

# Caracterización teórica y experimental de la luz producida por un cristal PPKTP

Cesar D. Millan V.

(Dated: Agosto 28 de 2017)

El siguiente es un trabajo realizado en el periodo intersemestral (2017) en el laboratorio de Óptica Cuántica en la Universidad de los Andes. El objetivo contempla la caracterización de la luz producida por un cristal PPKTP (PERIODICALLY POLED KTP). Se estudia el comportamiento de la luz emitida por el cristal en rangos de temperatura de 20 °C a 60 °C. Se miden valores de correlaciones temporales.

## I. Introducción

El trabajo con fotones altamente correlacionados ha permitido el desarrollo de tecnologías tales como la comunicación cuántica y la computación cuántica entre otras aplicaciones[1]. Por tanto se hace esencial la implementación de una fuente que permita la generación de dichos fotones. En la construcción de fuentes se hace comúnmente uso de cristales, que en un proceso denominado SPDC (Spontaneous Parametric Down-Conversion) generan un par de fotones. Entre el diverso número de cristales se encuentran el BBO (Beta Barium Borate)[2], KDP (Potassium Dihydrogen Phosphate) [3]. Durante los últimos años se han venido implementado fuentes de alto brillo que hacen uso de cristales periódicamente polarizados como el PPKTP [4],[5].

En el laboratorio de Óptica Cuántica de la Universidad de los Andes estamos interesados en la implementación de una fuente de pares de fotones a partir de un cristal periódicamente polarizado de KTP. Por tanto, el propósito de este trabajo establece la medición de correlaciones temporales y espaciales de la luz SPDC producida por un cristal PPKTP al ser bombeado con luz láser.

De esta manera, en lo que sigue de este trabajo se presentara: En la sección II una descripción de los cristales periódicamente polarizados y la configuración geométrica (lineal o no colineal) de la luz SPDC. También se habla del espectro de la luz SPDC generada por el cristal. En la sección III. se tratara el montaje experimental y se comentaran resultados del estudio del cristal, . De la misma manera se presenta mediciones del espectro y las medidas de correlación temporal.

## II. Marco teórico

### II. a Cristales periódicamente Polarizados

Un cristal periódicamente polarizado es un cristal que se le manipula en su dominio ferroeléctrico causando una inversión en su polarización y que es construido en una estructura periódica espacial [6]. La polarización se induce en la dirección de mayor coeficiente de no linealidad. Las longitudes de periodicidad espacial  $\Lambda$  se encuentran al rededor de unos cuantos micrones y hasta los 10 micrones dependiendo de la aplicación y la estructura completa

a partir de los 30mm.[7]. Estos cristales periódicamente polarizado se construyen en diferentes composiciones tales como niobato de litio conocido como PPNL[8] y en titanilfosfato de potasio conocido como PPKTP, entre otros.

#### II a. 1. Tipos de cristales.

Durante el proceso SPDC un foton del bombeo que llega al cristal tiene una probabilidad de generar un par de fotones de menor frecuencia (par conocido como *idler* y *signal*) [9]. Dependiendo de la dirección de polarización del par producido los cristales pueden clasificarse en *tipo-0* producirá el par con dirección de polarización de la luz de bombeo. El cristal *tipo-I* producirá el par con polarización en dirección perpendicular a la de bombeo. Y el cristal *tipo-II* producirá el par, uno con dirección de polarización y otro perpendicular al de bombeo.

#### II a. 2. Configuración colineal y no colineal .

Después de ser bombeado, el par de fotones generados en el cristal se presentan formando un par de conos coaxiales[9]. Esta forma característica resulta cumplir las condiciones de PM (phase matching) o QPM (quasi phase matching) en el caso de cristales periódicamente polarizados. Las condiciones de PM y QPM son condiciones de conservación de energía y momentum[10]. Cada cono en su sección transversal formara una circunferencia con cierta polarización, dependiente del tipo de cristal (Fig 1). A la anterior configuración geométrica que se presenta se le conoce como configuración *no colineal*.

