



Universidad de Concepción  
Dirección de Postgrado  
Facultad de Ingeniería -Programa de Magister en ciencias de la ingeniería con  
mención en ingeniería eléctrica

## **Implementación de un enrutador de fotones basado en un interferómetro de Sagnac**

Tesis para optar al grado de Magister en ciencias de la ingeniería con  
mención en ingeniería eléctrica

Alvaro Sebastián Alarcón Cuevas  
CONCEPCIÓN-CHILE  
2017

Profesor Guía: Guilherme Barreto Xavier  
Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería  
Universidad de Concepción

## Resumen

En la actualidad, las telecomunicaciones se han convertido en una parte fundamental de la sociedad, permitiendo la conectividad entre personas en todo momento, traspaso de grandes cantidades de información, control de procesos a distancia y otros servicios de interés social, industrial y científico.

Hasta hace algunos años, tener un sistema con alta velocidad y totalmente seguro era muy complejo, debido a la falta de tecnologías y/o estudios concluyentes para poner en marcha dichos sistemas. Sin embargo, el surgimiento y la unión de las comunicaciones ópticas y las comunicaciones cuánticas hacen posible una comunicación con altos estándares de calidad, a alta velocidad y de manera muy segura para los usuarios.

A pesar de lo anterior y debido a estos rápidos crecimientos, se hace necesario contar con diversos sistemas y mecanismos para poder obtener un desempeño óptimo de estas tecnologías, entre ellos, destaca el requerimiento de compuertas controladas, que permitan el ruteo o encaminamiento de paquetes de información. Si bien en la actualidad existen algunos sistemas que pueden satisfacer esta necesidad, su complejidad a la hora de la puesta en marcha hace que su uso sea complejo.

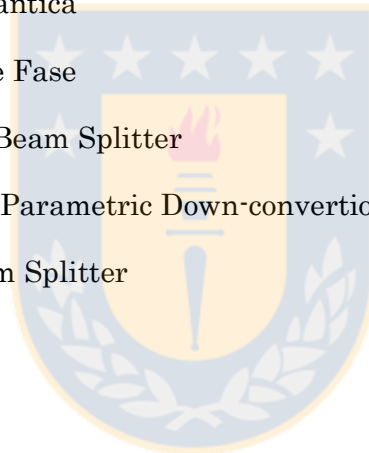
En este trabajo, se presenta una alternativa para el ruteo de fotones individuales mediante cambios de fase en un interferómetro de Sagnac. El sistema permite un desempeño independiente del estado de polarización de entrada, tiene bajas pérdidas, una alta velocidad de conmutación y es intrínsecamente estable.

# Tabla de Contenido

Resumen.....	ii
Nomenclatura.....	iv
Índice de figuras .....	v
Lista de tablas... ..	vi
1) Investigación propuesta.....	7
1.1) Introducción.....	7
1.2) Definición del problema.....	8
1.3) Hipótesis .....	8
1.4) Objetivos.....	8
1.5) Alcances, limitaciones y metodología.....	9
2) Fundamentos teóricos .....	10
2.1) Interferómetro de Sagnac.....	10
2.2) Concepto general de fotón y Qubit.....	12
2.3) Nociones básicas de mecánica cuántica .....	13
2.4) Conversión paramétrica espontánea descendente.....	15
2.5) Fibras ópticas .....	16
2.6) Componentes ópticos .....	18
2.7) Fuente generadora de fotones gemelos .....	21
3) Discusión bibliográfica .....	22
3.1) De la configuración de la fuente generadora de fotones gemelos. ....	22
3.2) De los experimentos y caracterizaciones del interferómetro de Sagnac. ....	23
3.3) De los distintos esquemas ruteadores de fotones.....	26
3.4) Análisis pre-eliminar antes de la puesta en marcha .....	31
4) Fundamentos teóricos e implementación del Setup propuesto .....	32
4.1) Setup propuesto.....	32
4.2) Cálculos sobre estados de entrada arbitrarios .....	34
4.3) Resultados .....	37
4.4) Análisis de resultados .....	42
5) Conclusiones .....	43
5.1) Conclusión .....	43
5.2) Trabajos futuros .....	43
6) Bibliografía.....	44

## Nomenclatura

<b>APC</b>	: Angle Physical contact
<b>BS</b>	: Beam Splitter
<b>EOM</b>	: Electro-Optic Modulator
<b>FMP</b>	: Fibra mantenedora de polarización
<b>IS</b>	: Interferómetro de Sagnac
<b>MC</b>	: Mecánica Cuántica
<b>MF</b>	: Modulador de Fase
<b>PBS</b>	: Polarization Beam Splitter
<b>SPDC</b>	: Spontaneous Parametric Down-conversion
<b>TBS</b>	: Tunable Beam Splitter



## Índice de figuras

Figura 1: Esquema de un interferómetro de Sagnac. [10] .....	10
Figura 2: Conos generados en un cristal PPKTP y ubicación de los fotones gemelos. (a) tipo I (b) tipo II [4].....	15
Figura 3: Esquema de una fibra óptica y forma de viaje de la luz en su interior [9] .....	16
Figura 4: tipos de conectores en una fibra óptica [9] .....	17
Figura 5: circulador óptico [fuente: elaboración propia].....	18
Figura 6: Esquema de un BS [fuente: elaboración propia].....	18
Figura 7: Esquema de un PBS [fuente: elaboración propia].....	19
Figura 8: División de Pol. en un PBS [fuente: elaboración propia].....	19
Figura 9: Esquema de un modulador de fase [10] .....	20
Figura 10: Controlador manual de polarización [10] .....	20
Figura 11: Fuente de fotones gemelos [fuente: elaboración propia] .....	21
Figura 12: Setup propuesto por R.Rojas-Laguna [5] .....	23
Figura 13: Int. de Sagnac con 10 [m] de fibra de alta birrefringencia [6] .....	25
Figura 14: Dependencia de la temperatura en un int. de Sagnac [6] .....	25
Figura 15: Ruteo de fotones con variación del haz de bombeo [7].....	27
Figura 16: Salida característica de un MZ mediante variaciones de fase en uno de tus brazos [8].....	28
Figura 17: Setup propuesto para un TBS [8].....	29
Figura 18: Curva característica del BTS propuesto [8] .....	30
Figura 19: Esquema propuesto [fuente: elaboración propia].....	32
Figura 20: Funciones de probabilidad teóricas [fuente: elaboración propia].....	36
Figura 21: Desempeño de modulación frente a delay aplicado al sistema [fuente: elaboración propia] .....	38
Figura 22: Ruteo de fotones individuales mediante cambios de fase para polarización horizontal y diagonal (datos normalizados) [fuente: elaboración propia].....	40
Figura 23: Ruteo de fotones individuales mediante cambios de fase para polarización vertical y anti diagonal(datos normalizados) [fuente: elaboración propia] .....	41

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1: características de los componentes ópticos [fuente: elaboración propia]</b> .....	37
<b>Tabla 2: Valor medio de cuentas en APDs [fuente: elaboración propia]</b> .....	39
<b>Tabla 3: Desviaciones estándar en cada APD [fuente: elaboración propia]</b> .....	40
<b>Tabla 4: Visibilidades calculadas[fuente: elaboración propia]</b> .....	42



# 1) Investigación propuesta

## 1.1) Introducción

En el presente trabajo, se muestra una nueva alternativa para hacer posible el ruteo espacial de luz, en particular, de fotones individuales a través de un circuito óptico.

