

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE
Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales

Sustentabilidad y tecnología

PROYECTO DE APLICACIÓN PROFESIONAL (PAP)
Programa de Apoyo a Centros de Investigación Externos I



ITESO, Universidad
Jesuita de Guadalajara

4G03 Programa de Apoyo a Centros de Investigación Externos I
Generación y caracterización de parejas de fotones entrelazados a partir del
fenómeno mezclado de cuatro ondas en el régimen espontáneo en una fibra
óptica que soporta un modo espacial y mantiene la polarización, Centro de
Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, en Ensenada,
Baja California.

PRESENTAN

Programas educativos y Estudiantes

Ing. en Nanotecnología, Carmen Sofía Vergara Interián

Profesor PAP: Dra. Gabriela Porras Quevedo, Dr. Francisco Antonio Domínguez
Serna, Dra. Karina Garay Palmett.

Tlaquepaque, Jalisco, julio de 2023

ÍNDICE

Contenido

REPORTE PAP	2
Presentación Institucional de los Proyectos de Aplicación Profesional	2
Resumen	4
1. Ciclo participativo del Proyecto de Aplicación Profesional.....	4
1.1 Entendimiento del ámbito y del contexto	6
1.2 Caracterización de la organización	8
1.3 Identificación de la(s) problemática(s)	9
1.4 Planeación de alternativa(s)	10
1.5. Desarrollo de la propuesta de mejora	12
1.6. Valoración de productos, resultados e impactos	27
1.7. Bibliografía y otros recursos.....	29
2. Productos	31
3. Reflexión crítica y ética de la experiencia.....	32
3.1 Sensibilización ante las realidades	32
3.2 Aprendizajes logrados	33

REPORTE PAP

Presentación Institucional de los Proyectos de Aplicación Profesional

Los Proyectos de Aplicación Profesional (PAP) son experiencias socio-profesionales de los alumnos que desde el currículo de su formación universitaria- enfrentan retos, resuelven problemas o innovan una necesidad sociotécnica del entorno, en vinculación (colaboración) (co-participación) con grupos, instituciones, organizaciones o comunidades, en escenarios reales donde comparten saberes.

El PAP, como espacio curricular de formación vinculada, ha logrado integrar el Servicio Social (acorde con las Orientaciones Fundamentales del ITESO), los requisitos de dar cuenta de los saberes y del saber aplicar los mismos al culminar la formación profesional (Opción Terminal), mediante la realización de proyectos profesionales de cara a las necesidades y retos del entorno (Aplicación Profesional).

El PAP es un proceso acotado en el tiempo en que los estudiantes, los beneficiarios externos y los profesores se asocian colaborativamente y en red, en un proyecto, e incursionan en un mundo social, como actores que enfrentan verdaderos problemas y desafíos traducibles en demandas pertinentes y socialmente relevantes. Frente a éstas transfieren experiencia de sus saberes profesionales y demuestran que saben hacer, innovar, co-crear o transformar en distintos campos sociales.

El PAP trata de sembrar en los estudiantes una disposición permanente de encargarse de la realidad con una actitud comprometida y ética frente a las disimetrías sociales. En otras palabras, se trata del reto de “saber y aprender a transformar”.

El Reporte PAP consta de tres componentes:

El primer componente refiere al ciclo participativo del PAP, en donde se documentan las diferentes fases del proyecto y las actividades que tuvieron lugar durante el desarrollo de este y la valoración de las incidencias en el entorno.

El segundo componente presenta los productos elaborados de acuerdo con su tipología.

El tercer componente es la reflexión crítica y ética de la experiencia, el reconocimiento de las competencias y los aprendizajes profesionales que el estudiante desarrolló en el transcurso de su labor.

Resumen

Avances recientes respecto al procesamiento de información cuántica resaltan el potencial de la fotónica como plataforma de protocolos de computación cuántica. Es posible crear la unidad básica para este procesamiento con dos estados fotónicos correlacionados espectralmente. En el presente trabajo se demuestra experimentalmente la generación de parejas de fotones entrelazados a partir del fenómeno mezclado de cuatro ondas en el régimen espontáneo (SFWM) en una fibra de cristal fotónico. Se realizó un montaje experimental con filtros, espejos, monturas, acopladores de fibra, espejos dicróicos, polarizadores, entre otros elementos ópticos. A partir de la caracterización de las señales de salida, se obtuvo un diagrama de empaquetamiento de fase que muestra una longitud de onda de bombeo óptima entre 720 nm y 740 nm que corresponde a fotones señal entre 540 nm y 660 nm y sus acompañantes entre 800 nm y 1200 nm. Del análisis teórico de los resultados experimentales obtenidos se valoró la posible aplicación de estos fotones en compuertas cuánticas de dos cúbits.

1. Ciclo participativo del Proyecto de Aplicación Profesional

El PAP es una experiencia de aprendizaje y de contribución social integrada por estudiantes, profesores, actores sociales y responsables de las organizaciones, que de manera colaborativa construir sus conocimientos para dar respuestas a problemáticas de un contexto específico y en un tiempo delimitado. Por tanto, la experiencia PAP supone un proceso en lógica de proyecto, así como de un estilo de trabajo participativo y recíproco entre los involucrados.

Se realizará una investigación documental sobre los componentes ópticos necesarios para elaborar el presente proyecto, como fuentes de luz, filtros, divisores de haz, detectores, etc. Además, se realizará un análisis comparativo entre la fibra óptica y cristales no lineales para determinar el medio óptico más adecuado para la transmisión de información direccionada a través de largas distancias.

Asimismo, se realizarán simulaciones y se determinará la longitud de onda de trabajo adecuada para el proceso de generación de parejas de fotones provenientes de la interacción de las ondas de entrada en dicho medio.

Se utilizará una configuración de interferencia para combinar múltiples ondas de luz de entrada, contemplando la disposición de las fuentes de luz, la interacción con el medio óptico y los instrumentos de detección de las ondas de salida. Las ondas de salida con las parejas de fotones generadas serán detectadas y analizadas con detectores de fotones individuales lo cual permitirá una caracterización más precisa de las propiedades cuánticas de las parejas de fotones y su utilidad potencial en aplicaciones en computadoras cuánticas.

El proyecto se realizará en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), en el grupo Interacciones no Lineales y Óptica Cuántica (LINOC). En la asesoría participará el Dr. Francisco Antonio Domínguez Serna y la Dra. Karina Garay Palmett.

Objetivo general:

Generar parejas de fotones entrelazados a partir del fenómeno mezclado de cuatro ondas en el régimen espontáneo (SFWM, por sus siglas en inglés) en una fibra óptica de cristal fotónico (PCF, por sus siglas en inglés).

Objetivos específicos:

- Conocer el potencial de la fotónica integrada como una solución a los desafíos que enfrenta el enfoque óptico de la computación cuántica.
- Interpretar diagramas de empatamiento de fase para determinar la longitud de onda de trabajo.
- Caracterizar las parejas de fotones de salida generados por el proceso SFWM utilizando mediciones espectrográficas.
- Identificar procesos no lineales que dan lugar a la generación de estados no clásicos de variable continua.

1.1 Entendimiento del ámbito y del contexto

La creciente necesidad de la sociedad de acceder a la información de manera rápida y eficaz hace indispensable encontrar maneras de optimizar el procesamiento de datos. Una de las herramientas propuestas como solución a esta problemática es la computación cuántica. Esta herramienta cuenta con una capacidad de procesamiento excepcionalmente superior a la de las computadoras tradicionales [1].

Sin embargo, la fabricación de una computadora cuántica completamente funcional y con capacidades consistentemente superiores a las de las computadoras clásicas aún está por verse. Múltiples esfuerzos se han llevado a cabo para su elaboración debido a la facilidad que tienen para resolver problemas que benefician a la humanidad. Pueden acelerar el descubrimiento de fármacos y la investigación en el campo de la medicina, lo que permite la simulación de enfermedades y el desarrollo de remedios más eficientes.

Además, al anticipar y gestionar los desastres naturales, la computación cuántica puede ofrecer alertas tempranas, orientación para evitar muertes y reducir los daños a la propiedad. Estas potentes herramientas ayudan en la comprensión de los efectos del cambio climático, la creación de planes de mitigación y adaptación, y la formulación de políticas ambientales sensatas. Además, ayudan con la optimización de recursos y energía, lo que permite una administración más eficaz de ambos [2].

Las capacidades superiores de las computadoras cuánticas se pueden atribuir principalmente al tipo de unidad básica que utilizan para realizar operaciones lógicas. Mientras la unidad básica de información de los sistemas tradicionales son los bits, las computadoras cuánticas utilizan bits cuánticos (cúbits). Al contrario de los bits clásicos, estos no se limitan a tomar el valor de 0 o 1, sino que también pueden encontrarse en una superposición cuántica de ambos estados [1].

Los cúbits se pueden implementar utilizando diferentes plataformas físicas, como átomos, iones, fotones, electrones o superconductores, entre otros sistemas de dos niveles. Para determinar la más adecuada se debe tomar en cuenta el resto de los componentes del sistema

generador de cúbits. Sin embargo, cuando se trata de partículas elementales, se suele preferir a los fotones ya que son bosones y no siguen el principio de exclusión de Pauli [3]. Esto significa que la coherencia de ondas de los fotones es mayor que la de partículas como electrones o protones, lo cual resulta en un entrelazamiento más eficiente para la aplicación propuesta y, por consiguiente, en parejas de fotones más duraderas. Además, los fotones tienen poca interacción con el ambiente, lo cual favorece tiempos de coherencia prolongados.