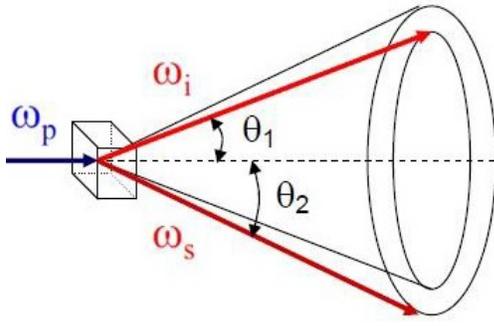


Figura 1: Configuración no colineal del par producido por SPDC en un cristal tomada de [9]

En otro caso es posible hacer que estos dos haces mediante una variación de parámetros se encuentren en un solo haz, conocida como configuración *colineal*. El parámetro manipulable en caso de cristales periódicamente polarizados es su longitud en periodo  $\Lambda$ , que se maneja por cambios de temperatura.

## II. b Espectro de la luz generada por un PPKTP

El espectro de emisión de un cristal PPKTP presentará dos picos de igual intensidad para dos longitudes de onda diferentes, con ancho espectral de  $\approx 5nm$ . Un solo valor de intensidad para el par degenerado con ancho de espectro de  $\approx 20nm$  [11].

## III. Montaje experimental y resultados

El cristal usado se solicitó a Raicol Crystal con especificaciones particulares: Cristal para OPO (Optical Parametric Oscillator), tipo II, periodo de polarización de 10micras y con salidas colineales. Este cristal cuenta con un horno que permite variaciones de temperatura entre  $20^{\circ}C$  y  $60^{\circ}C$ . El cristal es bombeado con luz láser de  $404.532nm$

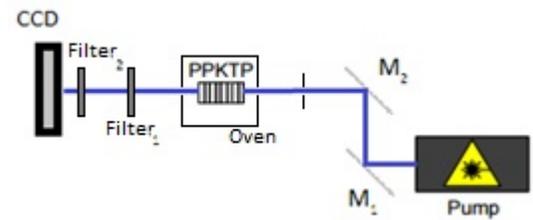
### III. a Estudio experimental del cristal PPKTP del laboratorio de Óptica Cuántica de la Universidad de los Andes

A continuación se presenta un estudio experimental del cristal, donde se considera su espectro espacial, su comportamiento en tipo, su colinealidad, el espectro y se miden coincidencias

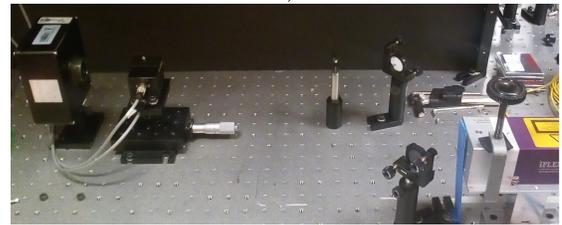
#### III. a. 1 Tipo de cristal

La caracterización se inició con la determinación de la forma espacial de la luz producida. Para tal fin se bom-

beo el cristal directamente con un haz láser de longitud de onda de  $404,532nm$ , un radio de haz o "waist" de  $570\mu m$  y una potencia de  $32mW$ . La temperatura del cristal se estableció a  $20^{\circ}C$  por medio del horno. El perfil espacial se capturo con una cámara CCD (Charge Coupled Device) y filtros pasa altas ( $> 710nm$ ) y pasa bandas ( $810 \pm 1nm$ ). (Fig 1.) .



a)



b)

Figura 2: Primer montaje para la obtención del perfil espacial de luz a) Esquema. Pump: Laser,  $M_1$  y  $M_2$ : Espejos, Oven: Horno, PPKTP: Cristal, Filter<sub>1</sub>: Filtro pasa altas, Filter<sub>2</sub>: Filtro pasa bandas, CCD: Cámara. b) Imagen del montaje.

Las formas registradas por la cámara CCD correspondían a una fracción del haz de láser (Fig 2 a)) que entra en la cavidad donde se aloja el cristal (Fig 2 b)) y que tiene sección transversal de dimensiones de  $1mm^2$  con la tapa cubre cristal.

