

Caracterización y calibración de un separador espacial de haces por polarización

Juan Sebastián Rodríguez Páez

Profesora Directora: Alejandra Valencia, Ph.D.

Profesor Revisor: Dr Alejandro García.



Bogotá D.C., Colombia
Universidad de los Andes
Facultad de Ciencias - Departamento de Física
Proyecto Experimental en Física
19 de mayo de 2022

1 Agradecimientos

Principalmente, quiero agradecerle a los profesores del departamento de física, en especial a la profesora Alejandra Valencia. Con la profesora, acordamos lograr la caracterización y calibración del separador espacial para así lograr medidas de precisión en el montaje experimental de la interferencia de dos fotones. Quiero agradecerle a Jeimmy Alejandra Alarcón por su increíble paciencia para que yo lograra aprender acerca elementos ópticos que eran desconocidos para mí, así como su acompañamiento durante la realización de este proyecto. Finalmente, quiero agradecerle al profesor José Alejandro García, el cual ha sido revisor de este proyecto y me ha indicado correcciones y mejoras que, por supuesto, han sido tenidas en cuenta para la presentación final de este trabajo.

Índice general

1. Agradecimientos	2
2. Introducción	4
2.1. Estado del arte	4
3. Evaluación del problema	6
3.1. Problema de investigación	6
3.2. Justificación del problema	6
3.3. Objetivos	6
3.3.1. Objetivo general	6
3.3.2. Objetivos específicos	6
3.4. Metodología	7
3.5. Consideraciones éticas	7
3.6. Presupuesto	7
4. Desarrollo experimental del problema	9
4.1. Montaje experimental general	9
4.2. Instalación de la PTBD	10
4.3. Alineación de la PTBD	13
4.4. Picos de intensidad	15
4.5. Caracterización de la PTBD	15
5. Resultados	17
5.1. Código para los centroides	17
5.2. Obtención de imágenes	18
5.3. Curva de calibración	21
6. Conclusiones	24

2 Introducción

2.1. Estado del arte

Los avances experimentales desarrollados para lograr la implementación de un separador espacial de haces y su caracterización, el cual es utilizado en óptica y en aplicaciones prácticas corresponden a una caracterización y calibración del separador espacial en óptica cuántica. Ahora, un separador de haz (*BD*, por sus siglas en inglés) es un dispositivo que separa un haz polarizado en dos haces que se encuentran separados espacialmente de tal forma que la propagación es paralela y con polarizaciones ortogonales [1]. Haciendo uso de la propiedad de sintonizabilidad es posible sintonizar la separación espacial de los haces y, por ello, hacer uso de equipos que logren la separación de haces sintonizables por polarización (*PTBD*) [1].

La geometría normal de un dispositivo *PTBD* se basa en colocar dos espejos equidistantes a una distancia L de un separador por polarización (*PBS*) y posteriormente, colocarlos en una placa a la cual se le permite rotar cierto ángulo θ respecto al centro del *PBS* [1]. Esto es posible verlo en la sección (a) de la Figura 1. Cuando ese ángulo de rotación es nulo, la propagación generada es colineal y, por otro lado, cuando se rota la plataforma se generan dependencias de otras distancias del montaje experimental. Esto se muestra en la sección (b) de la Figura 1. Por otro lado, las separaciones definidas de los componentes horizontales y verticales respecto a la posición central de los haces sin rotar son denominadas d_H y d_V , las cuales se encuentran representadas en la sección (c) de la Figura 1. También, en dicha sección es posible ver que cuando el ángulo es mayor que cero el haz que posee polarización horizontal se separa la distancia d_H respecto al eje de referencia y que el de polarización vertical se encuentra separado una distancia d_V . Las condiciones que se cumplen son que $d_H > 0$ y que $d_V < 0$. Sin embargo, si la rotación se hace en la dirección contraria, es posible encontrar que la polarización está reversada en cuanto a las condiciones anteriormente descritas. Esto se muestra en la sección (d) de la Figura 1. Por último, las últimas secciones de la figura logran evidenciar los casos en donde no se logra la reflexión por medio del *PBS* y que debido a esto, se pierde la colinealidad [1].

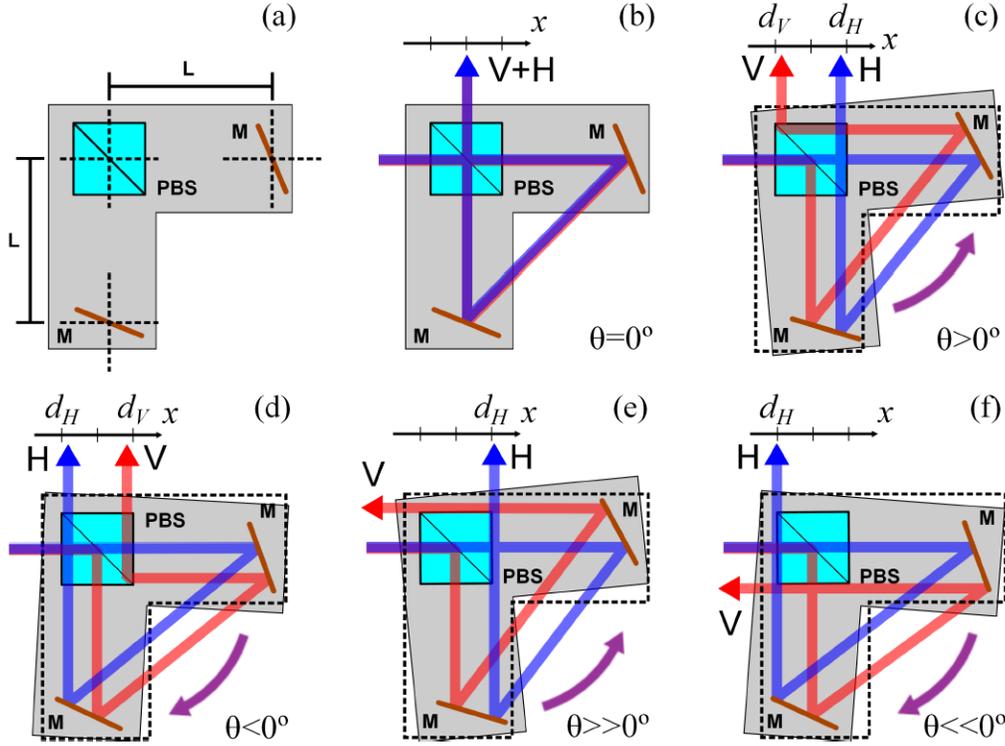


Figura 1: Descripción geométrica de un dispositivo *PTBD*. Cada una de las secciones explora casos en donde cambian los fenómenos de polarización y la separación de los haces que se logran obtener con separación espacial. Tomado de [1].