A grandes rasgos, el sistema ocupa variados fenómenos físicos para realizar el ruteo de fotones, entre los que destacan la interferencia óptica, la modulación de fase de pulsos y las propiedades básicas de un interferómetro de Sagnac, el cual tiene la particularidad de ser auto-estable, a diferencia de la mayoría de los demás interferómetros que necesitan de costosos y complejos sistemas de estabilización para su correcto funcionamiento .

La motivación central de esta investigación, es el gran avance que han experimentado las redes ópticas en el mundo, y en particular, el potente avance de las redes cuánticas, las cuales necesitan de sistemas de ruteo para controlar la propagación de fotones individuales en su interior. Además, resultaría importante poder contar con un sistema que sea independiente del estado de polarización de entrada.

En este informe se presentan los distintos experimentos relacionados al tema, los cuales ayudarán a reafirmar la factibilidad de la propuesta, así como la importancia de generar un sistema ruteador de fotones, junto con ello, se hace un acercamiento a la mecánica cuántica, tanto sus aplicaciones como a la teoría necesaria para entender la problemática actual que se quiere solucionar. Se hace referencia también a los componentes ópticos necesarios para la construcción del sistema completo, así como la caracterización y funcionamiento de ellos. También se explica de manera general la construcción de una fuente de fotones gemelos basada en conversión paramétrica espontánea descendente.

En particular, el ruteador de fotones que se propone en este trabajo está basado en un interferómetro de Sagnac, por lo tanto también se mencionan las propiedades más relevantes de este, y se justifica el por qué de su elección.

Finalmente, se muestran los cálculos asociados a la propuesta, los cuales demuestran su funcionamiento para cualquier estado de entrada y la puesta en marcha del sistema y los resultados de las mediciones experimentales.

## **1.2) Definición del problema**

Las redes ópticas y cuánticas, necesitan sistemas de ruteo internos, de tal manera de poder controlar a voluntad el flujo de fotones y tener el control de la información circulante.

Para que un ruteador cumpla con las exigencias actuales, debe cumplir con ciertas condiciones de diseño, como una alta velocidad de ruteo, bajas pérdidas e independencia del estado de polarización de entrada. Si a eso se añade un sistema robusto y/o estable en el tiempo, de bajos costos operacionales y de reducida complejidad en comparación a los demás setup propuestos, entonces será aplicable a las redes actuales.

La problemática actual, es que si bien existen algunos sistemas de ruteo ópticos, la complejidad de su diseño es muy elevada, así como los sistemas de estabilización que estas requieren. Es por eso, que a lo largo de esta tesis se presentará una alternativa que cumple todas las condiciones de diseño anteriormente mencionadas, de tal forma de hacer fácil su implementación en las redes cuánticas.

## **1.3) Hipótesis**

Se puede hacer ruteo de fotones individuales dentro de un interferómetro de Sagnac, basado en cambios de fase en su interior, independiente del estado de polarización de entrada al sistema.

## **1.4) Objetivos**

### **1.4.1) Objetivo General**

Desarrollar e implementar experimentalmente un enrutador de fotones individuales para la aplicación en sistemas de información cuántica, convirtiendo este experimento, en un módulo para operar sobre redes cuánticas que requieran operación a alta velocidad, bajas pérdidas y estabilidad en el tiempo. Además, el sistema debe funcionar independientemente del estado de polarización de entrada.



### **1.4.2) Objetivos específicos**

En la actualidad, se ha demostrado que se puede implementar enrutador de fotones ajustable en base a cambios de fase en su interior. Sin embargo, los sistemas requieren de sistemas muy complicados y costosos para su estabilización. Por lo tanto, los objetivos específicos del proyecto son:

- 1- Optimizar el diseño de un enrutador, implementando la idea sobre un interferómetro de Sagnac
- 2- Caracterizar el interferómetro con una fuente de luz tradicional (Laser o Led), de tal forma de obtener información sobre parámetros tales como el nivel de pérdidas y estabilidad en polarización.
- 3- Caracterizar todos los componentes que se usarán en el interferómetro, tanto en fibra como en espacio libre.
- 4- Usar una fuente generadora de fotones gemelos operando en 1550 [nm] con una señal de bombeo de 775[nm] aprox. Esta fuente debe tener bien definida la polarización de salida de los fotones.
- 5- Implementar el ruteo de fotones mediante cambios de fase en los brazos del interferómetro. Generar curvas características de operación y algunas gráficas de estabilización de la fuente.
- 6- Comprobar que el sistema funciona para cualquier estado de polarización de entrada, y con particular interés, en la base lógica (horizontal y vertical) y diagonal (+45 y -45)

### **1.5) Alcances, limitaciones y metodología**

Para realizar la propuesta de trabajo explicada en este informe, se debe hacer una recopilación de toda la teoría necesaria para un completo entendimiento del sistema. Una vez hecho esto, es necesaria una caracterización de todos los componentes ópticos, es decir, verificar un funcionamiento correcto de cada uno de ellos y dar un especial énfasis en las pérdidas ópticas generadas, ya que uno de los objetivos de este trabajo es minimizar la pérdida total.

Una vez puesto en funcionamiento el sistema, se debe testear el funcionamiento esperado y realizar diversas curvas características, de tal manera de demostrar el ruteo dentro del interferómetro mediante cambios de fase, así como la independencia del estado de polarización de entrada.

Para todo lo anterior, se usará el equipamiento disponible en el laboratorio de Optrónica de la Universidad de Concepción, que en gran medida es de la empresa Thorlabs .