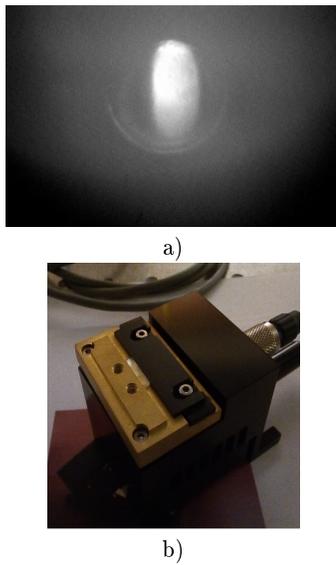


Figura 3: a) Perfil espacial del haz de salida obtenida por medio de CCD, a partir de un bombeo directo al cristal. b) Horno controlador de temperatura con cristal, el lugar donde se aloja el cristal tiene una sección trasversal de  $1\text{mm}^2$

De esta manera se determina que es necesario cambiar el tamaño del waist del haz, para garantizar que este se encontrara dentro de la sección trasversal del cristal. El tamaño de waist para el haz se considero de  $200\mu\text{m}$ , logrado a través de un lente plano convexo de longitud focal de  $200\text{mm}$ . Se implemento una plataforma al horno que tuviera dos grados de libertad (horizontal y vertical). Y la luz de salida (desde el cristal) fue enfocada con un lente plano convexo de  $35\text{mm}$  (Fig 3).

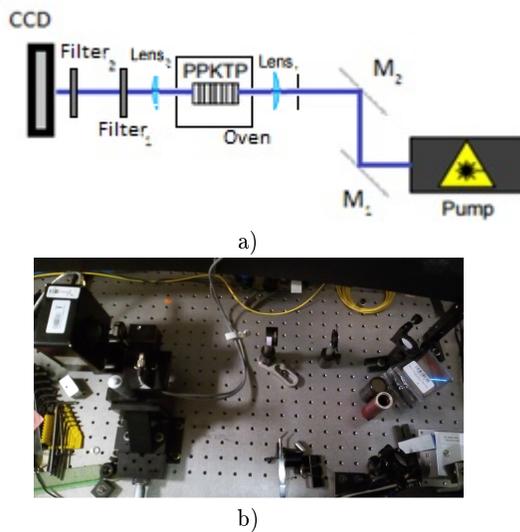


Figura 4: Montaje para la obtención del perfil espacial de luz a) Esqueme. Pump: Laser,  $M_1$  y  $M_2$ : Espejos,  $Lens_1$  y  $Lens_2$ : Lentes plano convexas, Oven: Horno, PPKTP: Cristal,  $Filter_1$ : Filtro pasa altas,  $Filter_2$ : Filtro pasa bandas, CCD: Cámara. b) Imagen del montaje.

Debido similares especificaciones del cristal con [10], se estabilizo la temperatura de operación del horno (por tanto la del cristal) en  $40^\circ\text{C}$ . Posteriormente también se disminuyo la potencia de haz de bombeo a  $3.2\text{mW}$ , a través de un lente de densidad neutra (no presente en el esquema). La luz obtenida presento patrones circulares, tales como los reportados en [6] (Fig. 4).

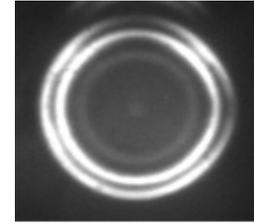


Figura 5: Anillos de luz SPDC en salida del cristal a  $40^\circ\text{C}$  a una potencia de  $32\text{mW}$

Se deseaba observar la característica del cristal ser tipo II. Se inicio caracterizando la polarización del bombeo, con un polarizado y un powermeter se determino que este posee una polarización vertical. Se observo que la potencia de  $3.2\text{mW}$  disminuía después de pasar por el lente de  $200\text{mm}$  y el polarizador a  $1.7\text{mW}$

Ademas observar el comportamiento de la polarización de la luz con la que se bombea el cristal. Así se instalo un lamina de media onda (Half Wave Plate) que permitiera rotar la dirección de polarización de haz de bombeo (Fig 6.).

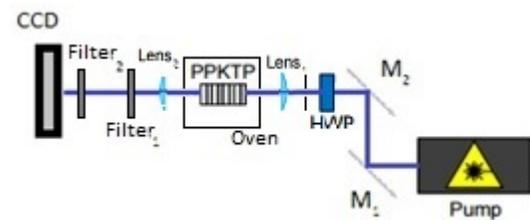


Figura 6: Posición de la HWP en el montaje, elemento para rotar la polarización de bombeo

Con potencia de bombeo a  $3.2\text{mW}$  y temperatura de  $40^\circ\text{C}$ , se roto la polarización de bombeo en  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ . Observándose que luz SPDC se genera cuando se bombea con polarización vertical, en este caso la polarización de bombeo. En la Figura 7 se observa como desaparece la luz SPDC a medida que se rota la polarización (téngase en cuenta que al rotar la HWP en un ángulo  $\alpha$  la polarización rota en  $2\alpha$ )

