



**Formato de Presentación de Informes para emisión de paz y salvos
de Asistencias Intersemestrales (Junio-Julio 2023)**

Fecha de entrega: Septiembre 2023

1. Nombre del estudiante y código:

Miguel Ángel Gonzalez Jaimes - 201817559

2. Programa de posgrado al que pertenece:

Maestría en Ciencias - Física

3. Nombre del profesor asesor:

Alejandra Catalina Valencia Gonzalez

4. Título de la propuesta:

Generación, control y detección de fotones para su uso en interferencia multifotónica

5. Objetivos propuestos:

- Generar una fuente de pares de fotones con polarizaciones perpendiculares.

Resultados: Se caracterizó una fuente de pares de fotones individuales con polarizaciones ortogonales y se obtuvo la función de correlación a segundo orden $G^2(\tau)$ en tiempo para la misma. Lo anterior se realizó de dos formas diferentes: acoplando la fuente directamente a los detectores y empleando el modo de colección de un par de rasterizadores.

- Implementar un sistema de control de caminos para manipular los fotones que entran a un divisor de haces.

Resultados: Se implementó y alineó un separador de haces sintonizable ó PTBD, por sus siglas en inglés (“Polarizing tunable beam displacer”). Este dispositivo permite separar un haz en dos haces paralelos donde cada haz resultante es la componente vertical u horizontal del haz inicial. Esta separación se puede controlar en torno al ángulo de rotación de dos espejos a la salida de las caras de un PBS. De esta forma se caracterizó la separación de cada componente de polarización para diferentes ángulos.

- Montar un sistema de detección que permitan medir la función de correlación espacial de segundo orden.

Resultados: Se implementó un sistema de rasterizado a la salida de un divisor de haces y se montó un camino adicional con el fin de evaluar las correlaciones espaciales por medio de un sistema $2f$ con $f = 500\text{mm}$. Se alinearon los rasterizadores y se realizaron tanto medidas de la función de correlación $G^2(\tau)$ como de la cantidad de eventos incidentes en cada detector. Se fijó un modo de resolución espacial de $50\mu\text{m}$. Las medidas obtenidas permiten afirmar que los pares de fotones empleados no están correlacionados espacialmente.

6. Resultados encontrados:

La fuente utilizada consiste de un láser CW con $\lambda_p = 407\text{nm}$ y $P = 155.1\text{mW}$. Este haz es enfocado a un cristal BBO Tipo II en una configuración colineal por medio de un lente con $f = 100\text{mm}$. Ya que los pares generados tienen una longitud de onda diferente al haz de bombeo, se sitúan varios filtros

posterior al cristal con tal de remover el bombeo y que este no afecte la medida de coincidencias. Ya que la fuente empleada está instalada en una mesa diferente a la de los detectores, los fotones se acoplan a una fibra single-mode. El otro extremo de la fibra se coloca en un conector de fibras de manera que se pueda "enchufar" en diferentes montajes según sea necesario. Con tal de medir la función de correlación $G^2(\tau)$, inicialmente se conectó la fibra a una fibra-PBS. Esta última presenta dos salidas ya que separa los fotones con base a su polarización. Debido a que el BBO utilizado es Tipo II, esta sería la manera más directa de acoplar los fotones a los detectores si se han de enviar por una fibra. Como se ve en la Fig. 1, cada salida de la fibra-PBS fue conectada a un detector contador de fotones individuales.

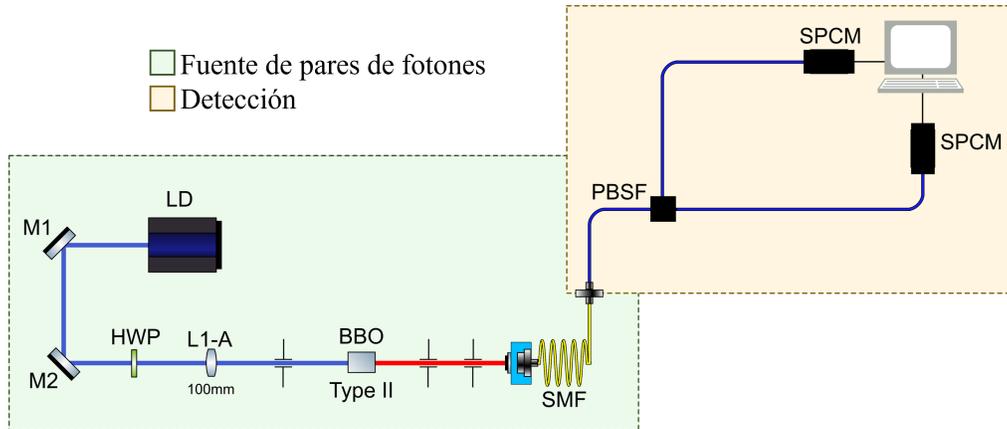


Figure 1: Montaje empleado para la medición de $G^2(\tau)$. Se denotan las secciones principales del montaje en un color distinto.