Como este trabajo se basa en la puesta en marcha de un interferómetro óptico en fibras ópticas y algunas secciones en espacio libre, las limitaciones del experimento vienen dadas por las tolerancias y rangos de trabajo de los componentes internos del interferómetro, así como la precisión de las fuentes de luz y los fotodetectores.

## 2) Fundamentos teóricos

### 2.1) Interferómetro de Sagnac

Un interferómetro es una configuración óptica que aprovecha la interferencia de la luz para realizar distintos tipos de mediciones o transformaciones sobre un rayo de luz. Dentro de este sistema, la luz tiene la opción de recorrer distintos caminos físicos y generalmente el rayo de entrada se divide en dos o más fracciones, luego se recombinan las señales, que han ganado en su trayecto distintas fases u otras propiedades. Al momento de recombinar los rayos de luz, la señal resultante dependerá de estas fases de cada camino, pudiendo obtener una señal constructiva o destructiva.

Existe una gran variedad de interferómetros en la actualidad y sus usos son de amplio uso en el campo de la investigación y en la industria. Para el caso de este trabajo, el interferómetro que se usará es un Sagnac. La figura[1] muestra el funcionamiento básico de este sistema.

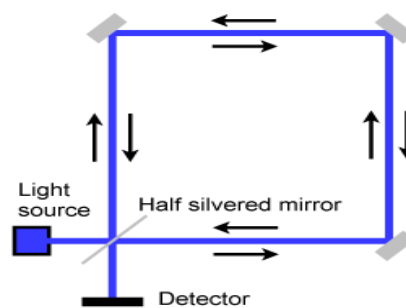


Figura 1: Esquema de un interferómetro de Sagnac. [10]

Acá se observa que un rayo de luz de entrada es dividido en dos por un BS. Ambos rayos recorren dos trayectorias ópticas diferentes y luego se recombinan en el mismo punto, sin embargo, cualquier sentido que tome el haz de luz, ya sea horario o

anti horario, al momento de recombinarse ambos habrán recorrido la misma longitud física. Esto último toma una gran importancia si se considera que se usará el fenómeno de interferencia para realizar las mediciones, ya que este se produce cuando dos o más rayos de luz se superponen en una región del espacio. Para entender esto, se asumen dos rayos de luz monocromáticos que pueden ser representados por sus campos eléctricos como muestran las siguientes ecuaciones:

$$\vec{E}_1 = \vec{A}_1 e^{j(\omega t + \phi_1)} \quad (1)$$

$$\vec{E}_2 = \vec{A}_2 e^{j(\omega t + \phi_2)} \quad (2)$$

Se observa de las ecuaciones (1) y (2) que ambos rayos de luz puede ser representado por su amplitud  $\vec{A}$ , fase  $\phi$  y frecuencia  $\omega$ . La intensidad total en el punto donde dos rayos de luz interfieren, es proporcional a la amplitud del módulo de la suma de los dos fasores vistos en las ecuaciones (1) y (2), es decir, la intensidad de la interferencia puede ser estimada como :

$$I \propto |E_1 + E_2|^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\phi_2 - \phi_1) \quad (3)$$

Se observa de la ecuación (3) que la interferencia depende directamente de la diferencia de fases que exista entre los dos rayos que se superponen. La interferencia es máxima (constructiva) cuando  $\phi_2 = \phi_1$ , ya que  $I = (A_1 + A_2)^2$  y la interferencia es mínima (destruktiva) cuando  $\phi_2$  y  $\phi_1$  forman un ángulo de  $180^\circ$  entre ellas, ya que  $I = (A_1 - A_2)^2$ . Nótese que para el caso de que  $A_1$  y  $A_2$  sean iguales, la intensidad de la interferencia es cero y la suma es completamente destruktiva. [9]

De lo anterior se desprende entonces que la interferencia depende de variados factores, pero tal vez la más relevante es la fase con que cuenten ambos rayos. Como se presentará más adelante en el documento, si se puede modificar la fase en uno de los brazos del interferómetro (o de ambos) con un dispositivo adicional (modulador de fase), entonces se podría controlar a voluntad la señal de salida del sistema, haciendo interferencias constructivas o destruktivas como se desee.

Como conclusión final, se debe notar que independiente del camino que tomen los rayos de luz luego del BS de entrada, la distancia que ambos recorren es la misma, es por eso que el interferómetro de Sagnac es auto-estable en camino y no se necesita de complejos sistemas de estabilización, ya que por su diseño los caminos se complementan, incluso si uno de los brazos es más grande que el otro, el recorrido final de los dos. rayos debe coincidir

## 2.2) Concepto general de fotón y Qubit

Un fotón puede tener distintas interpretaciones dependiendo del campo de estudio, sin embargo, para efectos de este trabajo, se entenderá un fotón como un paquete discreto de energía que es la componente fundamental de la luz. La energía de un fotón se define como:

$$E = hf \quad (4)$$

Donde  $h$  es la constante de Planck y  $f$  es la frecuencia del fotón, la cual está directamente relacionada con la longitud de onda mediante la ecuación (5)

$$c = \lambda f \quad (5)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el medio de transmisión.

El concepto de Qubit es normalmente asociado con el término bit que se usa en comunicaciones clásicas, donde este último, hace referencia a la unidad mínima de información. Un bit puede tomar valores discretos tales como 1 o 0 y en base a distintos tipos de codificación, se pueden interpretar diversos tipos de mensajes entre un emisor y un receptor. Un Qubit en cambio, es una unidad de información que se usa en mecánica cuántica, que a diferencia de un bit clásico, este último se rige por el principio de superposición cuántica como se muestra a continuación:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (6)$$

donde  $|\psi\rangle$  es un Qubit,  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes normalizadas tal que  $\alpha^2 + \beta^2 = 1$ , además,  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$  son elementos ortogonales en el espacio de Hilbert de dimensión 2 (normalmente se refieren a estados de polarización horizontal  $|H\rangle$  y vertical  $|V\rangle$ ).

La ecuación (6) también se puede entender como que un Qubit puede ser una combinación lineal de dos elementos ortogonales de una base cualquiera, por lo tanto, dependiendo de los valores  $\alpha$  y  $\beta$ , el Qubit puede tomar un gran número de valores diferentes. Esta propiedad es clave en las comunicaciones cuánticas, ya que con solo un Qubit se puede tener una cantidad de estados igual a la cantidad de combinaciones lineales que se puedan generar, sin embargo, en la práctica esto puede traer algunos problemas de distinguibilidad de estados.