En los últimos años, múltiples empresas e institutos de investigación han lanzado iniciativas para desarrollar una computadora cuántica escalable y consistentemente superior a las computadoras clásicas. Analizando los resultados de estas investigaciones, se puede resaltar el potencial de dos componentes para la generación de cúbits: los fotones y los superconductores.

Los cúbits superconductores se construyen utilizando circuitos eléctricos superconductores enfriados hasta casi cero Kelvin [4]. Trabajar a dicha temperatura es físicamente inviable y hace de esta opción una alternativa poco escalable. Por otro lado, los cúbits fotónicos transportan información cuántica por fotones, los cuales no necesitan de condiciones extremas para mantener su entrelazamiento [3].

El grupo LINOC es pionero del proceso no lineal SFWM, habiendo publicado el primer artículo que explica teóricamente la generación de parejas de fotones mediante este proceso y demostrado la factibilidad de la creación de parejas de fotones entrelazados para aplicaciones de procesamiento de información cuántica [5].

En el presente PAP se continuará con el esfuerzo de LINOC en el área de óptica cuántica mediante la simulación de SFWM en fibra óptica de cristal fotónico y su respectivo montaje experimental, con la finalidad de implementar las parejas de fotones resultantes en compuertas cuánticas.

1.2 Caracterización de la organización

El CICESE es una institución reconocida a nivel nacional e internacional por su excelencia en la investigación científica y la formación de profesionales altamente capacitados [6]. Como institución, se enfoca en la generación de conocimiento científico de vanguardia. Además de la investigación, el centro promueve la divulgación científica y la colaboración con otras instituciones nacionales e internacionales.

En el Departamento de Óptica del CICESE se fomenta un ambiente de trabajo colaborativo, en el que se promueve la participación activa de los estudiantes y se fomenta el intercambio de ideas entre investigadores. Además, se brinda acceso a laboratorios y equipos especializados que permiten llevar a cabo investigaciones de alto nivel en el campo de la óptica. Este departamento se compone de diversas áreas de investigación y desarrollo en el campo de la óptica. Algunas de estas áreas incluyen óptica cuántica, óptica biomédica, óptica de materiales, óptica ambiental y óptica aplicada a las telecomunicaciones [6]. Cada área se dedica a investigar y aplicar conocimientos ópticos específicos para abordar desafíos científicos y tecnológicos en su respectivo campo. En general, tiene como propósito impulsar el avance científico y tecnológico en el campo de la óptica, así como promover su aplicación en diversas áreas de estudio.

Dentro del Departamento de Óptica, el grupo LINOC se destaca por su enfoque en la óptica cuántica y su aplicación en tecnológicas avanzadas. Este grupo ha realizado investigaciones destacadas en el campo de la generación y caracterización de estados cuánticos de luz, así como en el desarrollo de dispositivos y sistemas ópticos cuánticos.

En el desarrollo del PAP, participan estudiantes, profesores, actores sociales y responsables de organizaciones relacionadas con el objeto de estudio. Los estudiantes tienen un rol activo en la investigación, simulaciones y montaje experimental, mientras que los profesores y asesores brindan orientación y asesoramiento a lo largo del proyecto. Además, se promueve la colaboración y el trabajo en equipo entre todas las personas involucradas.

1.3 Identificación de la(s) problemática(s)

En el quehacer científico es práctica común resolver problemas complejos que involucran cálculos a gran escala en los que el empleo de computadoras convencionales obstaculiza o ralentiza los procesos de solución. Es en este campo de aplicación en el que se justifica la necesidad de diseñar y desarrollar una herramienta con la que se puedan superar dichos obstáculos. De aquí que se enfoquen los esfuerzos en lograr diseñar y construir computadoras cuánticas provistas de capacidades superiores en el procesamiento y almacenamiento de datos que las tradicionales. La principal diferencia entre ambas es que las computadoras cuánticas no utilizan el sistema binario, sino que utilizan cúbits formados por partículas elementales o superconductores. Estos pueden estar en estados superpuestos que les permiten representar 0 y 1 simultáneamente [1,7].

Hasta el día de hoy, no existe una manera “correcta” de crear cúbits y las computadoras cuánticas aún son un proyecto en vías de desarrollo. Uno de los obstáculos principales para las y los científicos encargados de desarrollar estas tecnologías es llevarlas del concepto a la realidad pues se debe garantizar la coherencia del sistema, el transporte efectivo de la información, la cantidad y calidad de parejas de partículas generadas, y la implementación a gran escala.

Como se explicó en la sección 1.1, los cúbits fotónicos presentan numerosas ventajas respecto a sus contrapartes superconductoras o electrónicas. Partiendo de dicha concepción es que el grupo LINOC cobra vida, teniendo como objetivo principal el generar parejas de fotones entrelazados por medio de SFWM. LINOC trabaja tanto con fibra óptica como con cristales, y ambos medios presentan sus respectivas ventajas sobre el otro.

Una ventaja de los cristales sobre la fibra óptica es que pueden actuar como fuentes de fotón anunciado. Sin embargo, una desventaja es que no se conoce la dirección en la que salen las parejas de fotones, cosa que sí se puede determinar e incluso controlar con las fibras ópticas. La superioridad de uno sobre otro es difícil de precisar, sin embargo, factores como la distancia de transmisión deseada y la escalabilidad del proyecto hacen de la fibra óptica el enfoque elegido para este trabajo.

Se trabajará de manera práctica con un láser pulsado y una fibra óptica de cristal fotónico que fungirán como fuente y conductor de fotones, respectivamente. Se espera que los resultados sean congruentes con las simulaciones del sistema. De serlo, se podría pasar a las siguientes etapas para la creación de un prototipo de computadora cuántica que cumpla con la demanda actual de velocidad de procesamiento.

1.4. Planeación de alternativa(s)

Para superar la limitación física de las computadoras, se propone utilizar cúbits fotónicos. El primer paso para la creación de cúbits fotónicos es la generación de parejas de fotones entrelazados. Esto se realiza mediante la interacción de ondas de luz en un medio óptico adecuado, lo cual puede lograrse experimentalmente utilizando configuraciones de interferencia y componentes ópticos como fuentes de luz, filtros y divisores de haz [8].

Para caracterizar las propiedades cuánticas de las parejas de fotones generadas, se propuso el uso de detectores de fotones individuales. Estos detectores permiten analizar de manera precisa y detallada las propiedades de los fotones entrelazados, lo cual es esencial para el procesamiento y análisis de información cuántica.

El desarrollo de la alternativa seleccionada incluye la investigación documental sobre los componentes ópticos necesarios, la justificación del medio óptico adecuado y la configuración de interferencia para combinar las ondas de luz de entrada. Se decidió utilizar esta alternativa porque combina de manera efectiva la generación, detección y análisis de las parejas de fotones entrelazados. Esta combinación permite superar las limitaciones computacionales y de análisis de datos de las computadoras convencionales, y aprovechar las propiedades cuánticas de los fotones para el procesamiento de información cuántica [9].

Además, resulta imperativo tomar en cuenta que todo proceso no lineal de generación de parejas de fotones da lugar a estados que poseen una estadística no clásica que se refleja en

una menor incertidumbre, por lo que una posible siguiente etapa de este proyecto podría ser la generación de estados comprimidos [10].

En la tabla 1 se muestra el plan de trabajo del presente PAP. Se especifican los recursos humanos y materiales necesarios para cumplir con cada actividad. Además, se muestra el tiempo requerido para llevar a cabo las actividades y la semana en la cual se prevé realizarla. La tabla 2 muestra el significado de las abreviaturas utilizadas para referir los recursos necesarios en cada actividad planeada.

Tabla 1. Cronograma de actividades previstas para la realización del PAP.

Nombre	Recursos	Tiempo (días)	Mayo		Junio				Julio	
			1	2	3	4	5	6	7	8
Familiarización y entrenamiento para el uso del equipo de laboratorio	LO	2								
Fundamentos teóricos Clases/Asesoría	AA, TJ, TP	7								
Montaje experimental	LO, TJ, LT, MC, CCD	6								
Medición de espectros de generación de la pareja de fotones que se obtiene en SFWM.	LO, MC, CCD	6								
Corrección montaje experimental	LO, TJ, LT, MC, CCD	6								
Obtención y corrección de diagrama empataimiento de fase	SC, TJ	6								
Análisis de resultados experimentales y teóricos obtenidos	TP	5								
Presentación de los resultados obtenidos	TP	1								

Tabla 2. Abreviaturas de los recursos señalados en el cronograma de actividades.

Recursos utilizados	
Abreviatura	Significado
AA	Asesoría Dr. Francisco y Dra. Karina
SC	Sistema computacional
TP	Trabajo personal
TJ	Trabajo con Ing. Jorge Montoya
LO	Laboratorio Óptica
LT	Laser TiSa
MC	Monocromador
CCD	Dispositivo de carga acoplada (CCD, por sus siglas en inglés)

1.5. Desarrollo de la propuesta de mejora

Fundamento teórico

La óptica se divide en dos ramas que dependen del tipo de interacción de la luz con la materia: la óptica lineal y la no lineal. Para comprender el comportamiento y las características de sistemas ópticos no lineales como los que se plantean es el presente trabajo, primero se deben conocer determinados principios de la óptica lineal como lo son los modos espaciales, la dispersión y la birrefringencia [11].