De igual manera, como se ve en la Fig. 2, se conectó la fibra a un montaje diseñado para estudiar la interferencia de fotones individuales con base en sus variables espaciales. No obstante, no se realizaron medidas de interferencia como tal por lo que se usó un espejo abatible (M3) para enviar los haces por un camino alternativo a un divisor de haces (BS). A lo largo del camino, se implementó un lente (L2-B) con $f = 500\text{mm}$ para definir el modo de colección de los rasterizadores a las salidas del BS. Estos rasterizadores se conectaron a su vez a los detectores.

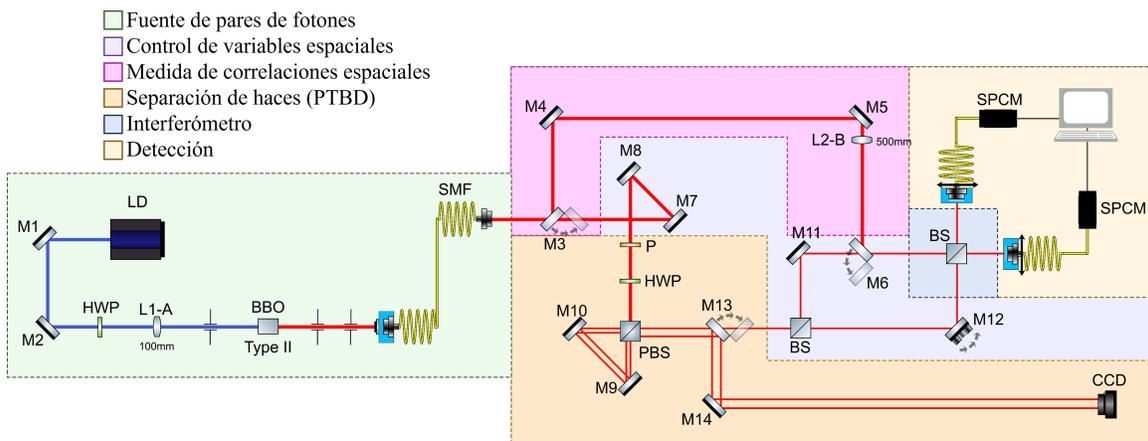


Figure 2: Montaje empleado para la medición de $G^2(\tau)$, control de caminos y sistema de detección con rasterizado espacial. Se denotan las secciones principales del montaje en un color distinto.

Siendo así, al realizar la medida de coincidencias de los contadores por medio de un Time-to-Digital-

Converter, se esperaría que la $G^2(\tau)$ presentase el comportamiento correspondiente a una Gaussiana acorde a la ecuación

$$\text{Coinc}(x) = \frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] + C, \quad (1)$$

donde A es una constante de proporcionalidad, μ es el valor esperado de la distribución, C es un offset que en este caso se puede interpretar como ruido y σ es la desviación estándar de la distribución. Teniendo esto en cuenta, se puede ver los resultados hallados en la Fig. 3.