Los elementos ortogonales en el campo experimental, pueden ser los diversos grados de libertad que ofrece una partícula o un paquete de energía como su spin, niveles de energía, puntos cuánticos, caminos dentro de un interferómetro o polarización, siendo esta última propiedad la más importante para este trabajo, ya que se trabaja sobre la polarización de los fotones generados desde la fuente.

Usualmente, estos ket  $|H\rangle$  y  $|V\rangle$  son representados con los siguientes vectores:

$$|H\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad |V\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Las demás polarizaciones usadas son combinaciones lineales de estos ket, y se representan como se muestra a continuación:

$$|45\rangle = |H\rangle + |V\rangle \quad |-45\rangle = |H\rangle - |V\rangle \quad (8)$$

$$|R\rangle = |H\rangle + i|V\rangle \quad |L\rangle = |H\rangle - i|V\rangle \quad (9)$$

Donde 45,-45,R y L representan el estado de polarización diagonal, anti diagonal, circular derecho y circular izquierdo respectivamente, además, “i” representa la unidad imaginaria.

### 2.3) Nociones básicas de mecánica cuántica

La mecánica cuántica (MC) es la rama de las ciencias que se encarga de explicar el comportamiento de la materia y la energía en escalas atómicas y subatómicas. Ella intenta describir las interacciones entre partículas tales como átomos, protones, electrones y paquetes de energías discretos como los fotones. Estos últimos son los de mayor interés para este proyecto de tesis.

A lo largo del tiempo, se ha comprobado que el comportamiento de los elementos a estas pequeñas escalas no es intuitivo y tiene muy pocas similitudes con la escala macroscópica, la cual es más familiar para el ser humano. Es por este motivo, que muchos físicos de renombre[1] han sido muy escépticos en este tema, ya que la mecánica cuántica a pesar de ser una rama que ha sido capaz de explicar muchos fenómenos que antes no tenían soluciones teóricas, hasta el día de hoy, no hay un acuerdo común en el proceso de medición, porque a diferencia de la física clásica, cualquier tipo de medición realizado en un experimento cuántico, genera una perturbación que inevitablemente provoca una alteración en los resultados adquiridos.

La MC se puede resumir y entender en base a sus cuatro postulados más importantes los cuales son

**Espacio de estado:** Los estados de un sistema cuántico pueden describirse matemáticamente en sobre un espacio vectorial complejo, que tiene bien definido su producto interior , el cual es llamado Espacio de Hilbert. Para el caso de este estudio, el estado de mayor importancia es la polarización de un fotón, la cuales pueden ser horizontal, vertical, diagonal, anti diagonal, circular derecha e izquierda. Todas ellas pueden ser representadas por un vector (ket) y es posible operar sobre estos vectores mediante operaciones matriciales.

**Evolución de un estado:** A medida que pasa el tiempo en un sistema cuántico, un estado puede ir modificando su valor. En MC ,Dicho cambio es representado por un operador unitario aplicado sobre el estado en cuestión, y normalmente suele ser representado como  $U$ . En otras palabras, si suponemos que se tiene un estado representado por  $|\psi\rangle$  en el instante  $t_1$  y  $|\psi'\rangle$  representa el estado en  $t_2$ , entonces:

$$|\psi'\rangle = U|\psi\rangle \quad (10)$$

**Medición Cuántica:** Las cantidades o variables que pueden ser observadas en la mecánica cuántica son descritas mediante operadores hermíticos y los posibles resultados de la medición son los valores propios de estos operadores

**Sistema Compuesto:** Corresponde al producto tensorial entre los espacios de Hilbert de sus componentes iniciales. Por ejemplo, si se tienen dos estados definidos como  $|\psi\rangle$  y  $|\phi\rangle$ , entonces, el sistema compuesto  $|y\rangle$  de ambos será:

$$|y\rangle = |\psi\rangle \otimes |\phi\rangle \quad (11)$$

La comunicaciones cuánticas actuales, al igual que las comunicaciones clásicas, pueden ser caracterizadas por un transmisor, canal y receptor, sin embargo, la notación estándar para el transmisor es Alice y el Receptor es Bob.

## 2.4) Conversión paramétrica espontánea descendente

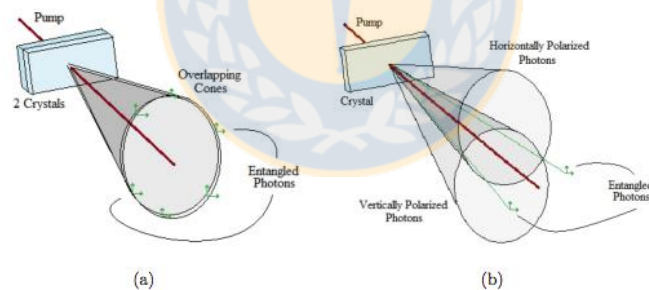
La SPDC es un proceso óptico en el cual es posible generar un par de fotones entrelazados partir de un fotón incidente, de tal manera de cumplir con el proceso de conservación de energía (Momentum) como muestra la siguiente ecuación:

$$f_i = f_1 + f_2 \quad (12)$$

$$K_i = k_1 + k_2 \quad (13)$$

Este proceso no necesita de un campo o señal externa de bombeo para estimular la conversión (aparte de la luz de entrada), es por ello que es llamado un evento espontaneo, además, depende de los parámetros del campo de entrada, como la fase, polarización, longitud de onda y amplitud, es por ello que es llamado paramétrico.

Dentro de las características más relevantes en la conversión de fotones entrelazados, es la polarización que estos tendrán. Un cristal puede generar dos fotones gemelos con polarizaciones idénticas (ortogonales a la señal de entrada), en cuyo caso se dirá que es una conversión de tipo I, o bien se puede generar un par de fotones con polarizaciones ortogonales entre ambos y en ese caso se habla de una conversión tipo II.



**Figura 2: Conos generados en un cristal PPKTP y ubicación de los fotones gemelos. (a) tipo I (b) tipo II [4]**

Para la fuente generadora de fotones gemelos ,se usa un cristal tipo II y los fotones gemelos generados, tienen igual longitud de onda (la suma de sus frecuencias es igual a la frecuencia de la señal de entrada).

