente fue el ensamble y alineación de los elementos ópticos y electrónicos. Es decir, se hizo la alineación de la fuente láser, los espejos, los beamsplitters, así como los fotodiodos. Además se incorporaron las señales de los detectores (fotodiodos) al circuito restador. En la Figura 15 se observa el montaje experimental óptico completo. El montaje final incluye adicionalmente resta-

dor, controlador de piezoelectrico, osciloscopio y fuente de alimentacion dual.

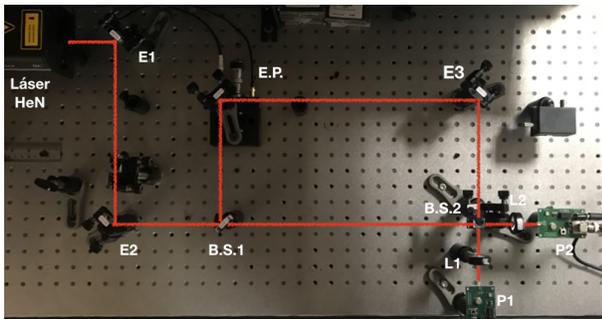


FIG. 15: Montaje en mesa óptica para detección homodina. La luz emitida por la fuente láser, por medio de reflexiones en los espejos E1 y E2, es dirigida a un beamsplitter (B.S.1) donde se separa en dos haces. El primer haz se refleja en un espejo montado sobre un piezoeléctrico (E.P.) y posteriormente se refleja en el espejo E3 para incidir sobre el beamsplitter B.S.2. El movimiento del piezo permite variar el camino optico de este haz. El segundo haz incide directamente sobre el beamsplitter B.S.2, manteniendo un camino optico constante. Posteriormente los haces resultantes del beamsplitter son detectados por los fotodiodos P1 y P2, que se encuentran en el punto focal de los lentes L1 y L2 respectivamente.

Teniendo ajustado y alineado el montaje experimental, se caracterizó el piezo-eléctrico. Esto es, describir la distancia recorrida por el piezo en función del voltaje aplicado.

Inicialmente se hizo cambiando el voltaje del controlador del piezo y registrando la intensidad medida (en voltajes) por los fotodiodos. Los resultados encontrados (FIG. 16) muestran un patrón de interferencia sinusoidal que presenta excesivo ruido. Al repetir las mediciones, se observó que la fuente láser no era significativamente estable en cuanto a intensidad y esto, junto con otros factores del laboratorio, podrían estar afectando la estabilidad y limpieza de las señales obtenidas.

Para disminuir el ruido de la señal y poder caracterizar de manera más precisa el piezo, se incorporó un generador de señal en escalón que variara el voltaje del controlador del piezo de manera automática y constante en el tiempo, pero a una frecuencia baja. Este procedimiento ayudó a disminuir el ruido e inestabilidad de la señal y se pudo caracterizar el piezo. La gráfica obtenida (FIG. 17) muestra el patrón de interferencia en cada uno de los fotodiodos, de tal manera que dicho patrón se encuentra desfasado  $\pi/2$ , lo cual coincide con las predicciones teóricas de Bachor [1][2].

Conociendo la relación entre el rango de voltajes del generador de señales (0V-10V), del controlador del piezo (-0.02 a 75.00 V) y el rango de movimiento del piezoeléctrico (alrededor de  $13\mu\text{m}$ ), se pudo hallar la relación entre la distancia relativa entre las trayectorias

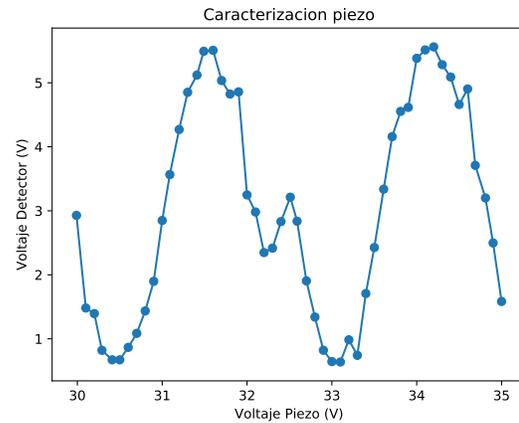


FIG. 16: Caracterización del piezoeléctrico variando manualmente el controlador

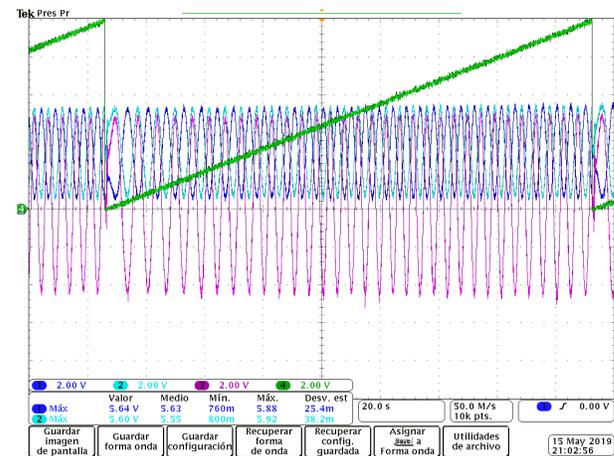


FIG. 17: Caracterización del piezoeléctrico usando generador de señales

de los haces y la intensidad medida por los fotodiodos. El orden de la longitud de onda ( $\lambda$ ) obtenida a través de la caracterización coincide con el de la fuente láser, reportado por el fabricante. La FIG. 18 corresponde a los resultados de la caracterización del piezoeléctrico.