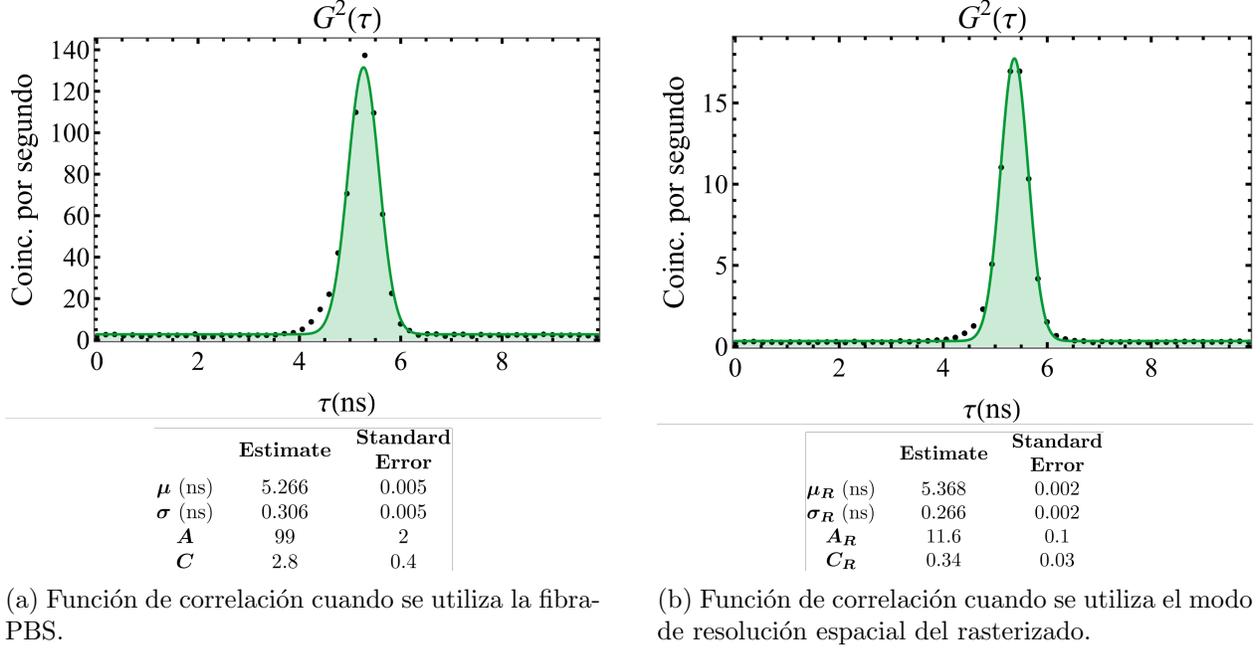


Figure 3: Coincidencias temporales para los pares de fotones. Los puntos representan los datos obtenidos experimentalmente y la línea continua representa el ajuste realizado. Los parámetros de este último se denotan bajo cada gráfica.

Ya obtenida la función de correlación con la fibra-PBS, con el fin de confirmar que, en efecto, se tenían pares de fotones, se procedió a montar y alinear el sistema de detección con rasterizado. Para esto se situaron dos rasterizadores a la salida del BS visto en la Fig. 2. Los rasterizadores son monturas KX6 conectadas a motores en el eje vertical y horizontal, por lo que el procedimiento para alinearlos fue el siguiente: Primero, se conectó una fuente láser CW de $\lambda = 805\text{nm}$ a la entrada del montaje y se bajaron los espejos M3 y M6 con tal de que esta pasara por un interferómetro de Mach-Zehnder que ya había sido previamente alineado con luz blanca. Se encajó un espejo con un iris en la entrada de cada rasterizador y con la ayuda de un Power Meter se verificó que el haz llegara al centro de cada entrada. Esto se corrigió en lo posible por medio de los motores. Posteriormente, se conectó la fuente láser al reverso de cada rasterizador de manera que se alineara en reversa y se aseguró que el haz saliera por la fibra monomodo corrigiendo con los grados de libertad del KX6 y la posición xy del lente del rasterizador. Luego, usando filtros de densidad neutra $ND = 12.0$, se manda el haz por el interferómetro una vez más y se conectan los rasterizadores a los detectores. En este caso, se optimizan los conteos en cada brazo con los grados de libertad del KX6 y desplazándose ligeramente con los motores. Cuando se tiene el número máximo de conteos, se conecta la fuente SPDC, se retiran los filtros de densidad neutra y una vez más se optimizan los conteos. En este punto, se suben los espejos M3 y M6 y se colocó el lente L2-B con $f = 500\text{mm}$ para formar el

sistema $2f$. Este sistema se utiliza para realizar una medida de las correlaciones en las variables de momento transversal en el plano de medida. El modo de colección se define entonces por la lente del rasterizado, con lo que se tuvo una resolución de $w_r = 50\mu\text{m}$. Ya que los rasterizadores estaban alineados, se optimizaron los conteos con los grados de libertad de los espejos M5 y M6. En la Fig. 3b se puede ver los resultados para la medida de coincidencias para la resolución espacial que se tuvo. Una vez se optimizaron las coincidencias, se realizó una medida de rasterizado en la que se mueve cada detector en la dirección espacial y de forma que para cada par de coordenadas (Y_A, Y_B) se miden tanto eventos individuales (singles) como coincidencias durante un intervalo de tiempo determinado. En este caso, se movieron los detectores en un intervalo de $(-0.75\text{mm}, 0.75\text{mm})$ con pasos de 0.025mm y un tiempo de medida de 6s. Los resultados obtenidos se pueden ver en la Fig. 4.