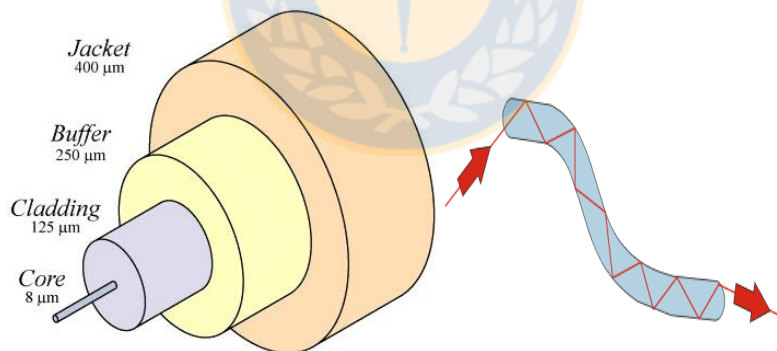
## 2.5) Fibras ópticas

La fibra óptica, es una guía de onda usada para transportar luz . Lo anterior, hace evidente que este tipo e guía, es el elemento básico y fundamental en cualquier red óptica que exista.

Dentro de sus principales ventajas con respecto a otros canales de comunicación, destaca principalmente sus bajas pérdidas por propagación, la baja interferencia provocada por señales externas y las grandes cantidades de información que pueden soportar.

El fenómeno que ocupa para transportar luz, es la reflexión interna total (TIR), la cual ocurre para determinadas condiciones de fabricación de la fibra y el ángulo de incidencia de la luz al sistema.

La forma física de una fibra óptica se divide en dos secciones importantes las cuales son el núcleo , que es un cilindro de radio “a” y caracterizado por un índice de refracción “ $n_1$ ” y es por donde la luz o información recorre de extremo a extremo, y el cladding, el cual es un revestimiento del núcleo, que posee un índice de refracción “ $n_2$ ”. Finalmente, tiene diversos recubrimientos que cumplen la función de protección de perturbaciones mecánicas externas, como torsiones u otros movimientos que podrían causar desgaste del material. La siguiente figura muestra el diagrama básico de una fibra óptica y la forma típica de transmisión



**Figura 3: Esquema de una fibra óptica y forma de viaje de la luz en su interior [9]**

Las fibras ópticas pueden ser clasificadas de distintas maneras, dependiendo de sus características e construcción, por ejemplo por la forma de su conector, formas de transportar la luz o longitud de onda de trabajo.

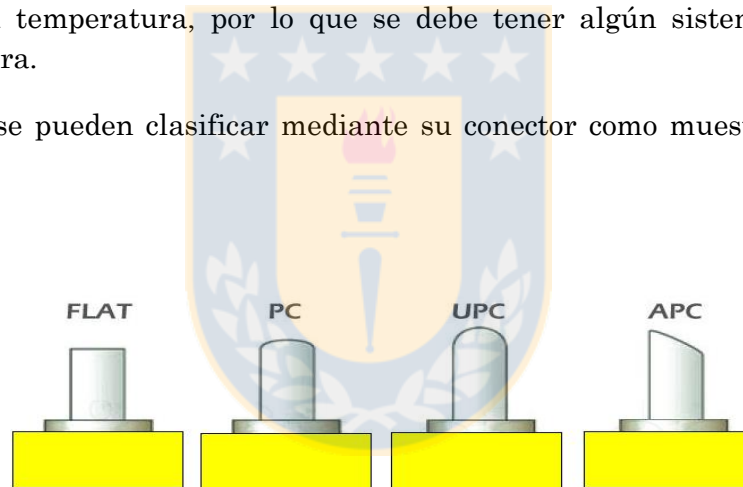
La clasificación más usada es por modos de propagación en su interior, acá es donde aparecen las fibras monomodo y multimodo. Una fibra monomodo, como lo dice su



nombre, solo transporta un modo de propagación y es el modo fundamental. Es la fibra más usada en telecomunicaciones, ya que permite trabajar con grandes cantidades de información (varios THz). La fibra multimodo es más barata y es más fácil de trabajar, ya que tiene un área del núcleo mucho mayor que la monomodo, lo cual implica que acoplar luz en su interior es menos complejo que la monomodo. Sin embargo, al transportar muchos modos de propagación en su interior, hace que el ancho de banda máximo al que pueden trabajar, sea menor (un máximo de 1GHz aproximadamente).

Al ser la fibra óptica un material birrefringente, se producen desfases entre componentes espaciales de los campos eléctricos y magnéticos, lo cual produce que la polarización de la luz de entrada cambie una vez que ingrese a una fibra óptica, y más aún si existen perturbaciones mecánicas en la guía. Sin embargo, existe un tipo de fibra óptica especial llamada “mantenedora de polarización”, la cual como lo dice su nombre, es capaz de suprimir los cambios no deseados a lo largo del viaje del haz en la fibra y permite conservar el estado de polarización a la entrada, sin embargo, es susceptible a la temperatura, por lo que se debe tener algún sistema de aislación mínimo en la fibra.

Finalmente, se pueden clasificar mediante su conector como muestra la siguiente imagen:



**Figura 4: tipos de conectores en una fibra óptica [9]**

El conector que se usa más frecuentemente la actualidad es el conector PC, sin embargo, es el conector APC el que se usará frecuentemente en el setup propuesto en este trabajo. Esto ya que en algunas etapas, se necesita pasar luz desde la fibra óptica al espacio libre y viceversa. En este proceso, normalmente existen fenómenos de reflexión muy intensos que pueden tener gran incidencia en los resultados finales. El conector APC, tiene la particularidad de reducir estas reflexiones por retorno atenuándolas hasta en 60 dB.

## 2.6) Componentes ópticos

Antes de pasar al setup experimental, se necesita hacer un recorrido por todos los componentes ópticos fundamentales que estarán en el sistema. A continuación se presentan sus características más relevantes y su funcionamiento básico, además de explicar algunos procesos de caracterización de manera breve

### 2.6.1) Circulador óptico

Un circulador es un componente óptico hecho de fibra óptica que tiene 3 puertos por donde la luz puede ingresar, los cuales normalmente están etiquetados con números consecutivos (1,2 y 3). El circulador tiene la particularidad de permitir la entrada en uno de sus puertos y solo permitir el paso de luz al puerto siguiente, por ejemplo, si ingresa luz en el puerto 1, solo debería existir un paso de luz en el puerto 2 y nada en el puerto 3, por otro lado, si ingresa luz al puerto 2, la onda debe viajar hasta el puerto 3 y no al 1. Si el haz ingresa en el 3, debe existir total aislación de la luz. El siguiente esquema muestra lo anteriormente explicado:

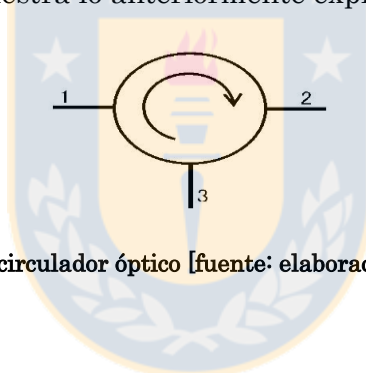


Figura 5: circulador óptico [fuente: elaboración propia]