Óptica lineal

En general, la linealidad se presenta en una función cuando, a partir de la suma de los elementos de entrada, es posible predecir los de salida. Es decir, se cumple la relación $f(ax_1 + bx_2) = af(x_1) + bf(x_2)$, donde a y b son constantes, y x_1 y x_2 son entradas independientes a la función [11].

En óptica, se dice que un fenómeno es lineal cuando la interacción de la luz con la materia no modifica las propiedades de onda y no existe un intercambio de energía entre entradas ópticas independientes. Se puede tomar como ejemplo a un láser que incide en la interfaz de dos materiales con distinto índice de refracción n_1 y n_2 . El ángulo de refracción de la luz resultante θ_r permanecería constante aún si se aumentara la cantidad de láseres que irradian

el medio. En este caso, la amplitud del campo de entrada, que es proporcional a la intensidad del rayo incidente, está linealmente relacionada con la amplitud del rayo refractado [11].

Si se irradiara la muestra con múltiples haces de luz coherentes superpuestos, los patrones de interferencia resultantes podrían hacernos pensar que los haces se afectan mutuamente. Sin embargo, la interferencia también es un fenómeno lineal ya que el campo total es la superposición total de todos los campos de entrada. Dicha relación no es compartida por los sistemas ópticos no lineales. En un medio no lineal, duplicar la intensidad de entrada no corresponde a una intensidad de salida duplicada.

Los fenómenos ópticos lineales surgen cuando la intensidad de la luz es baja [12]. A medida que la intensidad del haz de luz aumenta, la respuesta del material óptico deja de ser proporcional a la intensidad. Es decir, se presenta una no linealidad óptica.

Óptica no lineal

La distinción entre óptica lineal y óptica no lineal, entonces, radica en el intercambio de energía dentro de los sistemas el cual, a su vez, depende de la polarización del medio óptico. Por lo tanto, la óptica no lineal estudia la respuesta no lineal del componente dieléctrico de la polarización ante campos eléctricos intensos de la luz [12].

Los intercambios de energía entre las fuentes de entrada pueden llevar a procesos no lineales como la generación de nuevas frecuencias, la mezcla de frecuencias [11], la transferencia de la potencia entre ondas ópticas de diferentes frecuencias durante la propagación [13], y el efecto óptico Kerr. Este último describe la relación entre la intensidad del campo aplicado y el comportamiento no lineal de un material.

En el efecto óptico Kerr, el índice de refracción n de un material depende de la intensidad I del campo eléctrico aplicado [14]. El índice de refracción se escribe en la ecuación 1 como:

$$n(\omega, I) = n(\omega) + n_2 I \quad (1)$$

Donde ω es la frecuencia y n_2 es el índice de refracción no lineal.

En el presente trabajo se busca iluminar una fibra óptica con un láser de una determinada longitud de onda. El láser tiene una intensidad de campo eléctrico muy alta. Cuando un campo eléctrico $\mathbf{E}$ intenso y variable en el tiempo se aplica a un medio dieléctrico isotrópico, como lo puede ser una fibra óptica, surge una polarización eléctrica $\mathbf{P}$ con la misma dirección y variación en el tiempo que el campo original [15]. La proporcionalidad de $\mathbf{P}$ y $\mathbf{E}$ depende de la susceptibilidad, χ , de la siguiente manera:

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 (\chi \mathbf{E} + \chi^{(2)} \mathbf{E}^{(2)} + \chi^{(3)} \mathbf{E}^{(3)} + \dots), \quad (2)$$

En la ecuación 2, ϵ_0 es la permitividad del vacío y χ^{th} es jth orden de susceptibilidad.

La susceptibilidad de un material representará su reacción frente a determinados estímulos. Por ejemplo, la ecuación 1 describe al índice de refracción cuando la susceptibilidad de un material es de orden superior. El orden de la susceptibilidad es especialmente importante cuando se habla de procesos no lineales como la mezcla espontánea de cuatro ondas (SFWM). SFWM produce pares de fotones cuánticamente entrelazados a través de una susceptibilidad de tercer orden $\chi^{(3)}$ que determina la eficiencia y las condiciones de emparejamiento de fase del proceso [15]. Este proceso será explorado más adelante en el presente trabajo y se explicará cómo se pueden generar parejas de fotones al acoplar un láser a una fibra óptica con características especiales para este proceso.

Fibras ópticas

Las fibras ópticas son guías de onda ampliamente utilizadas para la transmisión de información debido a su capacidad de guiar las señales ópticas con mínima atenuación y dispersión. Son excelentes para la transmisión de datos a largas distancias y altas velocidades. Además, no son afectadas por interferencias electromagnéticas, lo que garantiza una transmisión de señal confiable y de alta calidad [16].

Comercialmente, la fibra óptica está conformada por un filamento de sílice (SiO_2) en el cual se aplican diferentes tipos de deformaciones con el objetivo de modificar sus propiedades ópticas. Dentro del filamento se encuentra el núcleo central de la fibra y alrededor del filamento se encuentra un revestimiento para protegerla (Figura 1).

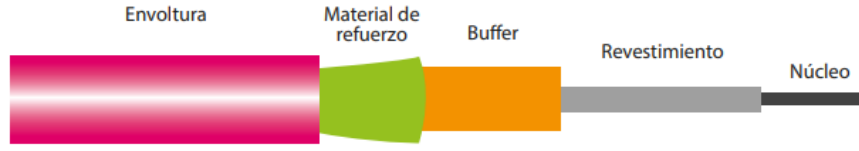


Figura 1. Estructura de una fibra óptica [17].

La luz viaja confinada en las fronteras del núcleo de la fibra por medio del fenómeno de reflexión total interna. Cuando un haz de luz viaja desde un material con índice de refracción n_1 hacia un material con índice de refracción n_2 , si $n_1 > n_2$, existe un ángulo donde la totalidad de la luz será reflejada. El ángulo con el que la luz se reflejará totalmente en las fronteras de la guía se puede expresar como θ_c y su ecuación (3) es la siguiente:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (3)$$

Este fenómeno de reflexión total interna permite que la luz se mantenga confinada y se propague a lo largo de la fibra sin pérdidas significativas. El comportamiento de la luz dentro de la fibra dependerá tanto de la longitud de onda de la luz incidente, como del material y las dimensiones de la fibra. Esto se debe a que el material de la fibra determina el índice de refracción, y su diámetro la apertura numérica (AN); es decir, el ángulo de aceptación de luz en la fibra. Cuando aumente el diámetro, aumentará la AN. Una AN mayor significa un mayor rango de ángulos a los cuales la luz puede entrar a la fibra y ser guiada efectivamente [18]. Esto quiere decir que la fibra soporta una mayor cantidad de modos espaciales. Tanto la AN, como el índice de refracción y la longitud de onda de la luz determinan la cantidad de modos espaciales que soporta la fibra.

Los modos espaciales son maneras en las que un haz se puede propagar a lo largo de la fibra por medio del fenómeno de reflexión total interna (Figura 2) [18]. Dependiendo de los modos espaciales, una fibra puede clasificarse como monomodal o multimodal.

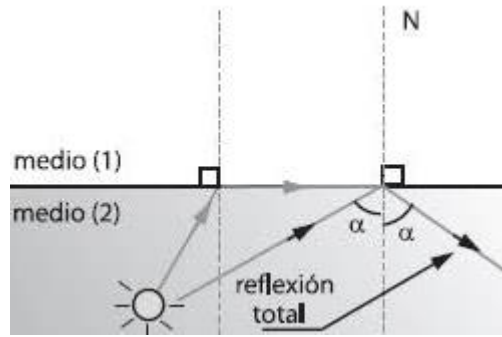


Figura 2. Reflexión total interna [19]

Para clasificar a una fibra como monomodal o multimodal se debe fijar una longitud de onda de trabajo. La longitud de onda en la que una fibra pasa de ser monomodal a multimodal se llama longitud de onda de corte [18]. La longitud de onda de corte depende de la geometría y el material de la fibra.

Trabajando con una longitud de onda determinada, una fibra será monomodal cuando el camino que la luz siga a través del su núcleo sea uno solo (figura 3a). En cambio, una fibra será multimodal a esa longitud de onda si la luz se propaga en diferentes modos espaciales simultáneamente (figura 3b) que pueden tener distintas distribuciones de intensidad e índices de refracción efectivos.

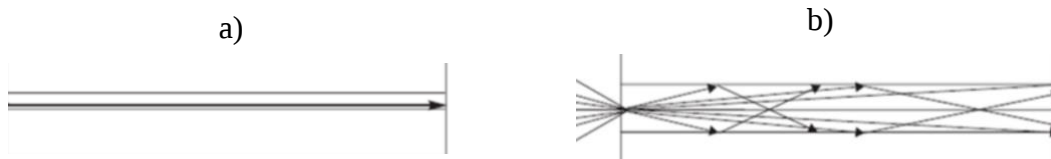


Figura 3. Dispersión de la luz en fibra a) monomodal, y b) multimodal. [20]

El índice de refracción efectivo n_{eff} , también llamado índice modal, es el índice de refracción que experimenta un modo de propagación de la luz en una guía de onda. Se expresa como la razón entre la constante de propagación en la fibra en la dirección de propagación y la constante de propagación en el vacío [21].