Con el piezo-eléctrico ya caracterizado, se procedió a probar el restador final (Fig 11) usando las señales procedentes de los detectores. Así, moviendo el piezoeléctrico y, por tanto, cambiando la distancia relativa recorrida por los dos haces un patrón de interferencia temporal para cada uno de ellos. Las señales recibidas por cada uno de los fotodiodos corresponden las señales a restar. Tal como se había afirmado, las señales de entrada son positivas, lo cual evita el ruido asociado al cambio de signo de las señales. Sin embargo, la resta obtenida (FIG. 19) tiene una parte negativa debido a que las señales se encuentran desfasadas un ángulo de  $\pi/2$ . A pesar de esto, el ruido introducido es relativamente bajo, lo cual afecta sólo en menos medida las mediciones realizadas.

## Conclusiones

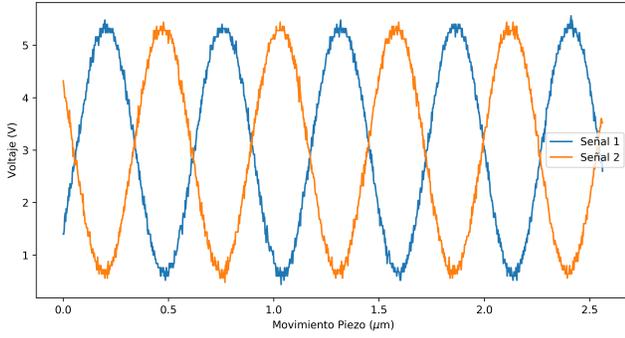


FIG. 18: Caracterización del piezoeléctrico. Muestra la relación entre la distancia recorrida por el piezo-eléctrico y la intensidad de la luz recibida por los fotodiodos.

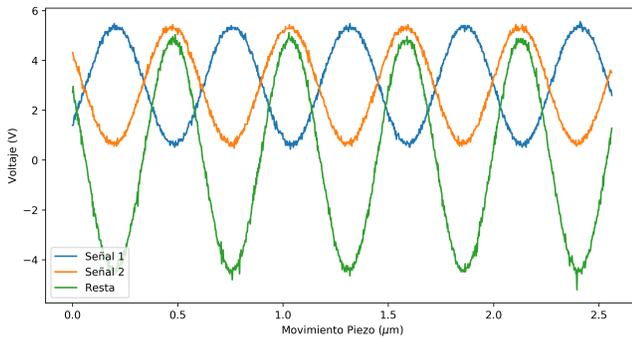


FIG. 19: Resultado de la resta de señales provenientes de los detectores usando una fuente láser de He-Ne con  $\lambda = 633nm$

En suma, este proyecto cumplió con el objetivo propuesto de diseñar y construir un detector homodino óptico usando una fuente láser en la región del visible. Dado que el Grupo de Óptica Cuántica de la Universidad de los Andes no contaba con todos los elementos necesarios para su construcción, fue necesario realizar desde el diseño hasta la implementación de algunas partes específicas como el restador electrónico de señales. En este proceso fue necesario rediseñar en varias ocasiones los circuitos debido a que algunos no funcionaban y otros no cumplían con las características técnicas requeridas para estudiar con el detector homodino las señales de interés. Finalmente, luego de varios prototipos, fue posible encontrar un restador funcional y junto con el montaje óptico y fotodiodos se ensambló y alineó el montaje experimental completo, el cual consta de un láser, tres espejos fijos, un espejo móvil con piezoeléctrico, dos beamsplitter, dos lentes, dos fotodiodos con sus respectivos circuitos, controlador de piezoeléctrico, generador de señales, osciloscopio y fuente de alimentación dual. De esta manera, el Departamento de Física de la Universidad de los Andes cuenta con un montaje experimental de detección homodina en el cual ya se han hecho las primeras mediciones de calibración y caracterización. Así, en el corto plazo se podrán medir las cuadraturas de los campos electromagnéticos de señales de interés.

- 
- [1] H.-A. Bachorand T. C. Ralph, Guide to experiments in quantum optics (WILEY-VCH, 2009) second, revised and enlarged edition ed., Chap. 5.
  - [2] H.-A. Bachorand T. C. Ralph, Guide to experiments in quantum optics (WILEY-VCH, 2009) second, revised and enlarged edition ed., Chap. 8.
  - [3] R. M. de Araujo, Basics for measuring light quantum fluctuations and correlations in the lab, (2015).
  - [4] A. M. Fox, Quantum optics: An introduction (Oxford University Press, 2006) first edition ed., Chap. 7.
  - [5] J. M. G. Breitenbach, S. Schiller, Measurement of the quantum states of squeezed light, (1997).
  - [6] M. B. A. Zavatta, S. Viciani, Quantum-to-classical transition with single-photon-added coherent states of light, (2004).