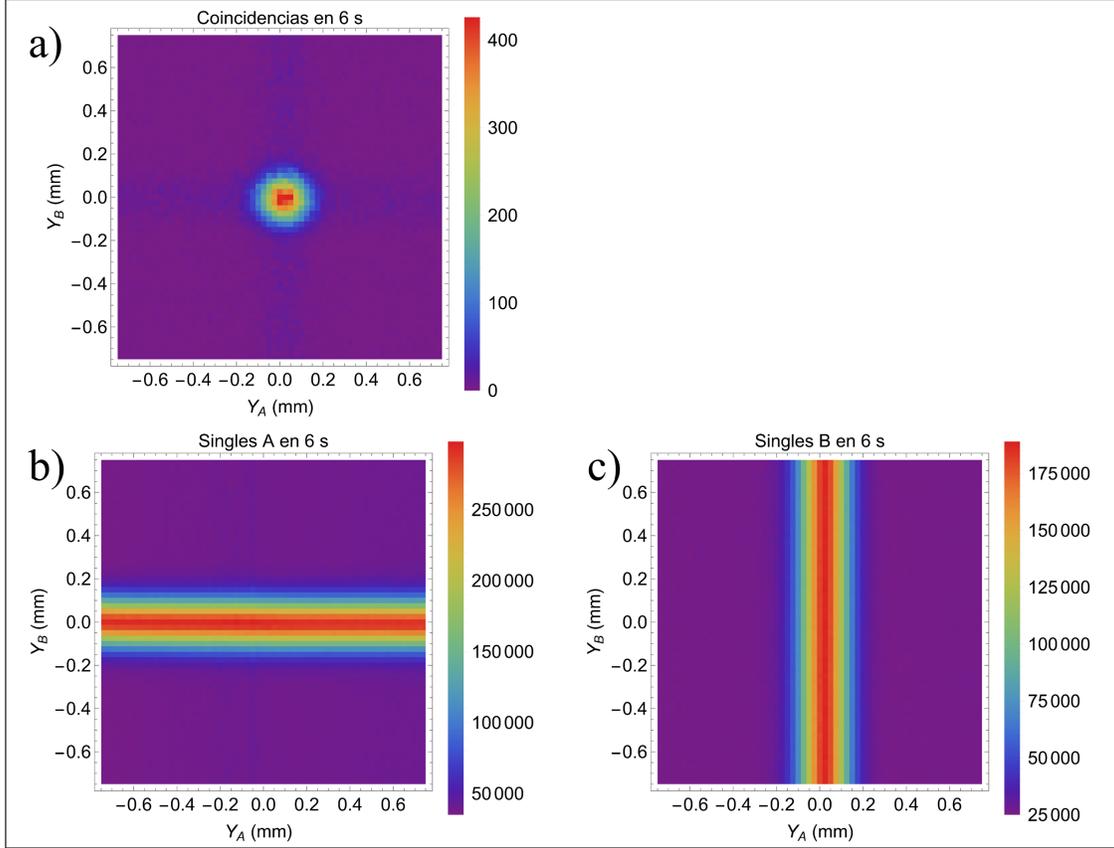


Figure 4: **a)** Gráfica de densidad para la función espacial de fotones no-correlacionados en el sistema $2f$. **b)** Gráfica de densidad para los conteos del detector A en el sistema $2f$. **c)** Gráfica de densidad para los conteos del detector B en el sistema $2f$.

Ahora bien, los datos representados en la Fig. 4 a corresponden a lo que se denomina la Mode Function Intensity (MFI), la cual está relacionada con la probabilidad conjunta de detectar pares de fotones con momento transversal q_s y q_i en alguna posición determinada desde la fuente SPDC. Se realizó un ajuste a la MFI correspondiente a una función Gaussiana multivariable de la forma

$$S = \mathcal{N} \exp \left[-\frac{1}{2} (C_{11}(Y_A - Y_{0A})^2 + 2C_{12}(Y_A - Y_{0A})(Y_B - Y_{0B}) + C_{22}(Y_B - Y_{0B})^2) \right], \quad (2)$$

donde \mathcal{N} es una constante de proporcionalidad, $\{Y_{0A}, Y_{0B}\}$ son los centros de la distribución con respecto a cada eje y los valores C_{mn} son los elementos correspondientes a la inversa de la matriz de

covarianza Σ tal que $C_{12} = C_{21}$. Estos últimos valores permiten calcular el coeficiente de correlación espacial