La importancia de entender la geometría y las configuraciones a distintos ángulos para dispositivos como el *PTBD*, permitió el desarrollo de diversos estudios en óptica y, particularmente, de la forma en la que puede darse un fenómeno de interferencia con separación arbitraria [3]. Esta interferencia fue posible analizarla haciendo uso del *PTBD*, en analogía con el interferómetro de Michelson, con el fin de poder hacer un mapeo espacial de la intensidad y proponer una forma de medir la longitud de la coherencia espacial. Ahora bien, en cuanto al uso de la *PTBD*, este es de relevancia en la realización de diversos experimentos físicos. Por ejemplo, este dispositivo ha sido utilizado en simulaciones de sistemas cuánticos abiertos estudiando decoherencia porque con él se logra acoplar distintos grados de libertad y simular el acople de la polarización con el ambiente [4]. Por otro lado, la *PTBD* también ha sido utilizada con aplicaciones ingenieriles para mejorar la sensibilidad de estos dispositivos con el fin de obtener medidas en óptica cuántica con mayor precisión [4].

3 Evaluación del problema

3.1. Problema de investigación

El problema de lograr una caracterización y calibración de un separador espacial de haces por polarización es fundamental para el desarrollo de un interferómetro de dos fotones. Específicamente, la *PTBD* se implementa en la construcción de la fuente y, debido a esto, determina la precisión de las mediciones del interferómetro de variables espaciales. Las aplicaciones principales de lograr un entendimiento de la correlación de variables espaciales corresponden a tareas en computación cuántica y en información cuántica.

3.2. Justificación del problema

La justificación de lograr una calibración y caracterización del separador espacial de haces se explica por el hecho de que resulta ser un equipo de alta importancia en el montaje experimental encargado de medir la interferencia de dos fotones estudiando las variables espaciales. Entendiendo el funcionamiento del equipo, sus especificaciones y su curva de calibración, será posible lograr reportar los resultados para las aplicaciones en las áreas mencionadas anteriormente.

3.3. Objetivos

3.3.1. Objetivo general

- Caracterizar la *PTBD* en el Laboratorio de Óptica Cuántica mediante la implementación y la curva de calibración del equipo.

3.3.2. Objetivos específicos

- Instalar la *PTBD* en el montaje experimental diseñado para interferencia de dos fotones.
- Alinear la *PTBD* con el camino óptico del haz de prueba.
- Analizar la separación espacial obtenida por la *PTBD* de forma experimental.
- Realizar una curva de calibración entre el ángulo y la distancia de separación entre los dos haces de la *PTBD*.

3.4. Metodología

Para alcanzar el primer objetivo específico, es necesario determinar la posición en la cual debe ser ubicada la *PTBD* en el montaje experimental de la interferencia de dos fotones y, posteriormente, fijar el equipo en la mesa óptica. Ahora, para alcanzar el segundo objetivo específico, se debe verificar que en un ángulo nulo, el haz que sale del equipo, sea único y perpendicular al haz incidente. Para el tercer objetivo específico, será necesario ver de forma experimental un cambio de la separación espacial en función del ángulo, observando imágenes de los dos haces en una cámara *CCD*. Para el último objetivo específico, se hará la curva de calibración con mediciones de la separación espacial. Esto requiere adquirir imágenes de los haces en función del ángulo. Luego, realizando el análisis de imágenes, se calculará el centroide de cada haz y, finalmente, se determinará la separación entre los centroides.

3.5. Consideraciones éticas

Cada uno de los experimentos desarrollados y las medidas que se van a obtener serán de consulta abierta para la replicabilidad y revisión por parte de personas interesadas en el tema de estudio, esto con el fin de que cualquier réplica de este experimento pueda permitir la obtención de datos en el orden de magnitud reportado para este estudio experimental. De igual forma, las gráficas, comportamientos o tendencias experimentales serán de consulta abierta para las personas interesadas. Los resultados experimentales se reportarán de forma objetiva, buscando un adecuado entendimiento de la caracterización de la *PTBD*, sin favorecer intereses personales ni del grupo de investigación. Finalmente, es importante mencionar que el desarrollo experimental solo abarca elementos ópticos del laboratorio de Óptica Cuántica de la Universidad de los Andes por lo que este proyecto solo tiene alcances netamente experimentales, sin permitir que se afecte a otras personas u otros experimentos que se encuentren en curso en el laboratorio utilizado.

3.6. Presupuesto

Para este proyecto experimental, el presupuesto estaría relacionado con en el desarrollo del equipo que se va a caracterizar y calibrar. Sin embargo, dada la necesidad de únicamente estudiar el equipo, no sería necesario incluir su costo de desarrollo en el presupuesto. Ahora bien, es pertinente tener en cuenta que se debe hacer uso de las gafas en el laboratorio, además de cada uno de los equipos correspondientes del montaje experimental de estudio. Esto se debería incluir en el presupuesto general de dicho montaje, mas no en la caracterización de un equipo específico. Sin embargo, en esta sección se incluyen los costos del desarrollo de la interferencia de dos fotones como se muestra a continuación.

- Soportes K6X: USD 314,57.
- Espejos: USD 525.
- Diodo láser: USD 170.
- Irises: USD 110.
- PBS: USD 600.
- Cámara CCD: USD 400.
- PTBD (Tunable Beam Displacer): Fabricada por la Universidad de los Andes.

Por lo tanto, se tendría un presupuesto estimado de USD 2119,57 en los equipos principales. Este presupuesto de ejecución tiende a aumentar debido al uso de otros elementos ópticos en el Laboratorio de Óptica Cuántica de la Universidad de los Andes.

4 Desarrollo experimental del problema

4.1. Montaje experimental general

El montaje corresponde a una sección del montaje implementado para el experimento de la interferencia de dos fotones. En la Figura 2 se muestra el montaje general que se implementa para la medición de la interferencia. Dados los objetivos del proyecto, el enfoque estará dado en la sección de la *PTBD*, en donde los fotones son separados de acuerdo a su polarización.

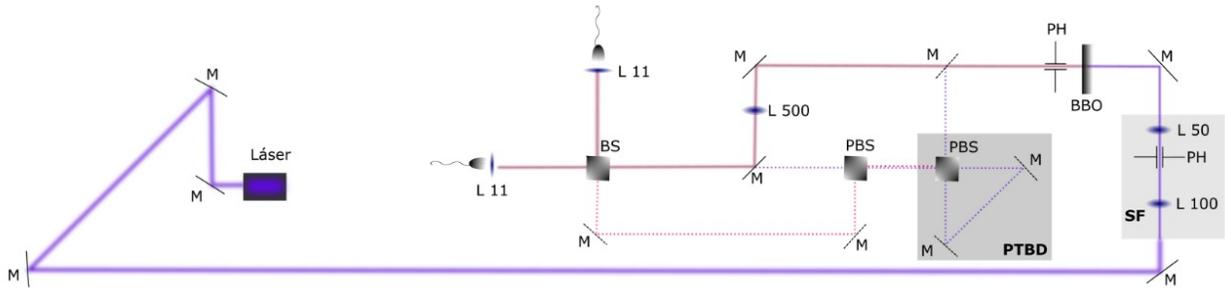


Figura 2: Montaje experimental implementado para la interferencia de dos fotones. La sección que se implementará para la caracterización y calibración de la *PTBD* corresponde a donde se muestra la *PTBD*. *M* denota un espejo, *PBS* denota un Polarizing Beam Splitter. Lo demás equipos no son necesarios debido a lo que se desea realizar.