En una fibra monomodal solamente el modo fundamental se propaga. En una fibra multimodal se propagan también los estados excitados y sus índices de refracción siempre serán menores que el del estado fundamental. Esto significa que una fibra multimodal sufre de dispersión modal, donde cada modo espacial viaja a velocidad diferente a través del medio. Dicha dispersión puede llevar a la degradación del entrelazamiento cuántico. Esta dispersión no se presenta en fibras monomodales, lo cual significa que no se pierde la coherencia [18].

Generalmente, las fibras monomodales tienen una mejor eficiencia de emparejamiento de fotones y una longitud de coherencia más larga que la de las fibras multimodales. Además, su perfil modal definido y la ausencia de dispersión modal hacen que sea más sencillo manipular los fotones generados [18].

Mezclado de cuatro ondas en el régimen espontáneo (SFWM)

SFWM requiere dos fotones de bombeo con frecuencias ω_{p1} y ω_{p2} que pueden ser emitidos por un láser. Estos entran en un material donde interactúan, aniquilándose, para producir una pareja de fotones cuánticamente entrelazados llamados “señal” y “acompañante,” con frecuencias ω_s y ω_i respectivamente. Estos fotones tendrán frecuencias diferentes a las de los fotones de bombeo, sin embargo, sus energías y momentos totales siempre serán iguales [22]. Es decir, el proceso está limitado al cumplimiento de la conservación de energía (ecuación 4) y momento (ecuación 6). Para el caso de bombeos degenerados:

$$\omega_{p1} + \omega_{p2} = \omega_s + \omega_i \quad (4)$$

Donde ω_μ ($\mu = p, s, i$) es la frecuencia del campo eléctrico del fotón de bombeo, el fotón señal y el fotón acompañante, respectivamente. Para SFWM la conservación de la energía se ve de la siguiente manera:

$$\Delta\omega = \omega_{p1} + \omega_{p2} - \omega_s - \omega_i = 0 \quad (5)$$

Donde ω_μ ($\mu = p1, p2, s, i$) es la frecuencia del campo eléctrico del fotón de bombeo 1 y 2, el fotón señal y el fotón acompañante, respectivamente. En cambio, la conservación del momento se ve de la siguiente manera:

$$\vec{k}_{p1} + \vec{k}_{p2} = \vec{k}_s + \vec{k}_i \quad (6)$$

Donde $\vec{k}_\mu$ ($\mu = p, s, i$) es el vector de onda del fotón de bombeo, el fotón señal y el fotón acompañante, respectivamente. Cada vector de onda tiene componentes en x , y y z (ecuación 7).

$$\vec{k} = k_x, k_y, k_z \quad (7)$$

La expresión en la ecuación 6 se puede simplificar al considerar SFWM en una fibra óptica pues el eje z corresponderá a la frecuencia del fotón. Además, las componentes k_x y k_y ya están determinadas pues la luz viaja en modos espaciales específicos. Por lo tanto, la propagación es sólo en la dirección z . Entonces la expresión sería:

$$\vec{k} = k_z \quad (8)$$

En este caso, donde todos los campos se propagan a lo largo de la misma dirección, la ecuación de empaquetamiento de fase se puede escribir de forma escalar, tomando en cuenta únicamente la dependencia en z . Entonces, el módulo de $\vec{k}$ (que equivale a k_z) corresponde a:

$$|\vec{k}| = \frac{n_{eff}(\omega) \omega}{c} \quad (9)$$

Donde $n_{eff}(\omega)$ es el índice de refracción efectivo dependiente de la frecuencia en la fibra, y c es la velocidad de la luz en el vacío. Por lo tanto, en SFWM la siguiente expresión debe ser verdadera:

$$\Delta k = k_{p1}(\omega_{p1}) + k_{p2}(\omega_{p2}) - k_s(\omega_s) - k_i(\omega_i) - (\gamma_1 P_1 + \gamma_2 P_2) = 0 \quad (10)$$

Donde $k_\mu (\omega_\mu)$ es la constante de propagación que corresponde al módulo del vector de onda $\vec{k}$ de cada fotón involucrado, γ_ν ($\nu = 1, 2$) es el coeficiente no lineal efectivo, y P_ν son las potencias pico del bombeo [22].

La eficiencia del proceso es proporcional al cuadrado del coeficiente no lineal efectivo γ el cual depende del índice de refracción no lineal n_2 , es decir, de la parte real del tensor de susceptibilidad de tercer orden $Re\{\chi^{(3)}\}$. La siguiente expresión se cumple para SFWM en una fibra óptica:

$$\eta \propto L \gamma^2 P \quad (11)$$

Donde η es la eficiencia del proceso, L es la longitud de la fibra y P es la potencia de la fuente aplicada. La dependencia del proceso SFWM de la conservación de energía y momento hace que aparezcan correlaciones entre los fotones involucrados en el proceso. Dichas correlaciones pueden ser de naturaleza espectral (entrelazamiento), espacial, o mixta.

Para procesos como SFWM, se necesita que los modos espaciales de los fotones de salida estén empatados, es decir, que no haya un desajuste de fase. La birrefringencia de un material puede compensar el desajuste de fase que normalmente sucede en un proceso óptico no lineal. Al utilizar varios índices de refracción para varios estados de polarización, la empatamiento de fase birrefringente puede ayudar a cumplir el requisito de empatamiento de fase. Esto se conoce como empatamiento de fase birrefringente [23].

Birrefringencia

Un haz de luz no polarizada generalmente se divide en dos haces linealmente polarizados cuando ingresa a un medio anisotrópico. El haz ordinario sigue la ley de Snell, mientras que el haz extraordinario no lo hace. Ambos poseen índices de refracción diferentes y se propagan dentro del medio a diferentes velocidades.

Este fenómeno se conoce como birrefringencia [16]. Un material que presente birrefringencia tendrá un índice de refracción diferente para la luz polarizada en diferentes direcciones. Esto significa que el estado de polarización del material afecta la rapidez con la que la luz se mueve a través de él.

La birrefringencia puede crearse artificialmente en algunas fibras ópticas por diseño o estrés mecánico. Esta permite que la polarización de la luz se mantenga constante dentro de la fibra si se logra que la luz incida en uno de los dos ejes de transmisión. Existe un eje lento con mayor n y un eje rápido con menor n . Las fibras ópticas no presentan birrefringencia en condiciones ideales. Sin embargo, en la práctica, los núcleos de las fibras no son perfectamente circulares, lo que hace que las fibras sean birrefringentes. La torsión, los esfuerzos residuales o las deformaciones en la fibra son otros factores que pueden causar

birrefringencia [16, 24]. La birrefringencia rompe la degeneración entre los modos lo cual lleva a una mayor eficiencia de conversión.

Fundamento metodológico

En el presente trabajo se utilizó una fibra de cristal fotónico (PCF, por sus siglas en inglés) NL-PM-750 de la marca NKT Photonics, con un núcleo de $1.8 \pm 0.3 \mu\text{m}$ de diámetro. PCF es un tipo especial de fibra óptica monomodal que utiliza una estructura periódica de micro-agujeros (en la figura 4 se observa una micrografía SEM de la fibra utilizada) para controlar las propiedades ópticas, incluyendo la dispersión, la guía de modos y la birrefringencia. La fibra PCF exhibe dispersión cero (ideal) alrededor de los 750 nm. Por lo anterior, se trabajará con longitudes de onda cercanas a dicho valor.

Estas fibras ofrecen una mayor flexibilidad en el diseño y permiten una manipulación más precisa de la propagación de la luz. Su estructura fotónica altamente especializada permite un control más eficiente de los modos de polarización y la propagación de la luz, lo que las hace adecuadas para aplicaciones avanzadas como la modulación de la polarización.

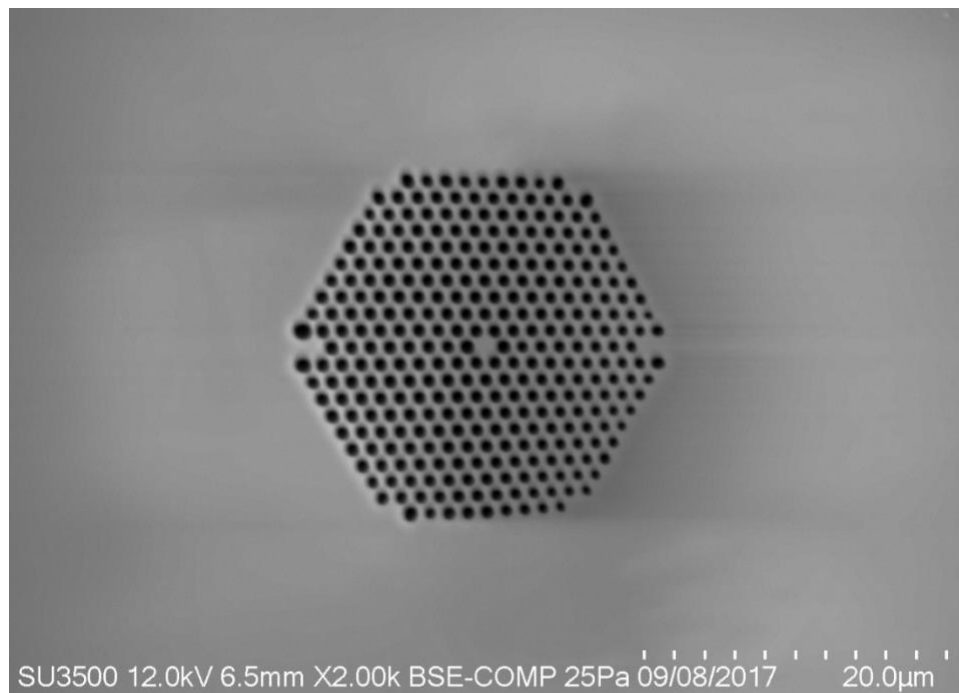


Figura 4. Micrografía en microscopio óptico de barrido (SEM) de la fibra PCF.