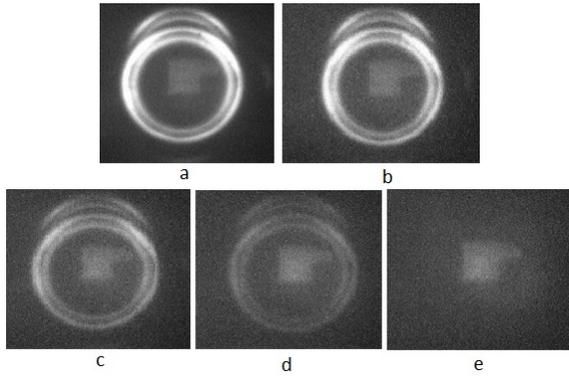


Figura 7: Luz obtenida del cristal con polarización de bombeo a HWP rotada a a) 0°, b) 10°, c) 22.5°, d) 30°, e) 45°

Ahora el polarizador se desplaza a la posición de la luz de salida del cristal, después del lente de 35mm (Fig 6).



Figura 8: Ubicación del polarizador en el montaje para determinar la polarización de luz SPDC

El polarizador fue rotado desde la dirección de polarización de bombeo y hasta a los 90°. La Figura 8. muestra la imagen de luz obtenida después del polarizador con la dirección de polarización de bombeo. Sin embargo al rotar el polarizador a 90°, esta luz desaparece. Lo que nos lleva a concluir que el cristal comporta como tipo-0 a este valor de temperatura y en configuración no colineal.

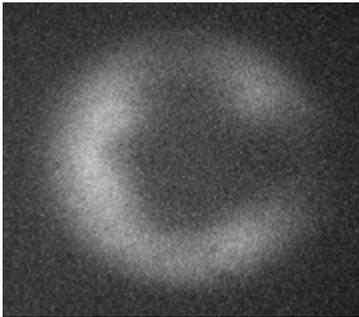


Figura 9: Luz SPDC con polarizador en orientación vertical

### III. a.2 Colinealidad del cristal PPKTP

Ya que a los 40°C que se habían considerado ( ver III.a. 1) no se logra una configuración colineal, se realizarán

tomas de la luz SPDC a diferentes temperaturas como en la figura 10.

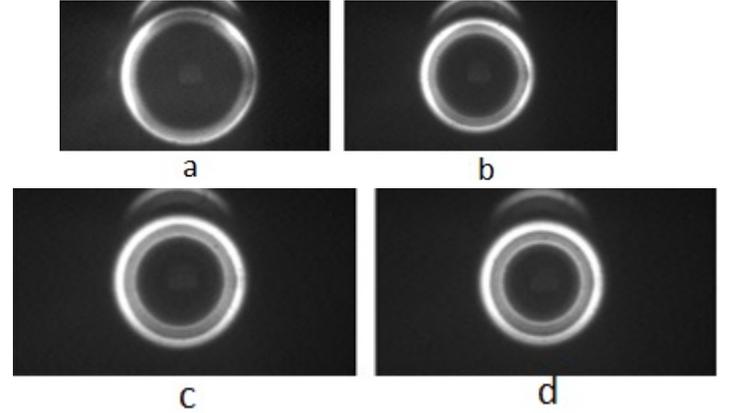


Figura 10: Diámetro en función de la temperatura a) 20°C, b) 46°C, c) 55°C y d) 60°C

La cámara CCD fue ubicada a 1 distancia focal del lente plano convexo de 35mm. Tomando los pixeles mas brillantes sobre el diámetro de los anillos y con la relación de  $9 \times 10^{-6} m/pixel$  se obtuvo la tabla que se presenta en el cuadro 1. Donde se relaciona la variación del diámetro de los anillos de luz SPDC y el ángulo  $\theta$  en función de la temperatura. (Donde  $\theta$  es ángulo que se forma desde el centro del anillo a un punto sobre la circunferencia, ver Fig 1).