Ahora bien, en la Figura 3 se muestra el montaje experimental necesario para lograr una calibración adecuada de la *PTBD*. Dado que en el interferómetro se utiliza una fuente de pares de fotones de 810 nm , fue necesario usar un láser con la misma longitud de onda para efectos de la alineación en la *PTBD*. Teniendo en cuenta que los pares de fotones del interferómetro son generados por *SPDC*-Tipo 2 colineales, sus polarizaciones son ortogonales y, por lo tanto, al pasar por la *PTBD* son separados por su polarización.

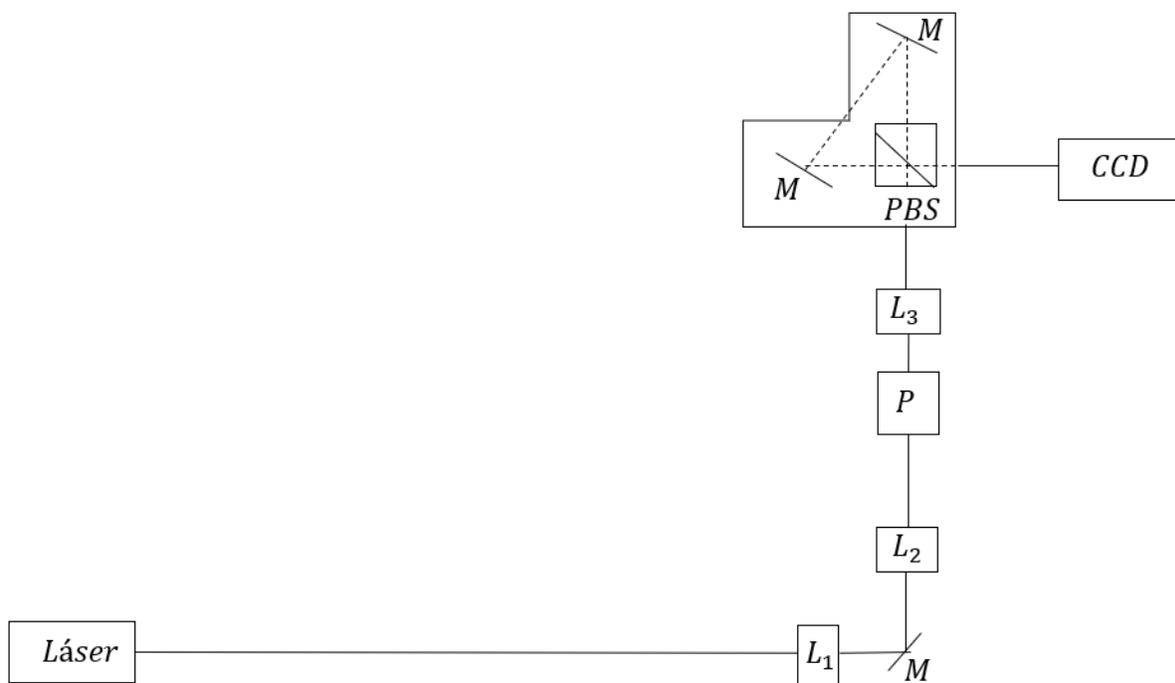


Figura 3: Montaje para la *PTBD*. En él se muestra la forma específica de la trayectoria de los haces, los cuales al ser separados por polarización, deberían mostrar dos círculos asociados a cada haz, con polarización vertical u horizontal. Estos círculos son la distribución de intensidad. *KX6* corresponde a la fuente del montaje, *M* denota los espejos, L_1 y L_2 son lentes de 200 mm y L_3 es un lente de 500 mm . Se utilizaron estas lentes específicas con el fin de colimar el haz.

4.2. Instalación de la *PTBD*

La instalación de la *PTBD* fue realizada en la sección específica del montaje experimental general mostrado anteriormente en la Figura 2. Durante la instalación, se tuvo en cuenta el tipo de tornillos que permitían unir cada una de las piezas de la *PTBD*, con el fin de lograr un ensamblaje adecuado. Por otro lado, cada uno de los tornillos se fijó fuertemente a cada una de las partes con el fin de que estas estuviesen rígidas y no permitieran ningún tipo de movimiento involuntario del equipo. El primer soporte se fija a la mesa en la trayectoria del haz del montaje. El segundo soporte, ubicado encima, permite el movimiento conjunto de la *PTBD* y el soporte en forma de (*T*) permite colocar los espejos que permitirán la reflexión y transmisión de los haces que pasen, de acuerdo a la polarización que poseen. Por otro lado, en el centro de cada una de las partes se tiene un orificio vertical, el cual permite instalar el soporte sobre el cual se coloca el *PBS*. Vale la pena mencionar que la separación de los haces se da debido únicamente a la rotación de los espejos, por lo cual, la plataforma que soporta al *PBS* no debe estar en contacto con la plataforma giratoria.

En el desarrollo de la instalación, fue importante tener en cuenta que el montaje óptico se debía encontrar nivelado y a una altura de 12 cm respecto a la mesa óptica, debido a que esta es la altura del láser y a la que se montará el interferómetro. Esto es de vital importancia en el proceso de la alineación del montaje. En las Figuras 4, 5 y 6 se muestran diversos pasos en el proceso de instalación.

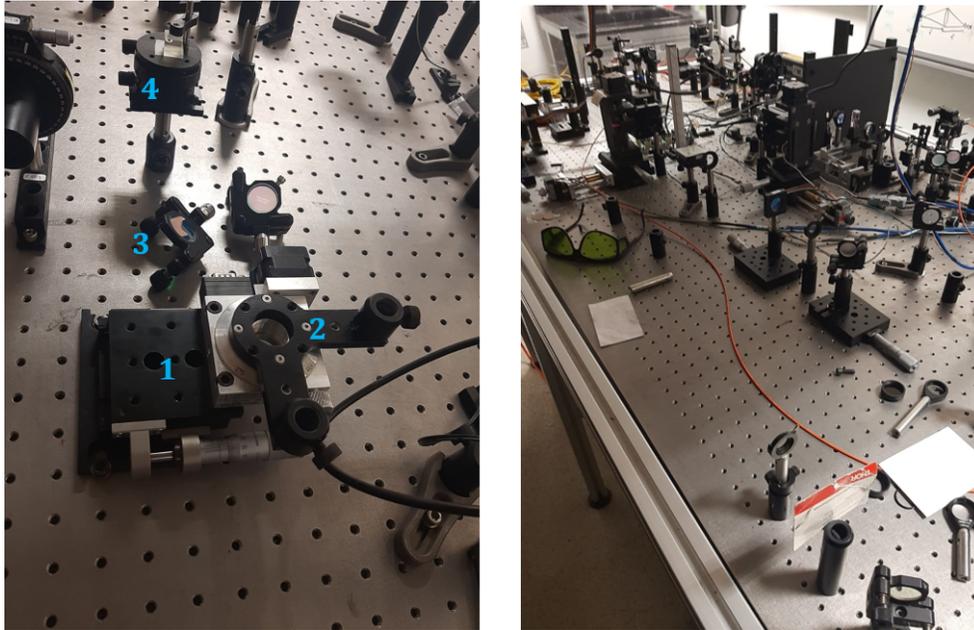


Figura 4: En el panel izquierdo de esta figura es posible ver las partes de la *PTBD* previo a su ensamblaje. #1 hace referencia a la plataforma micrométrica anclada con la plataforma rotacional de la *PTBD*. 2 hace referencia a el soporte giratorio de los espejos, el cual va atornillado a la plataforma rotacional. 3 refiere a los espejos y 4 corresponde al soporte del *PBS* y el *PBS*. Este pasa por el orificio central de la plataforma rotatoria. En el panel derecho de esta figura es posible ver la zona del montaje experimental en donde la *PTBD* debía ser instalada.