$$\kappa = \frac{C_{12}}{\sqrt{C_{11}C_{22}}}. \quad (3)$$

Los resultados obtenidos para el ajuste se pueden ver en la Fig. 5

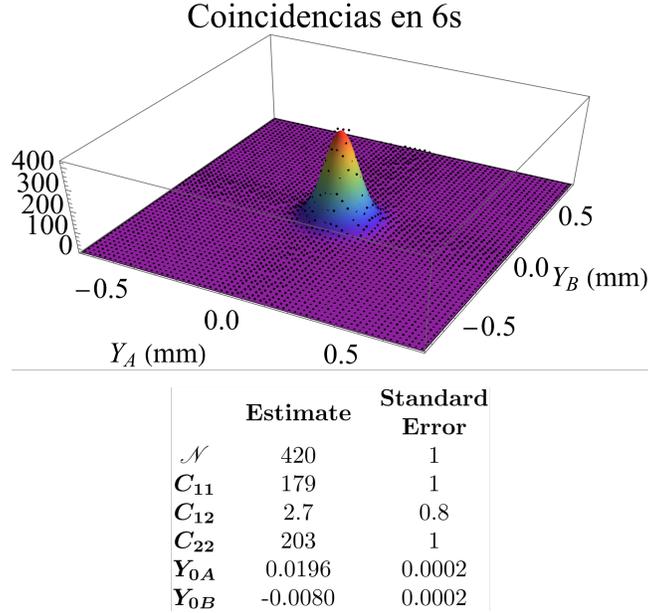
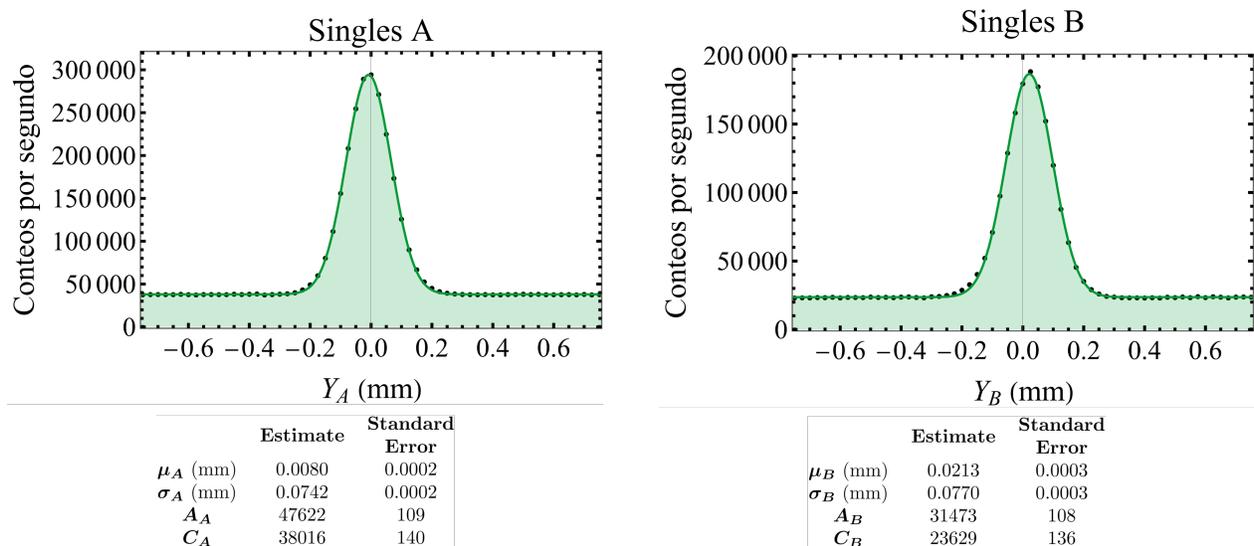


Figure 5: Gráfica 3D para la MFI. Los puntos representan los datos obtenidos experimentalmente y la función de color representa el ajuste realizado. Los parámetros de este último se denotan bajo la gráfica.

Con los parámetros dados, se calculó un grado de correlación $\kappa_{\text{fit}} = 0.014 \pm 0.004$, por lo que se puede concluir que la correlación de los fotones es mínima. Con el fin de caracterizar la fuente, se tomaron los perfiles transversales de los Singles, como se ve en la Fig. 6, y el perfil transversal de las coincidencias en función de Y_A para un valor fijo de $Y_B = 0$, como se ve en la Fig. 7.