(T±0.01) °C	(P1 ± 1) Núm. Pixel	(P2 ± 1) Núm. Pixel	(Diam ± 0,01) E- 03 m	(Radio ± 0,01) E- 03 m	tan $\theta$ ± 0,002 ( $\theta$ rad)	( $\theta$ ± 0,004) Deg
20,00	381	1106	6,53	3,26	0,093	5,325
46,00	450	1040	5,31	2,66	0,076	4,338
55,00	477	1009	4,79	2,39	0,068	3,913
60,00	495	992	4,47	2,24	0,064	3,656

Cuadro I: Variación del diámetro  $D$  y ángulo  $\theta$  en función de la temperatura

Estas variaciones permite realizar una estimación sobre la temperatura a la que se logra la colinealidad (Fig 11).

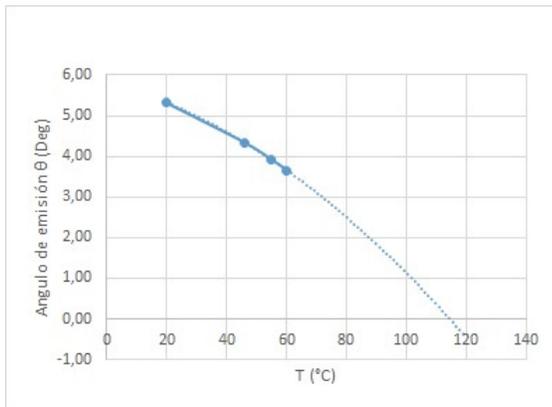


Figura 11: Ángulo  $\theta$  de salida de luz en función de la temperatura  $T$

se estima entonces que el ángulo  $\theta = 0^\circ$ , ángulo en el que se obtiene colinealidad estaría al rededor de los  $115^\circ\text{C}$ , fuera del rango de operación del horno. Se hace necesario entonces la construcción de un horno que permita alcanzar estos valores de temperatura  $T$ , esto no se considero por estar fuera de los alcances de este trabajo.

### III. b Medicion del espectro y las correlaciones de la luz generada por el cristal PPKTP

En esta sección con los resultados obtenidos de la caracterización del cristal se acopla luz para ser llevada al espectro metro y a foto contadores.

#### III. b.1 Espectro de intensidad

Una vez caracterizado el cristal, se inicio la caracterización de la luz de salida. Establecida una geometría no colineal se reviso el espectro de la luz SPDC a través de medir la intensidad de luz SPDC con el espectro metro Ocean Optics HR 4000

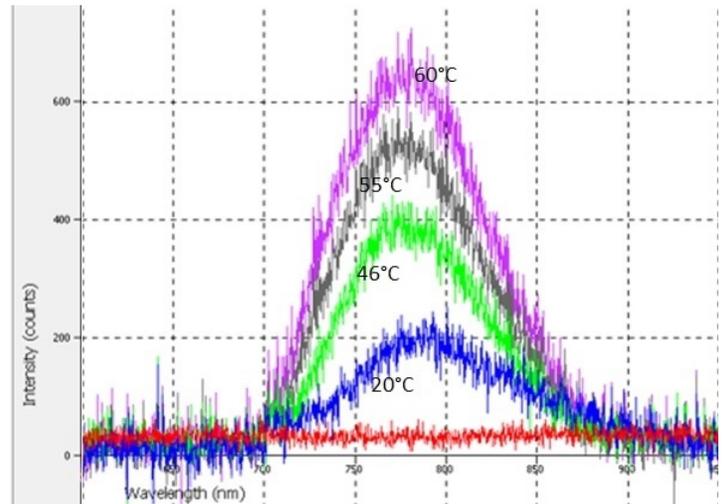


Figura 12: Espectro de intensidad a diferentes temperaturas

Se encontró entonces que este espectro tiene un ancho de  $200\text{nm}$ .

A fin de observar variaciones, se midió la intensidad a diferentes temperatura (Fig 9). Se esperaba que estos valores de intensidad se encontraran centrado en  $810\text{nm}$ , debido nuestra longitud de onda de bombeo (y tal como en [11]), sin embargo el valor de intensidad en aumento de temperatura se centra en  $783\text{nm}$ . Que no se tenga la longitud de onda esperada es atribuida al láser que se uso, pues este láser no cuenta con un ancho de banda que permita una definición en su longitud de onda. Por tal motivo se hace necesario el uso de un láser con un ancho de banda reducido con longitud de onda en  $405\text{nm}$ .