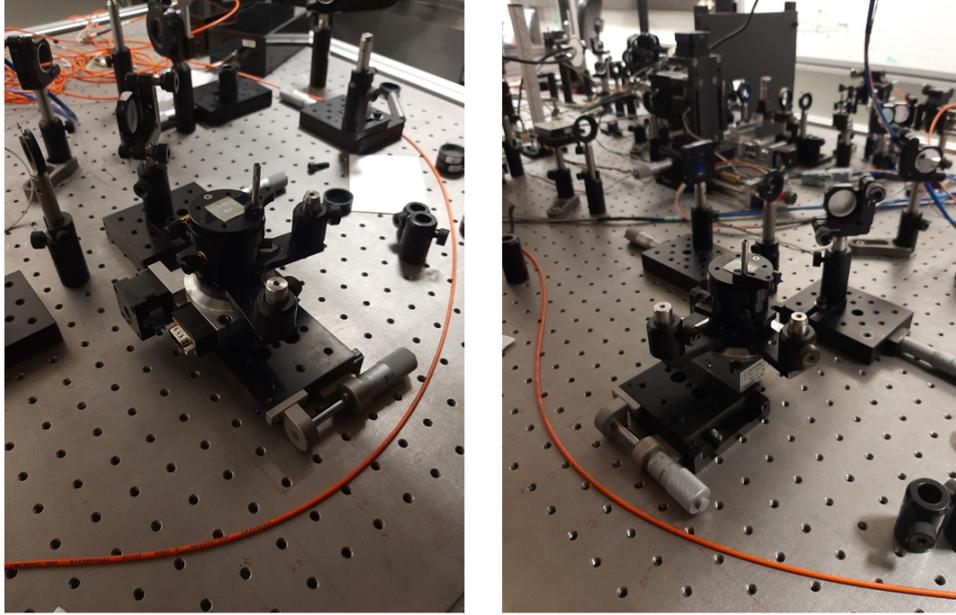


Figura 5: En esta figura es posible ver el ensamblaje de los soportes principales de la *PTBD* antes de incluir los espejos y el *PBS* en el montaje.

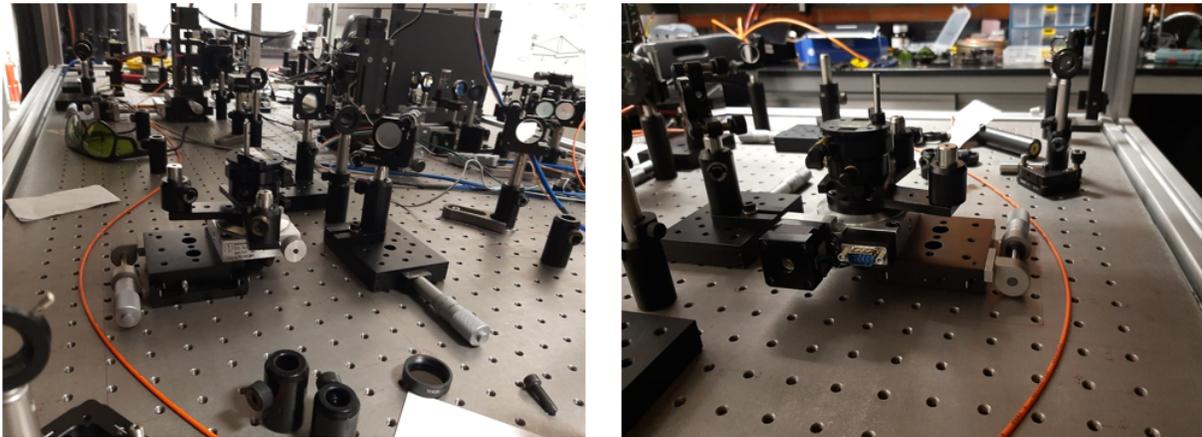


Figura 6: En esta figura se muestran otras vistas del ensamblaje de los soportes principales de la *PTBD*.

Posterior a la instalación, se verificó que el *PBS* efectivamente tuviese la característica de separar un haz por polarización. Esto se logró cambiando la polarización del haz incidente, de tal forma que cuando fuese horizontal, toda la luz era transmitida a través del *PBS* y que, cuando era vertical, toda la luz era reflejada por el *PBS*. Con este método se verificó que efectivamente el *PBS* era el adecuado para utilizar en la *PTBD*. En la Figura 7, se muestra como ejemplo, la forma de colocar el *PBS* su superficie.

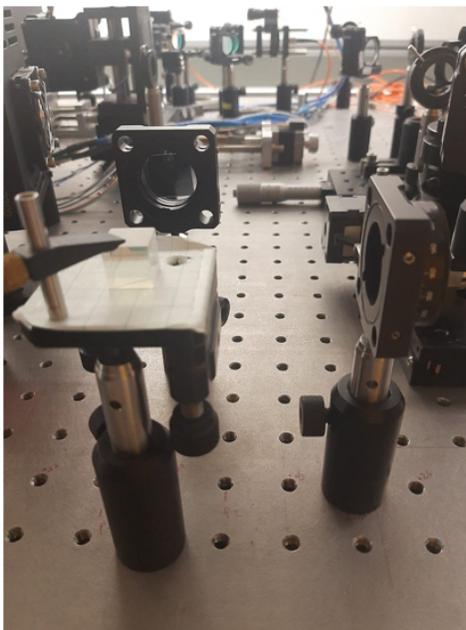


Figura 7: Verificación de que el PBS cumple con la propiedades de separar el haz incidente por su polarización.

4.3. Alineación de la PTBD

La alineación del camino óptico del haz fue realizado utilizando un iris en una montura magnética, a la misma altura del montaje. Estos permiten lograr ver un haz en un lugar de la mesa, lejano al lugar de donde proviene el haz. Adicionalmente, fue necesario usar unas lentes de 200 mm y 500 mm para poder mantener colimado el haz. Así, previo a la entrada del haz en la *PTBD*, se alinearon los dos caminos ópticos presentados en el montaje. Uno de ellos parte de la fuente hasta un espejo y el otro corresponde al camino del espejo a la entrada de la *PTBD*. Los pasos fundamentales de la alineación se explicarán a continuación.