Metodología

El montaje experimental del proceso de SFWM en una PCF se observa en la figura 5. Este consiste en múltiples componentes que sirven para generar y manipular la luz laser con el fin de obtener parejas de fotones entrelazados.

Para el desarrollo de esta etapa, se utilizaron elementos básicos como filtros, espejos, monturas, acopladores de fibra, espejos dicroicos, polarizadores, entre otros elementos ópticos. Además, se utilizaron elementos más especializados como: Fibra cristal fotónico (NL-PM-750), Monocromador (Andor Shamrock-750), CCD intensificada (Andor iStar 334T), Láser verde pulsado (Alphas PLDD50M), rojo de 640 nm NPL64C, Láser TiSa (zafiro-titanio), Generador de pulsos y retrasos (Stanford Research Systems, DG645/1, Amplificador Lock-in (Stanford Research Systems, SR865A) y Osciloscopio y analizador de espectro, 500 MHz (Wavesurfer 3054, Teledyne LeCroy. Cabe aclarar que el láser verdi junto con la cavidad del MIRA 900 P forman el láser de salida.

En primer lugar, se utilizó el láser Verdi a una longitud de 532 nm con una potencia de 5 Watts, y se controló mediante el software Optically Pumped Semiconductor Laser (OPSL). La luz emitida por el láser verde es utilizada para alimentar al láser TiSa, el cual necesita de un chiller para mantener una temperatura estable de 19°C para su correcto funcionamiento.

El segundo láser se ajustó para producir las longitudes de onda deseadas (720 nm- 740 nm). Después de estos ajustes, el láser se dirigió a dos espejos (M_1 y M_2) que permiten alinearlo a la altura deseada, pasó a través de un aislador óptico (OI) que se encargó de evitar reflexiones que dañen al láser.

Posteriormente, la luz atravesó un retardador de onda $\frac{\lambda}{4}$ (R_1) el cual permitió modificar la fase de la luz. Después, el láser pasó a través de dos polarizadores (P_1 y P_2), el primero ayudó a controlar la orientación de la luz, mientras que el segundo, con la ayuda de un retardador de onda $\frac{\lambda}{2}$ (R_2), la ajustó a un eje de transmisión de la fibra óptica.

a)



b)

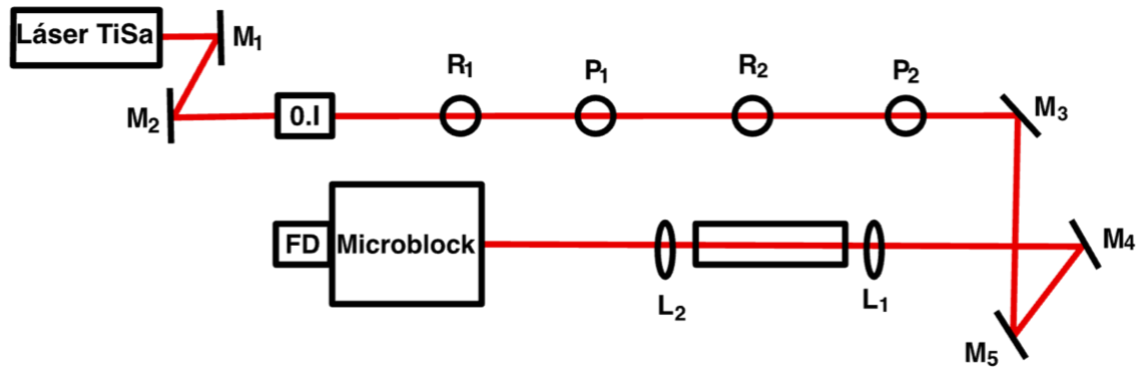


Figura 5. a) Montaje experimental, b) Diagrama de montaje experimental donde M_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$) corresponde a los espejos, R_j ($j=1, 2$) a los retardadores de onda $\frac{\lambda}{4}$ y $\frac{\lambda}{2}$ respectivamente, P_h ($h=1, 2$) a los polarizadores, y L_k ($k=1, 2$) las lentes convergentes que aseguran que el haz esté colimado.

El láser fue redirigido mediante tres espejos (M_3 , M_4 y M_5) hacia la base de una fibra de cristal fotónico (PCF). Estos espejos aseguraron que el láser bajara a la altura de la entrada de la fibra. Antes y después de la fibra se encontraban dos lentes (L_1 y L_2), una encargada de a ver converger el haz y otra encargada de colimarlo. Después de pasar por la fibra PCF, el láser fue detectado gracias a un espectrógrafo CCD intensificado (FD). Este dispositivo mide la intensidad del láser después de interactuar con fibras y permite identificar las parejas de fotones entrelazados.

Alineación

Se configuró el láser para una potencia de 5 Watts y una longitud de onda de 720 nm. Este fue alineado a la fibra PCF mediante la manipulación de tres espejos, lo cual permitió que el láser se dirigiera directamente hacia el microblock, el cual es un dispositivo utilizado para ajustar y posicionar con alta precisión fibras ópticas, asegurando una correcta alineación y transmisión de luz. El objetivo de esto era lograr que, al conectar la fibra de cristal fotónico, el láser estuviera previamente alineado, de manera que solo fuera necesario manipular el microblock al cual estaba conectada la fibra para hacer incidir el láser sobre ella. Para este proceso, se manipularon las perillas del microblock en las direcciones x , y y z . De esta manera se tenía un control micrométrico sobre la misma, aumentando la precisión para una correcta alineación.

Simulación

El proceso de simulación para este experimento consistió en utilizar COMSOL Multiphysics para simular el comportamiento de la fibra PCF. Esta es una fibra monomodal, por lo que su simulación permite anticipar como serán los fotones señal y acompañante en función de la longitud de onda de los fotones de bombeo.

Un aspecto importante de esta simulación es determinar el índice de refracción efectivo de la fibra estudiada. Este valor es fundamental para realizar una simulación precisa en los softwares COMSOL y MATLAB. Con el índice de refracción efectivo establecido, se puede utilizar la ecuación de empatamiento de fase (ecuación 10) para evaluar si la fibra, bajo las condiciones establecidas y con el índice de refracción efectivo obtenido, cumplirá con las condiciones necesarias para que el resultado de la ecuación sea igual a cero y, por lo tanto, se genere la pareja de fotones entrelazados.

Una vez obtenidos los resultados de la simulación, se generó un diagrama de empatamiento de fase donde se representan las longitudes de onda. Estos gráficos brindan información relevante sobre las longitudes de onda exactas en las que se espera que se generen los fotones señal y acompañante. Estos datos, posteriormente fueron comparados con un algoritmo

genético interno, lo cual ayudó a determinar las longitudes de onda en las cuales es posible crear parejas de fotones para la fibra PCF.

Resultados

Se realizaron detecciones para los fotones señal mediante el espectrómetro Ocean Optics. Los resultados se muestran en la figura 6 en un diagrama de empatamiento de fase. En este se observan los resultados de las mediciones experimentales realizadas en un rango de longitud de onda de bombeo de 720 nm hasta 740 nm para los procesos XXXX y YYYY.

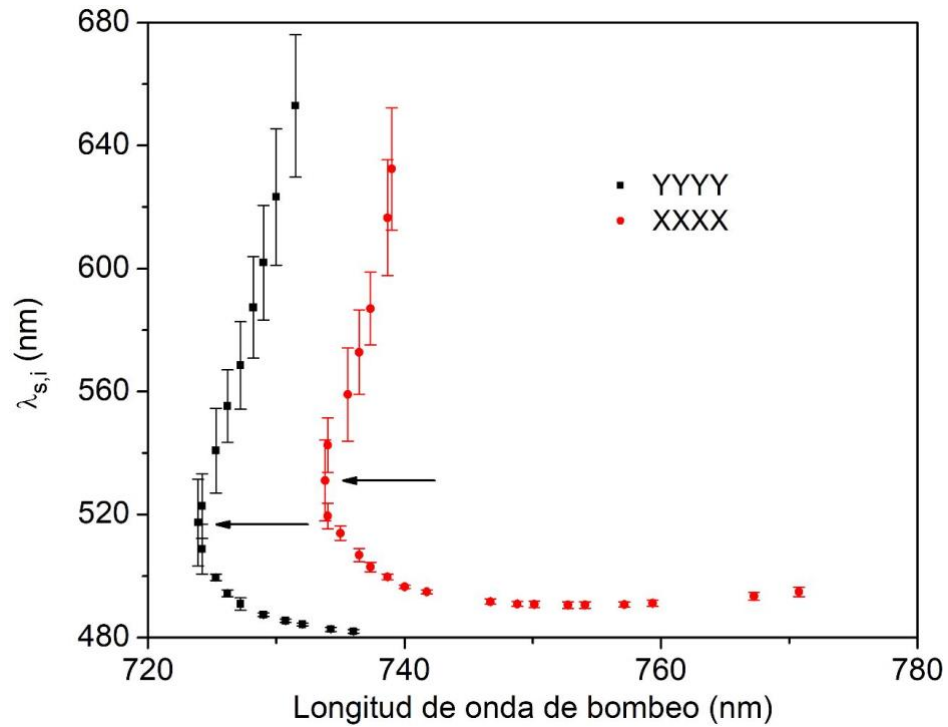


Figura 6. Diagrama empatamiento de fase para fotones de bombeo y señal polarizados en el eje x (rojo), y en el eje y (negro). Los fotones en la inflexión están señalizados con una flecha negra.