### 2.6.2) Beam Splitter (BS)

Un BS es un dispositivo óptico que en este experimento está hecho de fibra óptica y tiene 4 puertos enumerados desde el 1 al 4. Dependiendo del puerto en que se conecte una fuente de luz, esta será dividida en 2 en alguna proporción, la cual está indicada por el fabricante. Para el caso de este estudio, se necesita que el BS divida un haz de entrada en 2 partes iguales en potencia, para ello se debe conectar la fuente de luz en el puerto 3 y el haz se divide en igual proporción en los puertos 1 y 2 (según el fabricante). El puerto 4 será usado como una salida alternativa del sistema como se explicará más adelante. La figura 6, muestra un esquema del BS en fibra:



Figura 6: Esquema de un BS [fuente: elaboración propia]

### 2.6.3) Polarization Beam Splitter (PBS)

Un PBS es un dispositivo óptico que en este experimento está compuesto de fibra óptica y en algunas etapas también funciona en espacio libre, el cual tiene una entrada y dos salidas, en las cuales el haz de entrada se dividirá en dos, dependiendo de la polarización de entrada. Cada una de estas salidas está confeccionada para permitir el paso de una polarización específica, las cuales son  $|H\rangle$  y  $|V\rangle$ . El siguiente esquema explica el funcionamiento antes explicado:



Figura 7: Esquema de un PBS [fuente: elaboración propia]

Si se asume una fuente de luz que emite un haz de luz con polarización desconocida del tipo  $|\psi\rangle = \alpha|H\rangle + \beta|V\rangle$  y se conecta en el puerto 1, entonces las salidas en el puerto 2 y 3 serán  $\alpha|H\rangle$  y  $\beta|V\rangle$  respectivamente. La figura 8 explica lo anteriormente dicho:



Figura 8: División de Pol. en un PBS [fuente: elaboración propia]

#### 2.6.4) Modulador de fase

Un elemento clave en el desarrollo de este proyecto es el modulador de fase. Este dispositivo es electro-óptico y tiene la capacidad de cambiar la fase de un haz de entrada al sistema. La siguiente figura muestra el esquema de un modulador de fase :

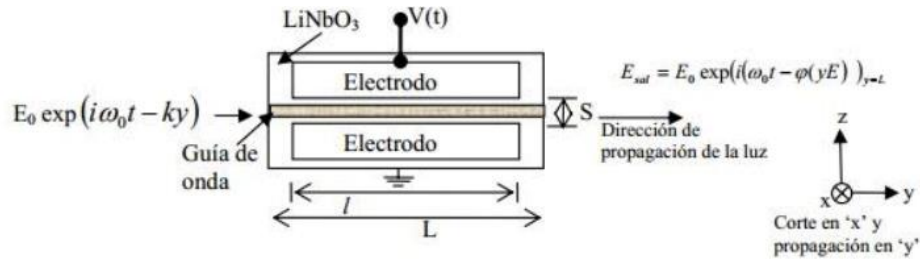


Figura 9: Esquema de un modulador de fase [10]

La modulación del haz de luz incidente se hace mediante un voltaje externo aplicado al dispositivo, el cual genera cambios en el índice de refracción de las guías de onda del modulador, lo cual genera un cambio en la fase en la señal de entrada.

Para el caso de esta propuesta, el modulador de fase está hecho de fibra óptica PM en ambos extremos y sus conectores son APC.

#### 2.6.5) Controlador de polarización Manual (CPM)

El CPM Es un dispositivo capaz de controlar y/o cambiar el estado de polarización de un haz de entrada. Esto lo logra realizando torsiones a una fibra óptica que recorre por el interior del dispositivo, como muestra la figura a continuación:

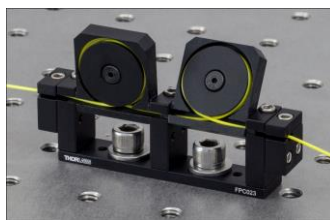


Figura 10: Controlador manual de polarización [10]

Desde el punto de vista matemático, lo que hace un CPM es una transformación matricial al haz de entrada, equivalentemente a aplicar los operadores de Jones a un vector arbitrario. La transformación siempre dependerá del ángulo en que estén posicionadas las placas.

## 2.7) Fuente generadora de fotones gemelos

Para realizar las distintas pruebas del ruteador de fotones, es necesario tener una fuente generadora de fotones. Las alternativas para ello son diversas, por ejemplo, una fuente con pulsos fuertemente atenuados, que previamente pasan por un modulador óptico y un control de polarización. Sin embargo, para este trabajo se opta por una fuente generadora de fotones gemelos, construida a partir de un cristal PPKTP tipo II, operando con una luz de entrada de 775 [nm] y fotones gemelos de salida a 1545 [nm] .

Luego de este proceso de generación, se usa un fotón como trigger, para las etapas de sincronización electrónica, en particular, el cálculo o estimación de Delay de la señal de información. El otro fotón, va directo al interferómetro para ser ruteado mediante cambios de fase. El esquema de la fuente generadora es el siguiente:

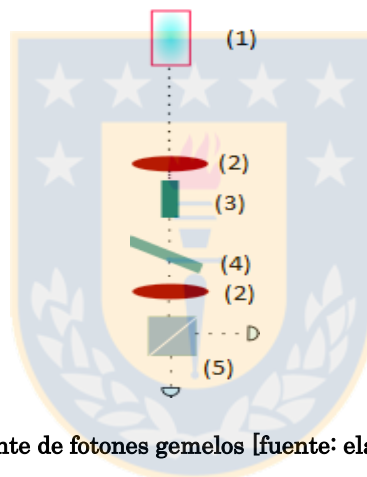


Figura 11: Fuente de fotones gemelos [fuente: elaboración propia]

En la figura anterior, (1) representa un laser que sirve de bombeo para el cristal PPKTP (3). (2) representan acopladores de espacio libre- fibra. además, (4) representa un filtro dicróico, el cual refleja longitudes de onda bajo 1300[nm] y transmite longitudes de onda superior. Finalmente, (5) representa un PBS que separará el fotón que sirve como trigger y el fotón que será ruteado.

La fuente de fotones funciona con un haz de entrada de 775[nm] y los pares generados son a 1550[nm]. La potencia de bombeo es de 1mw y para el experimento, se generan alrededor de 500 pares de fotones en coincidencia.