La alineación inicial es alinear los dos espejos de la *PTBD* sin la presencia del *PBS*. Esto se hace colocando dos iris a la salida de la *PTBD*, uno cercano y uno lejano, de tal forma que los espejos se alinean con respecto al iris más lejano a cada espejo. Posteriormente, al tener una alineación adecuada con los espejos de la *PTBD*, se colocó el *PBS* verificando que el haz incidiera directamente en el centro de la cara del *PBS*. Luego, se verifica que el haz reflejado y transmitido logren tocar los dos espejos de la *PTBD* en un mismo punto usando los dos grados de libertad de inclinación y el grado de libertad de rotación de la plataforma que soporta el *PBS*. Además, el haz de salida de la *PTBD* debe ser una superposición de los dos haces. En este punto, no se deben mover los espejos porque eso desalinea el camino de salida de la *PTBD*. Finalmente, se verifica que al rotar los espejos, los haces tengan una separación. Al tratarse de un haz infrarrojo, fue necesario el uso de una tarjeta de ThorLabs para poder ver el haz y alinear correctamente. En

las Figuras 8 y 9 se muestran las evidencias de esta alineación inicial. Como último paso, se debe atar un caucho desde el soporte de los espejos a la mesa, para evitar la inercia del giro de la *PTBD*.

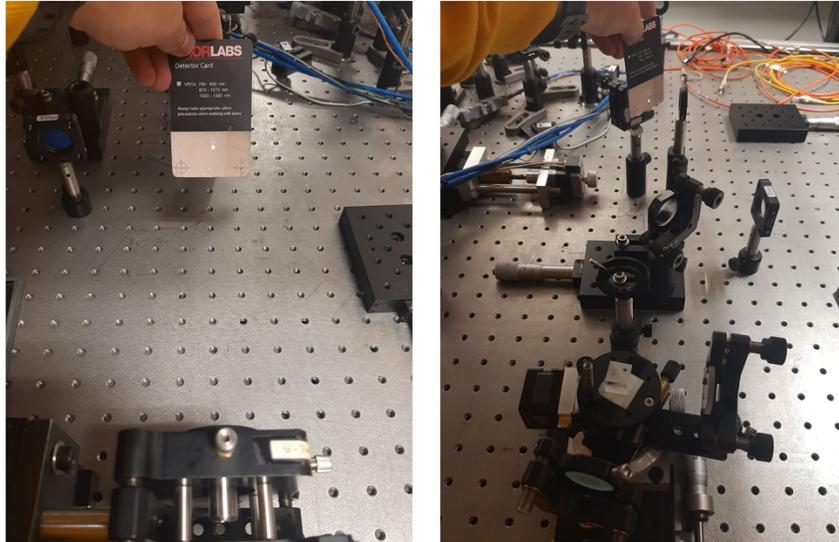


Figura 8: En el panel izquierdo de esta figura es posible ver la alineación del primer camino óptico antes de la incidencia en el espejo. En el panel derecho de la figura es posible ver cómo se ve el haz en la incidencia del espejo.

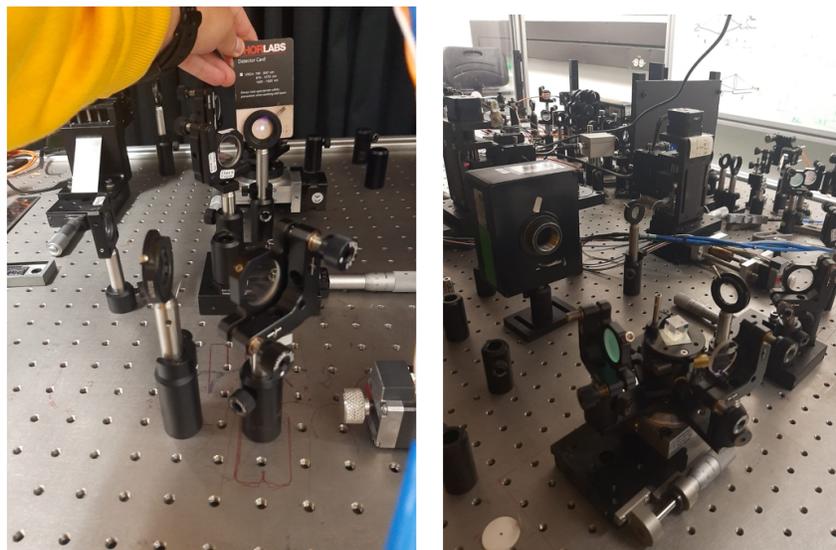


Figura 9: En el panel izquierdo de esta figura es posible ver la alineación del haz en el camino óptico previo a la incidencia del haz en la *PBS* ubicada en la *PTBD*. En el panel derecho es posible ver la cámara que detectará los picos de intensidad. Colocando la tarjeta del haz infrarrojo, sería posible ver los dos picos de intensidad.

4.4. Picos de intensidad

Ahora bien, posterior a la alineación, se verificó que a la salida de la *PTBD* fuera posible ver los picos de intensidad. Lo que es importante en este paso es lograr verlos a una misma altura tal que al mover el motor de la *PTBD*, estos queden sobrepuestos en el origen y la medición sea adecuada. Es posible ver los haces en la Figura 10.

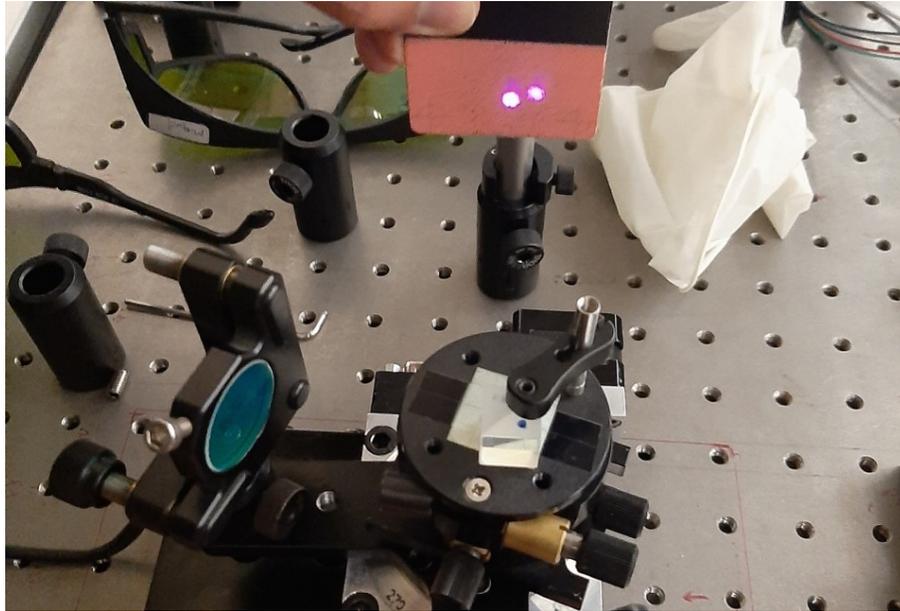


Figura 10: En esta figura es posible ver los máximos de las distribuciones de intensidad de forma experimental. La variación de la distancia de estos máximos con el ángulo permitirá la caracterización de la *PTBD*.

4.5. Caracterización de la *PTBD*

En comparación a las imágenes experimentales mostradas anteriormente, en el montaje definitivo se incluyó la cámara *CCD* a la salida de la *PTBD* para la toma de imágenes, se incluyeron los lentes que permitieron colimar el haz y se incluyó un polarizador previo a la *PTBD* con el fin de observar el haz asociado a cada polarización. En la figura 11, es posible ver el montaje experimental previo a la toma de imágenes.