Empleando la Ec. 1, se tiene que se puede vincular el waist del haz w_0 con la desviación de la distribución como $w_0 = 2\sigma$. De esta forma, con los datos hallados se puede establecer que $w_{0A} = (148.4 \pm 0.4) \mu\text{m}$, $w_{0B} = (154.2 \pm 0.6) \mu\text{m}$ y $w_{0\text{Coinc}} = (140 \pm 1) \mu\text{m}$. Por otro lado, también se construyó e implementó un desplazador de haces sintonizable. Para realizar lo anterior, se bajó el espejo M3 y se empleó una fuente de láser CW que pasa por M7 y M8 tal que esta llega al segmento de la PTBD. Con el fin de preparar el estado de polarización del haz incidente, se instaló un polarizador y una lámina de media onda con tal de controlar la proporción de las componentes horizontal y vertical. Una vez el haz está en el estado deseado, este incide en un Polarizing Beam-Splitter (PBS), el cual es un divisor de haz en el que la luz polarizada horizontalmente es transmitida mientras que la luz polarizada verticalmente es reflejada. El PBS se sitúa en una montura fija tal que a sus salidas se colocan dos espejos. Estos espejos están montados sobre una base rotatoria en la que se puede controlar el ángulo de rotación (θ) respecto al centro del PBS por medio de una distancia dada en un intervalo d de pasos, con lo que se obtiene una resolución de $0.03^\circ/\text{paso}$. Como se ve en la Fig. 8, conforme se rotan los espejos, se introduce una separación en las componentes de polarización del haz.

En primer lugar, se alinearon los espejos sin el PBS en su lugar. Posteriormente, se fijó el motor de la base de forma que θ se mantuviese en un punto “cero”. Luego, se colocó el PBS de tal forma



(a) Conteos en el detector A como función de su posición para $Y_B = 0$.

(b) Conteos en el detector B como función de su posición para $Y_A = 0$.

Figure 6: Singles para los detectores A y B. Los puntos representan los datos obtenidos experimentalmente y la línea continua representa el ajuste realizado. Los parámetros de este último se denotan bajo cada gráfica.

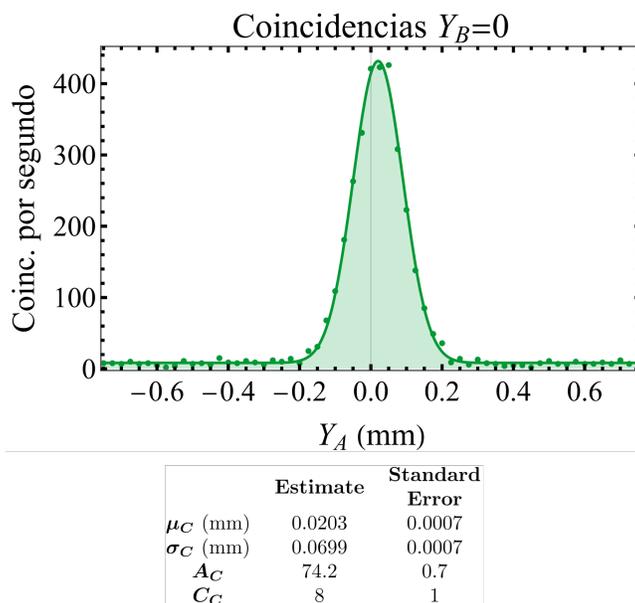


Figure 7: Conteo de coincidencias espaciales como función de Y_A . Los puntos representan los datos obtenidos experimentalmente y la línea continua representa el ajuste realizado. Los parámetros de este último se denotan bajo la gráfica.

que el láser incidiese sobre el centro de la cara del PBS y se ajusto su posición y rotación tal que los dos haces de salida incidieran sobre el mismo punto en cada punto. Con tal de evaluar con más detenimiento la separación de los haces, se creó un camino alterno con un espejo abatible M13 y M14 con tal de enviar los haces a una cámara CCD. En la Fig. 9, se puede ver un ejemplo de como se denota la separación de diferentes polarizaciones en la cámara CCD para una serie de pasos arbitraria. Se logra “aislar” la polarización del haz por medio de la lámina de media onda previa a