### 3) Discusión bibliográfica

#### 3.1) De la configuración de la fuente generadora de fotones gemelos.

Actualmente, existen diversas formas de generar fotones para los experimentos de comunicaciones cuánticas. Entre todas ellas destacan las técnicas de atenuar fuertemente un haz de luz para obtener fotones individuales o la conversión paramétrica descendente, siendo esta última la opción elegida en este proyecto de tesis.

- *“Two-photon Entanglement in type II Parametric down conversion”*, Morton H. Rubin, Physical Review Letters, 1994.

Este es uno de los primeros artículos que se escribieron sobre este tema, y gran parte de las fuentes con entrelazamiento que se usan hasta hoy, son similares a este estudio, incluyendo obviamente esta propuesta de tesis.

Se explica que para un correcto entrelazamiento en polarización, se debe considerar el ancho de banda ubicado delante de los detectores del sistema, así como de la longitud del cristal.

En el documento también se explica el proceso de conservación de Momentum antes y después de la conversión, como se explicó anteriormente y que implica hablar de una conversión tipo II.

Finalmente, cabe recalcar que este tipo de conversión es de muy baja eficiencia de conversión, y este proceso es probabilístico. Es por eso que se necesita un filtro dicróico que filtre la mayor parte de la luz que pase el cristal, ya que probablemente no son fotones gemelos, si no que es de las mismas características de la luz de bombeo.

### 3.2) De los experimentos y caracterizaciones del interferómetro de Sagnac.

En la actualidad, existen muchos experimentos con el interferómetro de Sagnac, por ejemplo cuando es usado como un giroscopio, para medir la velocidad angular de un sistema. Sin embargo, no son de particular interés para esta propuesta de tesis. Es por eso que a continuación se muestran dos artículos que si puede resultar de ayuda para análisis futuros, y tienen relación con la transmitancia y reflexión de un interferómetro de Sagnac.

- *“Teoría del interferómetro de Sagnac de fibra de baja birrefringencia y torcida”*, R. Rojas Laguna, Instituto nacional de astrofísica, óptica y electrónica, Revista Mexicana de las ciencias, febrero 2001.

En este documento se presenta de manera numérica el comportamiento de un interferómetro de Sagnac ante diversas torsiones realizadas en su interior. El interferómetro es probado con fibras de baja birrefringencia, a diferencia del resto de los experimentos que eran de alta birrefringencia.

El setup propuesto por R. Rojas Laguna es el siguiente:

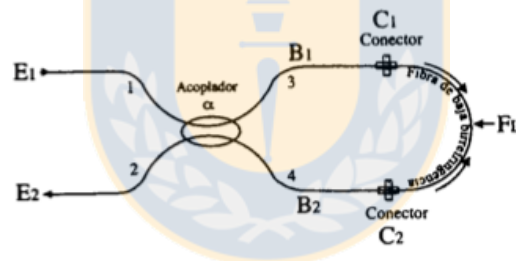


Figura 12: Setup propuesto por R.Rojas-Laguna [5]

Se observa un int. De Sagnac básico realizado en fibra óptica y dos conectores etiquetados como C1 y C2, los cuales fueron usados para generar torsiones en el sistema y verificar el desempeño, ya que al ser la fibra un material birrefringente, cualquier torsión u otra deformación física que sufra, implica un cambio directo en el estado de polarización que esté presente en el setup, lo cual es equivalente a generar desfases entre componentes de campo eléctrico de una señal. La luz de entrada recorre el sistema completo, se divide en dos en el Beam Splitter y se vuelven a recombinar generando interferencia. Dependiendo de la fase entre ambos rayos, la interferencia puede ser constructiva o destructiva en los puertos 1 y 2, siendo una el complemento de la otra.

En el artículo se observa que la transmitancia de luz en cada puerta es dependiente de la torsión que exista al interior del sistema. En la actualidad, esta propuesta puede ser optimizada, ya que existen diversos componentes ópticos que bajan la complejidad y las imprecisiones de este trabajo, por ejemplo, en lugar de dos conectores para generar torsiones, se pueden usar controladores de polarización manual.

Finalmente, este documento presenta como abordar la expresión de los campos eléctricos en las salidas del sistema, dado un campo de entrada, lo cual es de gran utilidad para los cálculos propuestos en la propuesta de tesis.

- *“Interferómetro de Sagnac con fibra birrefringente y torcida en lazo”*, E. Kuzin, M. Ramírez Renero, B. Ibarra Escamilla, J. Sánchez-Mondragón, H. Cerecedo Núñez, Instituto nacional de astrofísica, óptica y electrónica, Revista Mexicana de las ciencias, febrero 1997.

Este artículo dice que la transmisión y reflexión en un interferómetro de Sagnac dependen de la birrefringencia y longitud de la fibra óptica. Presenta además, que este sistema puede funcionar como un medidor de temperaturas ambientales. Una de las hipótesis fundamentales también, es que dice que este tipo de sistemas depende de la temperatura ambiente y puede ser independiente de la polarización de entrada.

El documento presenta al Sagnac como un interferómetro auto-estable y muy robusto ante algunas perturbaciones externas.

Para efectos de la propuesta de tesis, el paper menciona que el interferómetro de Sagnac también depende de la potencia del haz de entrada, ya que podría producir algunos cambios de fase no deseados, debido a efectos no lineales característicos de la fibra óptica, los cuales producen un aumento o disminución de la transmisión (en la puerta uno del BS), así como un efecto complementario en la reflexión (puerta2 del BS). Lo anterior ya presenta algunos indicios para desarrollar sistemas de switcheo.



El esquema propuesto es el siguiente:

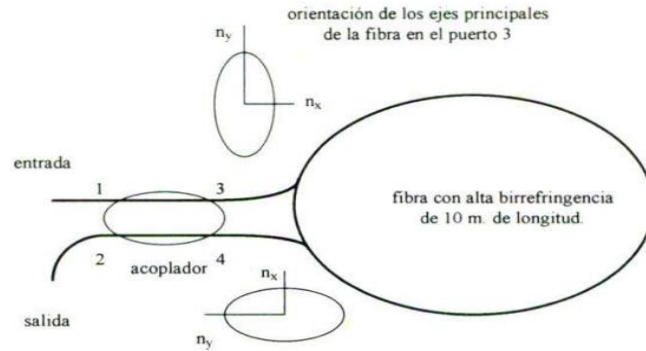


Figura 13: Int. de Sagnac con 10 [m] de fibra de alta birrefringencia [6]

Todo lo anteriormente mencionado, sumado a algunas cuentas interferométricas, y que la entrada 1 puede también funcionar como salida, la cual por simplicidad será etiquetada como “puerta 1”, y la salida 2 será la “puerta 2” del BS, entonces, la relación entre las potencias de salida serían:

$$P_{1out} = P_{1in} - P_{2out} \quad (14)$$

o de manera equivalente:

$$P_{1out} = 2 \cdot P_{1in} \alpha (1 - \alpha) (1 + \cos(\psi)) \quad (15)$$

Donde  $\psi$  es la diferencia de fase que adquieren las componentes del campo al viajar en el lazo del interferómetro y  $\alpha$  es el coeficiente de división del BS. De la ec. (15) se puede ver que la potencia de salida en ambas puertas depende de la diferencia de fase, la cual puede ser controlada externamente. Además, en este experimento no hay dependencia de la polarización de entrada.