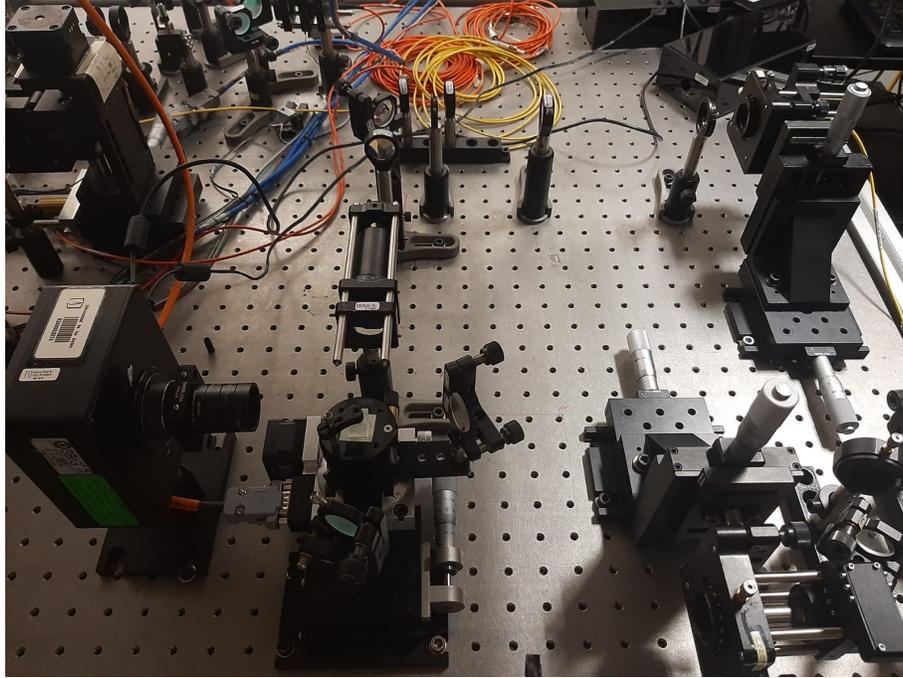


Figura 11: Montaje experimental implementado para la caracterización y calibración de una *PTBD*. Como se mencionaba, se incluyó el polarizador, la cámara *CCD* y los lentes necesarios para colimar el haz infrarrojo.

5 Resultados

5.1. Código para los centroides

El código implementado para el cálculo de los centroides de las fotos es explicado en esta sección. En el código, se utilizó la librería *CV2*, la cual permite calcular los elementos necesarios para segmentar la imagen y ubicar el centroide, especificando sus coordenadas. Dado que la librería *CV2* no se encuentra directamente en Python, se instaló como se muestra en la Figura 12.

```
In [1]: pip install opencv-python
Requirement already satisfied: opencv-python in c:\users\sebas\anaconda3\lib\site-packages (4.5.5.64)
Requirement already satisfied: numpy>=1.19.3 in c:\users\sebas\anaconda3\lib\site-packages (from opencv-python) (1.20.3)
Note: you may need to restart the kernel to use updated packages.
```

Figura 12: Instalación de *Open – CV*, el cual contiene la librería *CV2*.

Posteriormente, se importaron las librerías necesarias para el código. Además de *CV2*, se importó *Matplotlib.pyplot* para las gráficas y *Numpy* para poder manejar los datos de forma cómoda. Esto se muestra en la Figura 13.

```
In [2]: import cv2
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
```

Figura 13: Importación de las librerías en el código.

Ahora, ya contando con las herramientas necesarias, es posible cargar la imagen que se va a tratar y mostrarla como se muestra en la Figura 14.

```
In [3]: # Load image
image = cv2.imread("img3.jpg")
# show original image
fig = plt.figure(figsize=(5,5))
plt.imshow(image)
plt.xticks([])
plt.yticks([])
```

Figura 14: Código para cargar las imágenes y mostrarlas.

Finalmente, al tener la imagen, es posible hacer el cálculo de los centroides. En primer lugar, se convierte la imagen en formato de escala de grises. Luego, se encuentran los bordes de la imagen y se calculan los momentos de la imagen de acuerdo a las fórmulas de un centroide. Ya contando con las coordenadas, se le ordena al programa dibujar un círculo en donde se encuentra localizado el centroide y, para terminar, se muestra de forma conjunta con la imagen original. Este método se muestra en la Figura 15.

```

In [4]: DPI = fig.get_dpi()
fig.set_size_inches(2400.0/float(DPI),1220.0/float(DPI))

In [5]: #convert it into grayscale image
gray_image = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

# find de edges of the original image
canny_edges = cv2.Canny(gray_image, 30, 200)

#calculate the moments of an image
H = cv2.moments(canny_edges)

#calculate de x,y coordinates of the center
cx = int(H['m10']/H['m00'])
cy = int(H['m01']/H['m00'])

# draw a circle at the center of the original image
circle = cv2.circle(image, (cx,cy), 5 , (0,0,0),-1)
cv2.putText(image, "centroid", (cx-25,cy-25), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.5, (0,0,0), 2)

fig = plt.figure(figsize=(5,5))
plt.imshow(image)
plt.xticks([])
plt.yticks([])

```

Figura 15: Método computacional para obtener el centroide y mostrar sus coordenadas en la imagen.

5.2. Obtención de imágenes

La obtención de imágenes fue realizada variando la distancia dada en pasos, de acuerdo a la especificación del programa computacional en el Laboratorio de Óptica Cuántica de la Universidad de los Andes. En la especificación del equipo se explica que la resolución del sistema está dada por,

$$\frac{360^\circ}{60 \cdot 200 \text{ pasos}} = \frac{0,03^\circ}{\text{paso}}. \quad (1)$$

Así, teniendo en cuenta que el código explicado anteriormente está realizado para el cálculo del centroide de los círculos y que, por ello, fue necesario usar una polarizador, la separación fue realizada en el intervalo de $[0, 24]$ pasos en pasos de 2 unidades. Es decir, la variación entre cada una de las imágenes es el equivalente a $0,06^\circ$. En las figuras mostradas a continuación es posible ver la separación entre los dos círculos de forma simultánea. Estas son imágenes ilustrativas únicamente del fenómeno físico.



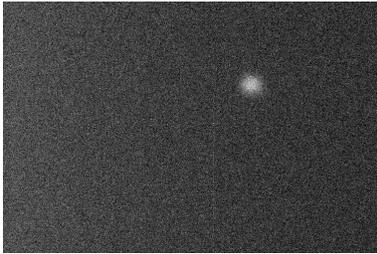
(a) Posición de los círculos en $d = 0$.



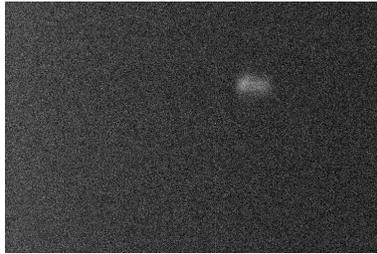
(b) Posición de los círculos en $d = 2$ pasos.



(c) Posición de los círculos en $d = 4$ pasos.