Los puntos rojos de la gráfica corresponden a la polarización en el eje x (eje lento) tanto de los fotones de bombeo como del señal y acompañante. Similarmente, los puntos negros corresponden a una polarización en el eje y (eje rápido).

La bisagra superior y la bisagra inferior de Tukey representan el ancho espectral de los fotones detectados. Se puede observar que, a partir de los fotones en la inflexión señalizados con flechas negras, la longitud entre las bisagras de Tukey aumenta. Esto supone una energía

mayor para los fotones y, por lo tanto, una mayor probabilidad de observarlos con el equipo disponible. Al contrario, los fotones en la curva externa del gráfico tienen un ancho espectral muy delgado y son más difíciles de ser detectados.

Las mediciones con el espectrógrafo Ocean son más rápidas, sin embargo, presentan un error mayor que la CCD intensificada Andor debido a que su resolución es menor. Para determinar el error percibido se realizaron seis mediciones en diferentes longitudes de onda de bombeo tanto con el espectrómetro Ocean como con el Andor (Figura 7a). Se realizó un ajuste con una gaussiana invertida para encontrar las longitudes de onda centrales y se calculó la diferencia de las observadas en Ocean y Andor (Figura 7b). El promedio de los errores resultantes fue de 0.268 nm y no fue significativo para los resultados.

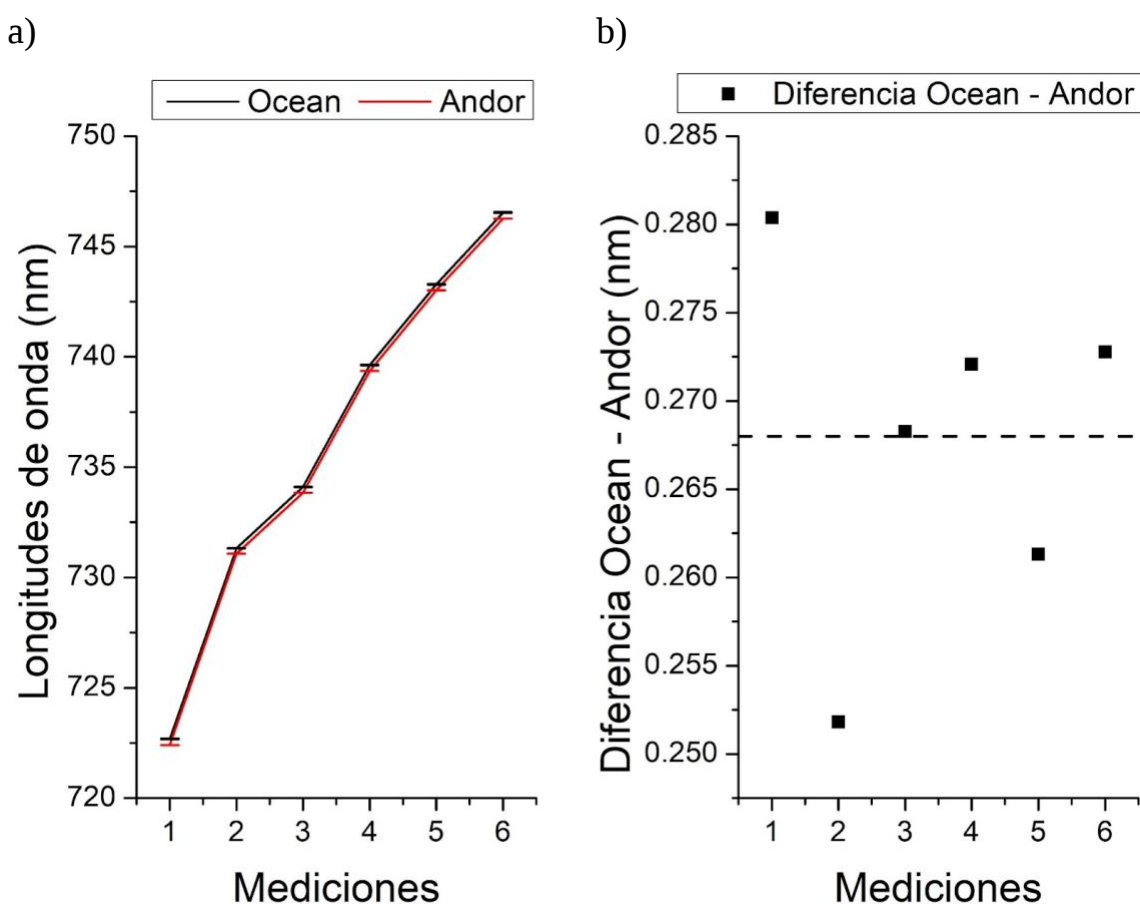


Figura 7. Mediciones con espectrógrafo Ocean y Andor a) longitud de onda en cada medición, b) diferencia de longitud de onda y promedio en 0.268 nm señalado con línea punteada.

La conservación de energía sucede tanto para los fotones internos como para los externos. Por lo tanto, la posición de los fotones acompañantes de cada fotón señal observado en la figura 6 se pudo obtener mediante la ecuación 5 y se graficó. El resultado se muestra en la figura 8. El eje x de la gráfica corresponde a las longitudes de onda de los fotones de bombeo y el eje y a las de los fotones generados.

Las parejas de interés se encuentran en la parte interna de las curvas XXXX y YYY Y entre 520 nm y 1200 nm. De la misma manera, es preferible escoger parejas cuya diferencia de frecuencia sea maximizada pues de esta manera resulta más sencillo filtrar el ruido del bombeo.

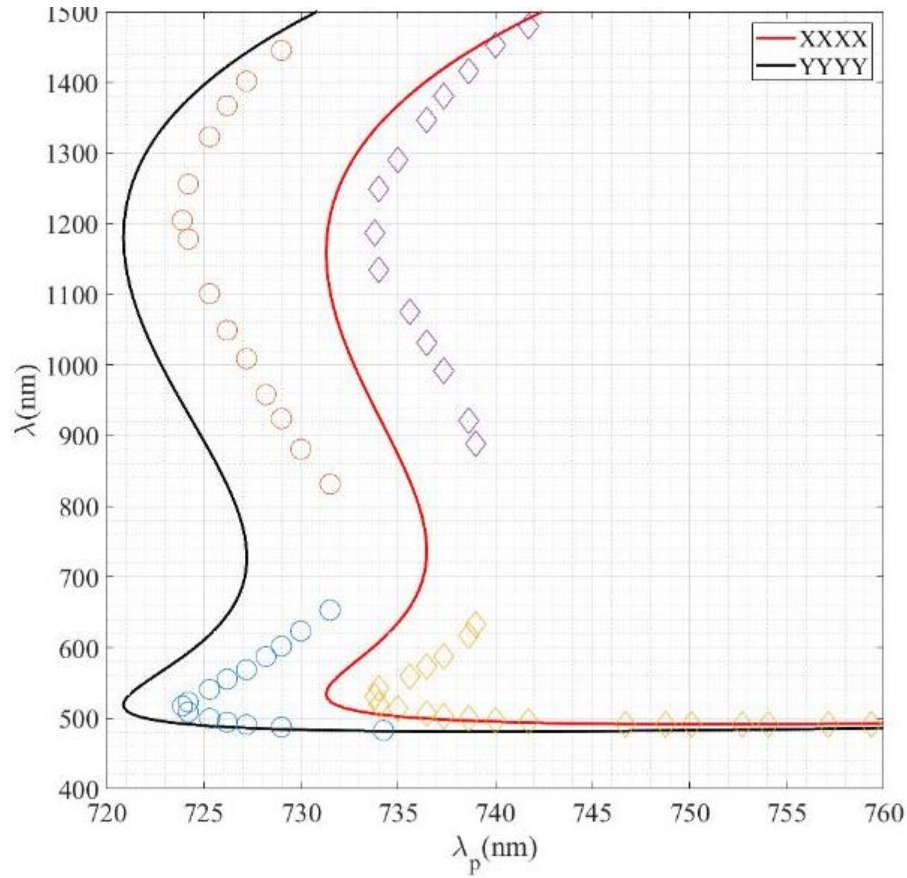


Figura 8. Diagrama emparejamiento de fase para fotones de bombeo, señal y acompañante, polarizados en el eje x (rojo), y en el eje y (negro). Los fotones de trabajo están señalizados con una flecha negra.