#### III. b. 2 Correlaciones

Con el propósito de colectar la luz, esta fue separada por un BS (Beam Splitter) 50/50, acoplada y llevada a fotocontadores (Fig 10.). El BS separa en dos líneas la luz SPDC, para ser llevada a acopladores de fibra óptica que lleva a los fotocontadores. Los acoples fueron etiquetados como  $A$  y  $B$  (ver Fig 13). Obteniéndose para el acoplador  $A$  a una temperatura de  $20^\circ\text{C}$  al rededor de 420000 y en el brazo  $B$  al rededor de 260000 conteos de fotones individuales. Los acople en sus posiciones se montaron de manera que contaran con desplazamientos horizontal y vertical. Al no contar con una configuración colineal se realizaron barridos para establecer posiciones  $(x_i, y_i)$  sobre anillos de luz. De esta manera con los acopladores en posiciones diametralmente opuestas medir correlaciones.

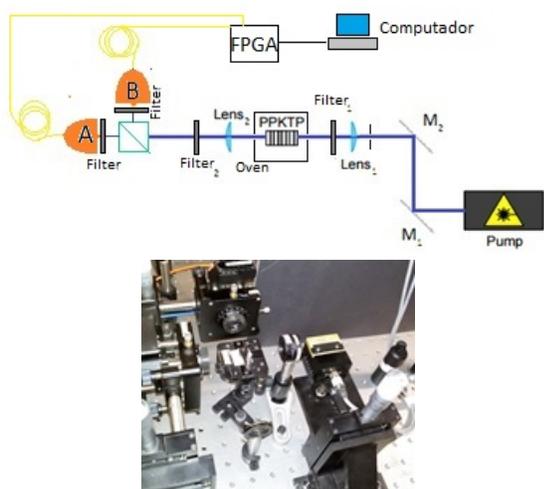


Figura 13: Disposición del BS 50/50 y los fotocontadores

Para la realización de barridos se estableció un punto donde se encontrara un máximo valor en conteos individuales y a partir de este a  $\pm 0,6\text{cm}$  en pasos de  $0,5\text{mm}$ . Estos barridos para la dirección horizontal de los detectores A y B son presentados en la fig 14.

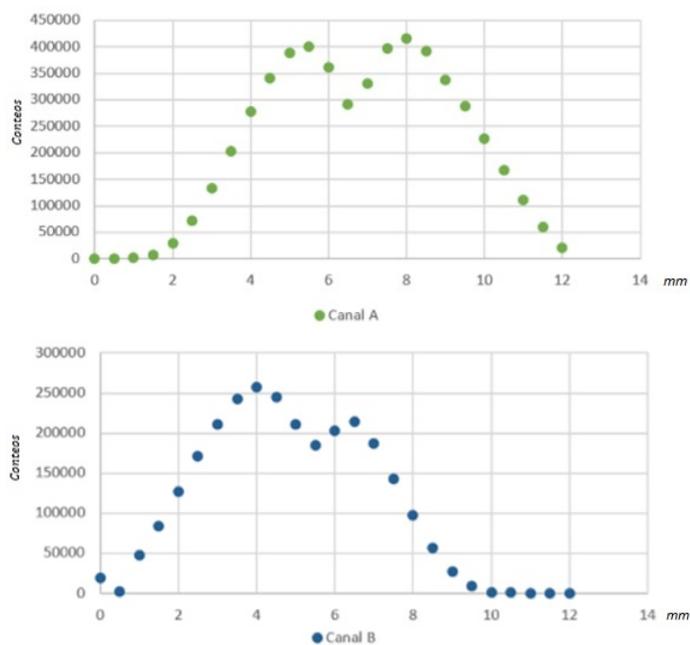


Figura 14: Conteos en barridos

Con luz acoplada en sus máximos valores de conteos individuales se establecen retrasos en unidades (1,9ns) entre conteos de llegada, para establecer medidas de coincidencias. Fijando el contador A en una unidad de retraso se barren retrasos en el contador B de 0 a 10. En las figura se presentan las medidas de correlación temporales realizadas.