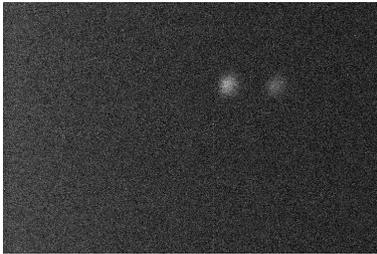
(d) Posición de los círculos en $d = 6$.



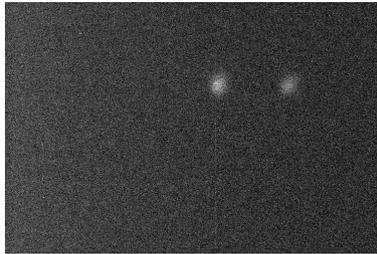
(e) Posición de los círculos en $d = 8$ pasos.



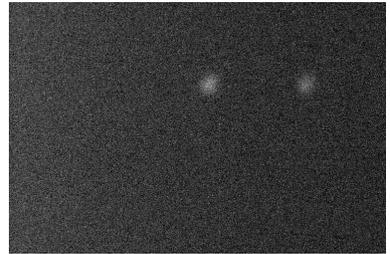
(f) Posición de los círculos en $d = 10$ pasos.



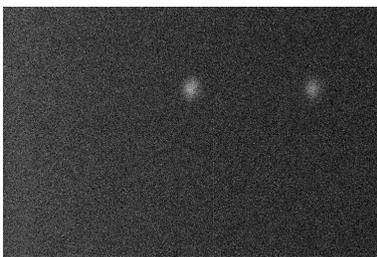
(g) Posición de los círculos en $d = 12$.



(h) Posición de los círculos en $d = 14$ pasos.



(i) Posición de los círculos en $d = 16$ pasos.



(j) Posición de los círculos en $d = 18$.



(k) Posición de los círculos en $d = 20$ pasos.



(l) Posición de los círculos en $d = 22$ pasos.



(a) Posición de los círculos en $d = 24$ pasos.

Ahora bien, para poder establecer la curva de calibración del dispositivo, fue necesario ver por separado los círculos y calcular sus centroides, debido a que al implementar el método del cálculo del centroides de forma conjunta, se incrementa la dificultad al tener la necesidad de segmentar la imagen. Por ello, a continuación se muestra de forma gráfica dos ejemplos para los círculos obtenidos al implementar el código.



(a) Ejemplo del cálculo de un centroide para un círculo con polarización de 90° .



(b) Ejemplo del cálculo de un centroide para un círculo con polarización de 0° .

Con ello, se obtuvieron los datos para cada uno de los círculos a cada una de las variaciones en los pasos. Como es evidente, cada uno de los pasos es equivalente a un cambio en los grados que se mueve la *PTBD*. Por lo tanto, al tener las coordenadas de los círculos por separado, es posible calcular la distancia entre ellos y generar la curva de calibración del equipo.

5.3. Curva de calibración

Finalmente, se realizó la curva de calibración del equipo. Esta curva de calibración se hace teniendo en cuenta la distancia entre cada una de las coordenadas de los centroides, para cada una de las polarizaciones. Gráficamente, este proceso de cálculo se muestra en el esquema de la Figura 19.

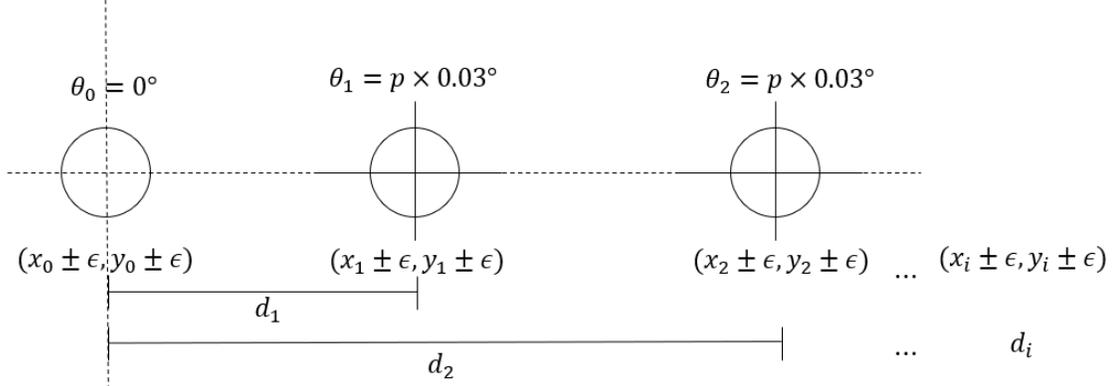


Figura 19: Método analítico para determinar la curva de calibración teniendo en cuenta las distancias de separación entre las coordenadas de los centroides. θ_i denota el ángulo que se gira la *PTBD* en cada una de las medidas. p denota los pasos que se dan en dicho giro y que tienen la equivalencia explicada anteriormente. (x_i, y_i) denota las coordenadas del centroide en cuestión y d_i es la distancia entre cada uno de ellos.

Con estas distancias y el ángulo de rotación de la *PTBD* en cada medida, es posible graficarlo como se muestra en la Figura 20. Sin embargo, es importante tener en cuenta que se implementó el método de mínimos cuadrados para poder hacer el ajuste lineal que presentan los datos. Una de las condiciones que se cumplen para poder implementar el método de mínimos cuadrados es tener al menos una muestra estadística de diez datos en las mismas condiciones experimentales. El método consiste en calcular los residuos de cada uno de los datos respecto a la recta de ajuste de los datos. Teniendo en cuenta cada una de las coordenadas de los centroides como (x, y) , la ecuación de la recta de ajuste es,

$$y = \left[\frac{N \sum_i x_i y_i - \sum_i x_i \sum_i y_i}{N \sum_i x_i^2 - (\sum_i x_i)^2} \right] x + \left[\frac{\sum_i y_i - m \sum_i x_i}{N} \right]. \quad (2)$$

Así, se ajustaron cada una de las tendencias encontrando la gráfica de calibración ajustada para la *PTBD*. La Figura 21 muestra dicha curva.