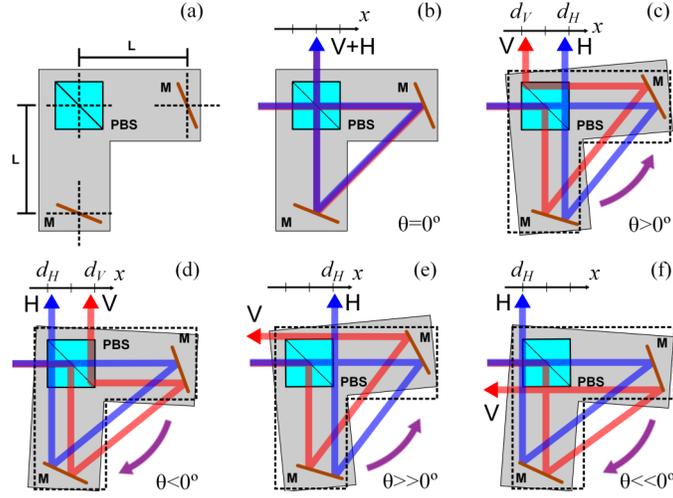


Figure 8: Descripción geométrica de la PTBD para diferentes ángulos de rotación. Imagen tomada de [1]

la PTBD.

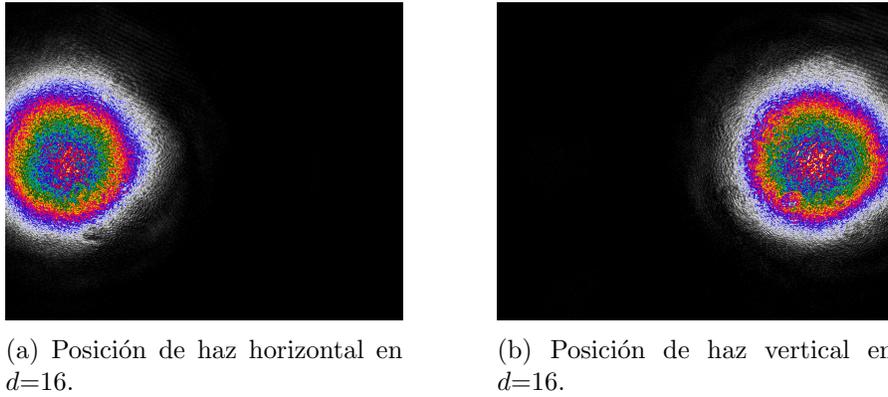


Figure 9: Variación de la posición de los haces con respecto a su polarización para $d = 16$.

Siendo así, teniendo que para el modelo de la cámara empleada, la altura y ancho de cada píxel representan $4.65\mu\text{m}$, se realizó una caracterización de la separación en función del ángulo. Para lo anterior, se fijó la cámara a 97.5cm de la PTBD y se tomaron imágenes para el rango $[0, 24]$ pasos en saltos de 2 pasos por imagen. De esta forma, se tiene que cada imagen presentaría una diferencia de 0.06° . En la Fig. 10, se ilustra como se registran estas variaciones en la cámara para la mitad de los pasos tomados.

En este caso, se obtuvo el perfil de intensidad de cada imagen para cada componente de polarización aislada, como se denota en la Fig 9. Lo anterior se hizo realizando una sumatoria de los valores de intensidad en el eje vertical para cada píxel horizontal. Ya que este perfil de intensidad sigue una distribución Gaussiana, se realizó un ajuste correspondiente a la Ec. 1. En cada caso, solo se tomó en cuenta el valor μ para cada componente de polarización en un grado determinado ya que este determina el centro de la distribución y, por ende, el centro del haz. Con esto en cuenta, se definió el eje positivo de la separación hacia la “derecha” de las imágenes tomadas. Ahora bien, esta separación obedecería un comportamiento lineal de la forma $y = mx + b$. Tomando estos datos, se obtuvo una curva de calibración para la PTBD, como se puede ver en la Fig. 11, en la que cada componente de polarización sigue un comportamiento aproximadamente lineal. Siendo así, se puede notar una variación simultánea con respecto al ajuste para ambas polarizaciones. Lo anterior se