Figura 15: Contador A fijado en 7 unidades de retraso y barrido del contador B en unidades de retrasos del 1 a 10



Figura 16: Contador A fijado en 8 unidades de retraso y barrido del contador B en unidades de retrasos del 1 a 10

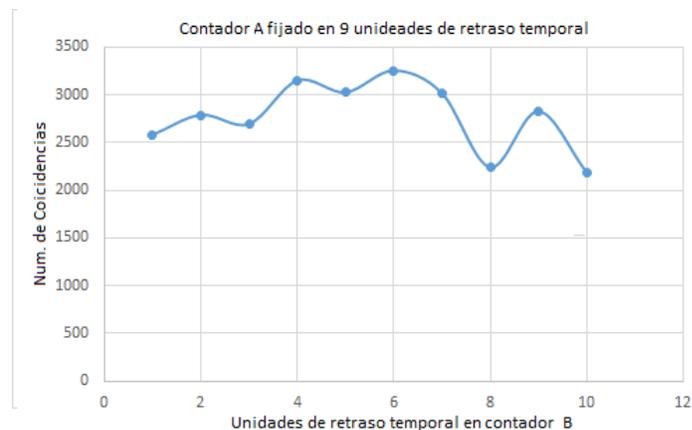


Figura 17: Contador A fijado en 9 unidades de retraso y barrido del contador B en unidades de retrasos del 1 a 10

Se encontró que la relación de retrasos temporales que da un mejor número de coincidencias se encuentra al mantener el contador A en 7 unidades y B en 4 unidades de retraso, alcanzando 4004 coincidencias.

#### IV. Conclusiones y perspectivas.

Los parámetros de temperaturas y potencia fueron inicialmente considerados al encontrar reportes con especificaciones similares del cristal con las que nosotros contábamos, sin embargo se ha podido constatar y de acuerdo con [4] que estos parámetros dependen y deben ser determinados de la muestra de cristal en trabajo. A las temperaturas de operación del horno no se alcanza el comportamiento del cristal como tipo II y colineal; para un posterior trabajo se hace necesario la construcción de un horno que trabaje en valores estimados de 115°C de temperatura. Es necesario el trabajo con un láser con poco ancho de banda a garantizar un valor de longitud

de onda bien definido y tener un adecuado comportamiento de espectro. La relación en retrasos temporales que reporta mayor número de coincidencias se encuentra en 7 unidades para el contador  $A$  y 4 unidades para el contador  $B$ .

#### Agradecimientos

Agradezco a la profesora Alejandra Valencia y a la profesora Mayerlin Nuñez por la confianza y colaboración para el desarrollo de este trabajo. De la misma manera al estudiante de doctorado Omar Calderón.

- 
- [1] F. S. et al., "A high-brightness source of polarization-entangled photons for applications in free-space," *Proc. International Conference on Space Optical Systems and Applications*, 2012.
  - [2] M. Fanto, R. K. Erdmann, P. M. Alsing, C. J. Peters, and E. J. Galvez, "Multi-entangled photons from a spontaneous parametric downconversion source," *Proc. of SPIE*, vol. 8057, no. 805705-1, 2011.
  - [3] J. Catalano, "Spontaneous parametric down-conversion and quantum entanglement," Master's thesis, Portland State University, 2014.
  - [4] R. Hamel, "Realization of novel entangled photon sources using periodically poled materials," mathesis, University of Waterloo, 2010.
  - [5] C. E. Kuklewicz, M. Fiorentino, G. Messin, F. N. C. Wong, and J. H. Shapiro, "High-flux source of polarization-entangled photons from a periodically poled ktiop4 parametric down-converter," *PHYSICAL REVIEW A*, vol. 69, no. 013807, 2004.
  - [6] W. H. Peeters and M. P. van Exter, "Optical characterization of periodically-poled ktiop4," *Optical Society of America*, 2008.
  - [7] *Periodically Poled KTP (PPKTP)*, Raicol Crystal Std. [Online]. Available: <http://www.optoscience.com/maker/raicol/pdf/PPKTP.pdf>
  - [8] R. C. et al., "Fabricación de niobato de litio periódicamente polarizado para óptica no lineal," *Rev. Mex. Fís*, vol. 48, no. 6, 2002.
  - [9] E. M. et al., "Simple methods for characterizing non-linear crystals to be used for spontaneous parametric down conversion," *ANALES AFA*, vol. 22, p. 56 to 62, 2010.
  - [10] H. Lee, H. Kim, M. Cha, and H. Moon, "Simultaneous type-0 and type-ii spontaneous parametric down-conversions in a single periodically poled ktiop4 crystal," *Appl Phys B. Laser and Optics*, 2012.
  - [11] e. a. F Steinlechner., "Efficient heralding of polarization-entangled photons from type-0 and type-ii spontaneous parametric downconversion in periodically poled ktiop4," *Optical Society of America*, vol. 31, no. 9, Sep. 2014.