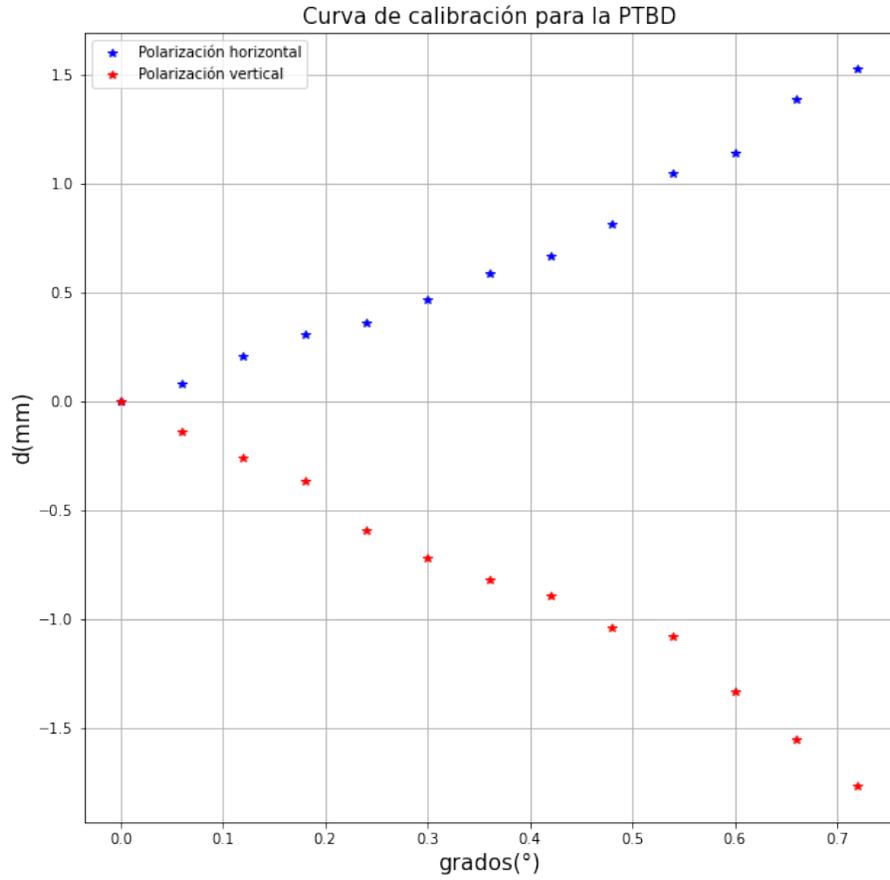


Figura 20: Datos de la curva de calibración para la *PTBD*. Es posible ver la tendencia que sigue cada una de las polarizaciones. En el caso de la polarización horizontal, se tiene una tendencia ascendente y en el caso de la polarización virtual, se tiene una tendencia descendente.

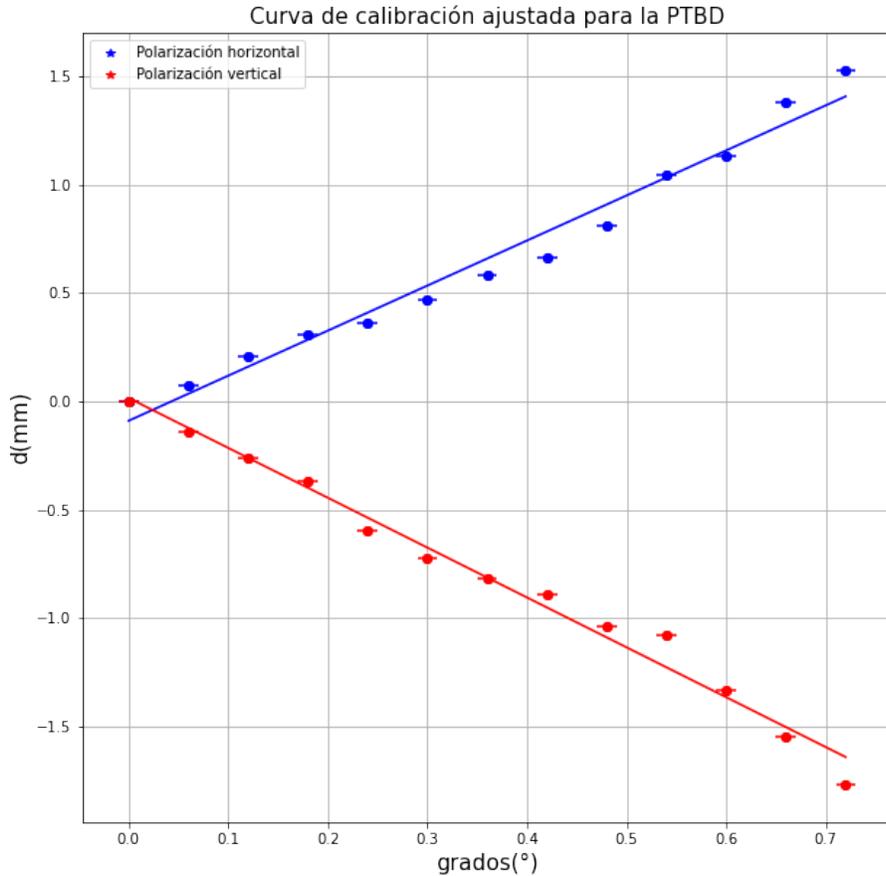


Figura 21: Curva de calibración ajustada para la *PTBD*. Nuevamente, es posible ver la tendencia que sigue cada una de las polarizaciones. En el caso de la polarización horizontal, se tiene una tendencia ascendente y en el caso de la polarización virtual, se tiene una tendencia descendente.

De acuerdo a la gráfica obtenida, es posible analizar que se tiene una separación por polarización del haz infrarrojo utilizado de acuerdo al funcionamiento de una *PTBD*. Principalmente, esto puede deberse a que a medida que se aumenta el ángulo de rotación del equipo, la separación entre los máximos de intensidad en ambas polarizaciones es también mayor. Por otro lado, se podría pensar que no existe una separación adecuada al rotar el equipo y mover conjuntamente los espejos y el *PBS*. Sin embargo, una prueba de que el funcionamiento fue adecuado es que a los ángulos que se rota, se logran ver las imágenes mostradas anteriormente y que, al incluir el polarizador en el montaje experimental, es posible ver, bien sea el máximo asociado a la polarización vertical, o el máximo de la polarización horizontal. Una de las variables experimentales que fue difícil de controlar es que al rotar la *PTBD*, se tenía cierta inercia en el equipo que podía hacer que los máximos que se encontraban a cierta distancia, terminaran en distancias distintas. Para poder mitigar este efecto, la rotación de la *PTBD* se hizo lentamente mediante el software al cual se conectaba el equipo.

6 Conclusiones

Entre las conclusiones principales del proyecto, es posible decir que se comprendió cómo es el funcionamiento de un separador de haces por polarización, recalcando la importancia en experimentos en Óptica Cuántica como lo es la interferencia de dos fotones. Reconociendo su importancia, la *PTBD* fue estudiada para separar un haz infrarrojo por polarización, encontrando una curva de calibración análoga a las reportadas en literatura. Se logró ver de forma experimental la separación y las imágenes, las cuales corroboraban el funcionamiento de un separador de haces por polarización. Como trabajo futuro para este proyecto, se podría analizar hasta qué distancia se puede tener un funcionamiento óptimo en la separación de un haz y si esta distancia puede llegar a tener una variación en el tipo de haz que se está utilizando.

Bibliografía

- [1] L. J. Salazar Serrano, A. Valencia and J.P. Torres "Tuneable beam displacer", Review of Scientific Instruments, vol 86, 2015.
- [2] J. Flórez, J. Álvarez, O. Calderón Losada, L.J. Salazar-Serrano and A. Valencia, "Interference of two pulse-like spatial beams with arbitrary transverse separation", Journal of Optics, vol 18, 2016.
- [3] O. Calderón Losada. "Controlling correlations of paired photons for fundamental physics and application in quantum imaging and generation of heralded single photons". Tesis doctoral, Universidad de los Andes, 2019.
- [4] L.J. Salazar Serrano, D. Guzmán, A. Valencia and J.P. Torres "Demonstration of a highly-sensitive tunable beam displacer with no use of beam deflection based on the concept of weak value amplification", Optics Express, vol 23, 2015.

Firma del Director