Una pareja prometedora es la que corresponde al fotón señal con $\lambda_s = 600 \text{ nm}$ y $\lambda_p = 724 \text{ nm}$. Para determinar λ_i se despeja y resuelve la ecuación 10 como:

$$\Delta k = k_{p1}(\omega_{p1}) + k_{p2}(\omega_{p2}) - k_s(\omega_s) - k_i(\omega_i) = 0$$

Si $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ y $\lambda_{p1} = \lambda_{p2}$, entonces:

$$\Delta k = 2\pi \left(\frac{2}{\lambda_p} - \frac{1}{\lambda_s} - \frac{1}{\lambda_i} \right) = 0$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{2}{\lambda_p} - \frac{1}{\lambda_s}$$

Sustituyendo λ_p y λ_s por los valores conocidos:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{2}{724 \text{ nm}} - \frac{1}{600 \text{ nm}}$$

$$\lambda_i = \left(\frac{2}{724 \text{ nm}} - \frac{1}{600 \text{ nm}} \right)^{-1}$$

$$\lambda_i \approx 912 \text{ nm}$$

El resultado numérico corresponde con el diagrama de fase en la figura 8. Las líneas sólidas en la figura 8 corresponden a las simulaciones que se hicieron con los datos experimentales de Ref. 8. En dicho artículo se trabajan con longitudes de onda desde 740 nm hasta 860 nm. En cambio, en el presente trabajo el interés está en los fenómenos que se presentan con longitudes de onda desde 720 nm hasta 740 nm. El modelo teórico de Ref. 8 se extendió hasta estas longitudes de onda para predecir un comportamiento aproximado al real. Sin embargo, se observa un desfase entre las simulaciones y los resultados experimentales, por lo que es necesario reformular la simulación, obtener el índice de refracción efectivo que más se acerque a los resultados reales, resolver la ecuación 9 con él y asegurar $\Delta k = 0$.

1.6. Valoración de productos, resultados e impactos

En este proyecto se generaron y caracterizaron parejas de fotones entrelazados a partir del fenómeno mezclado de cuatro ondas en el régimen espontáneo en una fibra óptica de cristal fotónico. Además, a partir de un diagrama de empaquetamiento de fase, se determinaron posibles longitudes de onda para trabajar. Una longitud de onda de bombeo óptima se encuentra entre 720 nm y 740 nm que corresponde a fotones señal entre 540 nm y 660 nm y sus acompañantes

entre 800 nm y 1200 nm. Esto debido a que a dichas ondas de bombeo se generan las parejas de fotones y en esas longitudes de fotones señal estos tienen un mayor ancho espectral, lo cual supone una mayor energía y, por ende, una mayor detectabilidad.

En general, las parejas de fotones entrelazados de interés serán determinadas por limitaciones experimentales como que los fotones de bombeo tengan longitudes de onda a las que el láser TiSa puede sintonizarse con pérdidas mínimas (alrededor de 800 nm). Asimismo, es importante considerar que la cámara utilizada para detectar los fotones pierde eficiencia cuando la longitud de onda de los fotones emitidos supera los 900 nm.

Es importante resaltar que, para un procesamiento escalable de información, son necesarios al menos dos cúbits. El siguiente paso del PAP será desarrollar un nuevo tipo de compuerta cuántica que utilice óptica integrada basada en la literatura [25] para manipular la polarización de los fotones basada en una puerta anunciada NOT controlada (CNOT). Como los cúbits basados en polarización tienen un espacio de Hilbert de tan solo dos dimensiones, no óptimo para el procesamiento de información cuántica [26], se deben buscar bases alternativas que también permitan crear cúbits de fotones individuales.

Una alternativa que reside en espacios de Hilbert con una gran cantidad de dimensiones es la base de modo temporal. Esta base es menos susceptible a perturbaciones y se puede usar con compuertas cuánticas pulsadas basadas en interacciones no lineales de conversión de frecuencias. Con estos principios se crean los cúbits de color, donde su estado cuántico puede estar en una frecuencia u otra.

En próximas etapas se buscará reproducir el efecto en las compuertas basadas en la polarización de forma simulada y establecer un análogo no lineal aplicable a cúbits de color. Dicha compuerta podría utilizarse para redes cuánticas totalmente ópticas y repetidores cuánticos, lo que podría mejorar la eficiencia de la computación cuántica y ayudar a crear circuitos cuánticos más complejos.

1.7. Bibliografía y otros recursos

- [1] T. D. Ladd, F. Jelezko, R. Laflamme, Y. Nakamura, C. Monroe, and J. L. O'Brien, "Quantum computers," *Nature*, vol. 464, no. 7285, pp. 45–53, Mar. 2010, doi: 10.1038/nature08812.
- [2] M. Njorbuenu, B. Swar, and P. Zavorsky, "A Survey on the Impacts of Quantum Computers on Information Security," in 2019 2nd International Conference on Data Intelligence and Security (ICDIS), South Padre Island, TX, USA: IEEE, Jun. 2019, pp. 212–218. doi: 10.1109/ICDIS.2019.00039.
- [3] H.-S. Zhong et al., "Quantum computational advantage using photons," *Science*, vol. 370, no. 6523, pp. 1460–1463, Dec. 2020, doi: 10.1126/science.abe8770.
- [4] H.-L. Huang, D. Wu, D. Fan, and X. Zhu, "Superconducting Quantum Computing: A Review," 2020, doi: 10.48550/ARXIV.2006.10433.
- [5] K. Garay-Palmett et al., "Photon pair-state preparation with tailored spectral properties by spontaneous four-wave mixing in photonic-crystal fiber," *Opt. Express*, vol. 15, no. 22, p. 14870, 2007, doi: 10.1364/OE.15.014870.
- [6] D. F. G. Ziehl. "50 años CICESE". https://www.cicese.edu.mx/assets/docs/Cicese-los-primeros-40-agnos_pw.pdf. https://www.cicese.edu.mx/assets/docs/Cicese-los-primeros-40-agnos_pw.pdf (accedido el 11 de junio de 2023).
- [7] Blais, A., Girvin, S.M. & Oliver, W.D. "Quantum information processing and quantum optics with circuit quantum electrodynamics," *Nat. Phys.* 2020;16, 247–256.
- [8] D. De la Torre-Robles, F. Dominguez-Serna, G. L. Osorio, A. B. U'Ren, D. Bermudez, and K. Garay-Palmett, "Frequency and polarization emission properties of a photon-pair source based on a photonic crystal fiber," *Sci Rep*, vol. 11, no. 1, p. 18092, Sep. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-97563-2.
- [9] I.L.C. Michael, A. Nielsen. "Quantum Computation and Quantum Information," Cambridge University. *Phys; Rev.* 2010;(128) (6321), 75-79

- [10] Y. Shaked, Y. Michael, R. Z. Vered, et al., "Lifting the bandwidth limit of optical homodyne measurement with broadband parametric amplification," *Nat. Commun.*, vol. 9, p. 609, 2018. doi: 10.1038/s41467-018-03083-5
- [11] P. E. Powers and J. W. Haus, "Fundamentals of nonlinear optics, Second edition," Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.
- [12] R. W. Boyd, "Nonlinear optics," 3rd ed. Amsterdam ; Boston: Academic Press, 2008.
- [13] G. S. Agarwal, "Quantum optics," Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [14] R. H. Stolen and A. Ashkin, "Optical Kerr effect in glass waveguide," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 22, no. 6, pp. 294-296, 1973.
- [15] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, "Fundamentals of photonics," Third edition. in Wiley series in pure and applied optics. Hoboken, NJ: Wiley, 2019.
- [16] A. Kumar and A. K. Ghatak, "Polarization of light with applications in optical fibers. in Tutorial texts in optical engineering," no. v. TT90. Bellingham, Wash: SPIE Press, 2011.
- [17] Technical, FIBRA OPTICA. MONOMODO O MULTIMODO. (2020). Accessed: Jun. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.technical.cat/apunts-tecnics/cas-fibra-optica-monomodo-multimodo-apuntes-tecnics-technical-manresa-igualada.pdf>
- [18] A. Yariv, P. Yeh, and A. Yariv, *Photonics: optical electronics in modern communications*, 6th ed. in The Oxford series in electrical and computer engineering. New York: Oxford University Press, 2007.
- [19] Instituto Nacional Departamento de Física, Óptica III. (2012). Accessed: Jul. 2, 2023. [Online]. Available: <https://institutonacional.cl/wp-content/uploads/2017/11/Gui%CC%81a-Refraccio%CC%81n-NAC.-2017.pdf>
- [20] T. Z. Abbas, "Fiber Optics," Ph.D thesis ,UOT,2012.