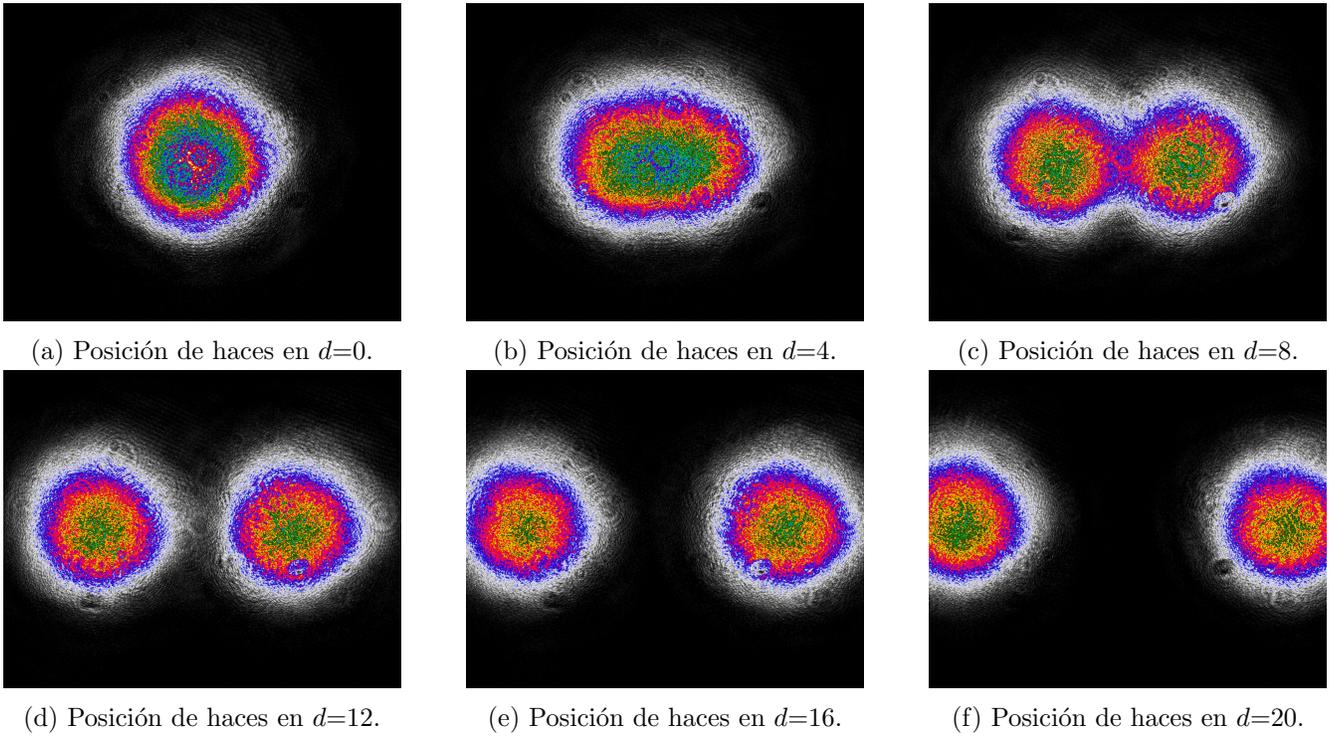


Figure 10: Variación de la posición de los haces con respecto a pasos dados en la PTBD. Solo se representa la mitad de las imágenes tomadas.

podría explicar debido a que la base utilizada para la PTBD presentaba un cierto “backlash” a la hora de desplazarse, por lo que aún se pueden realizar mejoras con respecto a esta calibración.

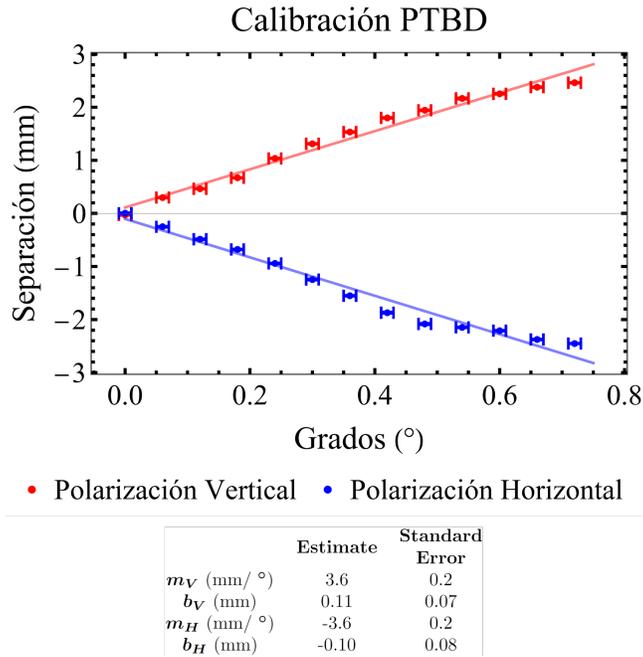


Figure 11: Curva de calibración ajustada para la PTBD. Los puntos representan los datos obtenidos experimentalmente y la línea continua representa el ajuste realizado. Los parámetros de este último se denotan bajo la gráfica.

Firma del Estudiante

Vo.Bo. del profesor asesor

Alejandra Valencia

References

- [1] Luis José Salazar-Serrano, Alejandra Valencia, and Juan P. Torres. “Tunable beam displacer”. In: *Frontiers in Optics 2014*. Optica Publishing Group, 2014.