- [21] D. Marcuse, Theory of dielectric optical waveguides, 2nd ed. Boston: Academic Press, 1991.
- [22] K. Garay-Palmett, D. B. Kim, Y. Zhang, F. A. Domínguez-Serna, V. O. Lorenz, and A. B. U'Ren, “Fiber-based photon-pair generation: tutorial,” J. Opt. Soc. Am. B, vol. 40, no. 3, p. 469, Mar. 2023, doi: 10.1364/JOSAB.478008.
- [23] R. H. Stolen, M. A. Bösch, and C. Lin, “Phase matching in birefringent fibers,” Opt. Lett., vol. 6, no. 5, p. 213, May 1981, doi: 10.1364/OL.6.000213.
- [24] S. Rashleigh, “Origins and control of polarization effects in single-mode fibers,” J. Lightwave Technol., vol. 1, no. 2, pp. 312–331, 1983, doi: 10.1109/JLT.1983.1072121
- [25] T. B. Pittman, B. C. Jacobs, and J. D. Franson. “Probabilistic quantum logic operations using polarizing beam splitters,” Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University, 2001, doi: 10.1103/PhysRevA.64.062311.
- [26] Aguayo-Alvarado, A.L., Domínguez-Serna, F., Cruz, W.D.L. et al. “An integrated photonic circuit for color qubit preparation by third-order nonlinear interactions,” Sci Rep, 12, 5154. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-09116-w.

2. Productos

Nombre y código del PAP	4G03 Programa de Apoyo a Centros de Investigación Externos I
Nombre del proyecto	Generación y caracterización de parejas de fotones entrelazados a partir del fenómeno mezclado de cuatro ondas en el régimen espontáneo en una fibra óptica que soporta un modo espacial y mantiene la polarización.

Descripción (qué es, para quién se realizó y para qué es):	Reporte del mezclado de cuatro ondas experimental y de los distintos procesos de mezcla de polarización soportados en la fibra PCF. Se realizó para establecer una metodología para la caracterización geométrica de medios no lineales a través de mediciones experimentales. Además, puede ser base para diseñar otras fuentes de estados no clásicos de luz con aplicación en procesamiento de información cuántica.
Autores:	Carmen Sofía Vergara Interián

3. Reflexión crítica y ética de la experiencia

El RPAP tiene también como propósito documentar la reflexión sobre los aprendizajes en sus múltiples dimensiones, las implicaciones éticas y los aportes sociales del proyecto para compartir una comprensión crítica y amplia de las problemáticas en las que se intervino.

3.1 Sensibilización ante las realidades

Pude interactuar con personas fuera del entorno en el que normalmente me desenvuelvo. Fue común conocer personas con diferentes experiencias de vida. Además, tuve la oportunidad de colaborar con ellas y obtener una gran cantidad de conocimiento que no tenía. Hay varias distinciones entre estos individuos y yo debido a nuestras circunstancias únicas. Sin embargo, nos relacionamos de manera amable y respetuosa, siempre considerando las perspectivas del otro.

Mi comportamiento se debe en parte a mis creencias y en parte a mis razonamientos, ya que en gran medida mis creencias están basadas en mis razonamientos. Siempre he creído que la armonía se logra manteniendo una mente abierta ante las diferencias entre personas. Esta

mentalidad resultó ser positiva en este caso, ya que todos los participantes del proyecto compartíamos esta actitud.

La colaboración en la comunidad científica y el acceso libre a la información son fundamentales para mí. A pesar de que eran de otro centro universitario, me gustó mucho que los profesores y alumnos se mostraron siempre dispuestos a colaborar y ayudarme cuando no estaba bien familiarizado con los conceptos o técnicas. Con mis habilidades, hice lo mismo y logré que trabajáramos de manera armoniosa. Lo crucial es trabajar juntos para avanzar en la sociedad, ya que, como ingenieros y científicos, nuestra prioridad debe ser crear productos que contribuyan al progreso, siempre teniendo en cuenta las necesidades de los demás.

3.2 Aprendizajes logrados

Dado que no estaba familiarizada con laboratorios de óptica, al inicio del PAP tuve dificultades para comprender la utilidad de cada uno de los elementos que se usarían para el montaje experimental. Finalmente, no solo adquirí una comprensión de lo mencionado, sino que también tuve la oportunidad de utilizar estos conocimientos en un proyecto de alta calidad, colaborando con investigadores experimentados.

Considero que el acompañamiento que se da a los alumnos en CICESE es destacable, brindando libertad y, simultáneamente, guías para llevar a cabo proyectos de calidad. El proyecto en el que trabajé no comenzó desde cero, sin embargo, se preocuparon porque yo tuviera una comprensión amplia del tema y me dieron bastante libertad para idear y proponer. Al inicio, estaba un poco abrumada porque no comprendía los conceptos que en el grupo LINOC se manejan coloquialmente, sin embargo, mientras leí artículos que me recomendaban, veía videos de clases que me compartían, e independientemente realizaba la investigación para el presente PAP, logré tener una claridad que no esperaba. Me quedó completamente claro que la colaboración científica es el escalón hacia el progreso.

Tuve que enfrentar una variedad de desafíos durante el proyecto, incluido aprender a comunicarme bien con mis superiores y trabajar juntos con ellos. Aprendí a encontrar soluciones a problemas y a superar el miedo de exponer mis ideas.

3.3 Inventario de competencias Inicial (ingreso del PAP) e Inventario de competencias Final (salida al PAP).

Competencia		Evidencia	Relevancia/Fortaleza	Competencias nuevas	Competencias potencializadas
Conocimientos	Sobre el proceso de acoplamiento de la luz proveniente de un láser de titanio:zafiro a la fibra óptica.	Optimizar eficazmente la eficiencia de acoplamiento a la fibra.	Fundamentos de un montaje experimental.	Llevé un registro claro de los procedimientos y actividades para comprender los elementos del montaje experimental.	Mi conocimiento sobre elementos ampliamente utilizados en óptica.
	Sobre el proceso de generación de estados comprimidos monomodales mediante la mezcla de cuatro ondas	Investigué cómo se utiliza módulo de diseño para la fibra óptica a utilizar en el experimento	Eficazmente simular las propiedades dispersivas de la fibra óptica utilizada.	Preparación de una segunda fase del montaje experimental con espejos dicróicos.	Creación de otros procesos no lineales.
	Cálculo del grado de compresión para una fuente basada en el mezclado de cuatro ondas en el régimen espontáneo.	La generación de parejas de fotones.	Factorabilidad pareja de electrones, ajuste de frecuencia y control de ancho de banda.	Relacionar conceptos teóricos aprendidos en clase con un proyecto tangible.	Poner en práctica mis conocimientos adquiridos y ligarlos con experiencias nuevas para el desarrollo de un proyecto completo y bien elaborado.
Habilidades	Caracterización de una fuente de estados comprimidos.	Lo logré mediante el uso del equipo de laboratorio para estados comprimidos bimodales	Sé utilizar diferentes equipos de caracterización de nanomateriales e interpretar la información arrojada por los mismos.	Relacionar conceptos teóricos aprendidos en clase con un proyecto tangible.	Poner en práctica mis conocimientos previos y ligarlos con experiencias nuevas para el desarrollo de un proyecto completo y bien elaborado.
	Medición de espectros de generación en cuentas simples del modo visible de la pareja de fotones que se obtiene del proceso de mezclado de cuatro ondas en el régimen espontáneo.	Mediante el uso de un monocromador y una CCD intensificada.	Tengo conocimiento técnico para utilizar el monocromador y una CCD intensificada.	Conocer mis recursos y juzgarlos con base en sus alcances y limitaciones.	Tomar en cuenta los errores de los aparatos de medición en un entorno experimental.

	Interpretar los resultados de la simulación del índice efectivo dependiente de la longitud de onda.	Mediante el estudio de las propiedades de empataimiento de fases de la fibra óptica.	Consolidación de implementaciones basadas en fibra de fuentes de pares de fotones.	Conocer la lógica detrás de las simulaciones.	Observar, predecir y comparar resultados teóricos, experimentales y de simulación.
Actitudes	Facilidad para trabajar en diferentes ambientes.	Me adapté a los cambios de mi entorno y busqué alternativas para lograr mis objetivos	Puedo desarrollarme bajo distintas situaciones laborales dentro de mi carrera.	Comunicarme efectivamente con mis compañeros de proyecto y los coordinadores del mismo. Utilizar un diálogo de respeto y colaboración.	Proponer ideas y asegurarme autónomamente que sean viables y hacerme responsable de que se lleven a cabo.
	Administración de tiempos.	Supe balancear la carga de trabajo con la escolar, organizándome de manera efectiva.	Puedo realizar un proyecto sin descuidar otros aspectos de la vida diaria, cuidando no bajar la calidad de mi trabajo.	Priorizar tareas y administrar mis tiempos.	Mi habilidad para contribuir en un trabajo científico de alto nivel.
	Desempeño autónomo.	Trabajé de manera autónoma, dividiendo la carga de trabajo a mi criterio y cumpliendo los requisitos impuestos por mi supervisor.	Puedo llevar a cabo proyectos de manera más independiente, siendo orientada por objetivos más que por instrucciones específicas.	Búsqueda de información y análisis individual. Saber preguntar dudas cuando surgen.	Fase del estado del arte en un proyecto científico.

El PAP mejoró mis habilidades de trabajo en equipo, la comunicación y la cooperación. De la misma manera, me ayudó a aterrizar aprendizajes teóricos sobre las técnicas de óptica, me ayudó a aprender a realizar las etapas de planeación de un proyecto y me ayudó a aprender a ser más autónoma. El proyecto actual me inspiró a compartir mis ideas y discutir las con los compañeros de proyecto para juntos tomar mejores decisiones sobre cómo organizarlo.