Como se menciona anteriormente, si hay dependencia de la temperatura para este experimento, como muestra la siguiente gráfica:

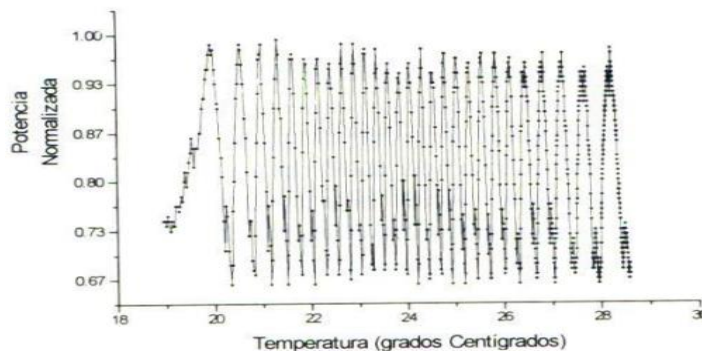


Figura 14: Dependencia de la temperatura en un int. de Sagnac [6]

Esta dependencia ocurre ya que a variaciones de temperatura, cambia la birrefringencia de la fibra, lo cual tiene relación directa con los cambios de fase en los rayos que ingresan al sistema.

De todo lo anterior, se puede concluir que para un correcto funcionamiento de nuestro setup propuesto se deben tomar en consideración algunos parámetros externos, tales como la temperatura, ya que en un ambiente con mucha fluctuación térmica existirán muchos cambios de fase no deseados, lo que incidiría directamente en los análisis finales. También se debe dejar la fibra muy fija, ya que ante pequeños cambios o torsiones, puede existir variación de potencia en las salidas.

### **3.3) De los distintos esquemas ruteadores de fotones.**

Actualmente existen muy pocos trabajos relacionados con el ruteo de fotones en redes ópticas, sin embargo, con el avance de las tecnologías cuánticas se hace imperiosamente necesario el uso de dispositivos y/o sistemas que cumplan estas funciones. A continuación se presentan dos trabajos que tienen directa relación con el trabajo de este proyecto de tesis. En ellos, existe gran parte del soporte teórico y experimental para nuestra propuesta.

- *“Ultrafast Switching of photonic Entanglement”*, Matthew A. Hall, Joseph B. Altpeter and Prem Kumar, Center for Photonic Communication and Computing, Northwestern University, Physical Review Letters, February 2011.

Este artículo plantea que se deben generar ruteadores con tres condiciones básicas: bajas pérdidas, altas velocidades de switcheo y no destruir el estado de polarización de los fotones ruteados.

El setup propuesto en este documento es muy similar al propuesto en el proyecto de tesis, sin embargo, también se agregan otros elementos para permitir hacer codificación en mayores dimensiones y multiplexar algunos fotones que ingresan al sistema.

Dentro de las distintas pruebas realizadas, la de mayor interés para la propuesta de tesis es ver el ruteo de los fotones mediante el control de la potencia de entrada al sistema, probando el rendimiento sobre 500[m] y 100[m] de fibra y observando en ambas salidas (puerta de transmisión y reflexión).

Los resultados son los siguientes:

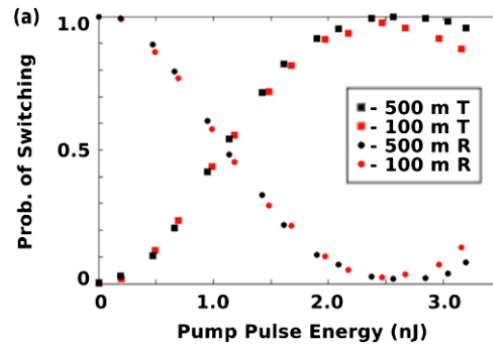


Figura 15: Ruteo de fotones con variación del haz de bombeo [7]

Se observa que ante variación de potencia del haz de entrada, la probabilidad de aparición de los fotones de aparecer en la puerta de transmisión o reflexión cambia, lo cual es equivalente a realizar un ruteo de los fotones. Se observa que para potencias cercanas a cero la mayor parte de los fotones aparecen en la puerta de reflexión (puerta de salida 1) y a medida que se inyecta mayor energía de bombeo, los fotones comienzan a ser ruteados hacia la puerta 2 (puerta de transmisión). Finalmente, existe un punto cercano a 1[nJ] en que la probabilidad de aparición de un fotón es  $\frac{1}{2}$  para cada puerta del sistema.

Para cerrar el estudio de este paper, cabe destacar que es posible hacer ruteo de fotones también con la variación de potencia desde el transmisor, a diferencia de la propuesta nuestra que es con cambios de fase en los brazos del interferómetro, sin embargo, esto deja claro que la potencia de trabajo en nuestro caso debe ser muy estable y constante, ya que ante variaciones de la fuente de luz, pueden existir ruteos no deseados que incidirán en los resultados finales.

- *“A high-speed tunable beam Splitter for feed-forward photonic quantum information processing”*, Xiao-song Ma, Stefan Zotter, Nuray Tetik, Angie Qarry, Thomas Jennewein, Anton Zeilinger, Institute for quantum Optics and Quantum information, Optical Society of america, September 2011.

Una forma alternativa de ver un ruteador de fotones individuales, es ver este tipo de sistemas como un Beam Splitter ajustable que puede cambiar la proporción de división de luz, mediante cambios de fase. En este trabajo precisamente se presenta una propuesta de TBS (Tunable beam Splitter) , basado en un modulador MZ (Mach-Zehnder) con un modulador de fase en uno de sus brazos. La idea básica para inspirarse en este tipo de interferómetros, es la característica que presentan sus dos salidas, como muestra el siguiente esquema:

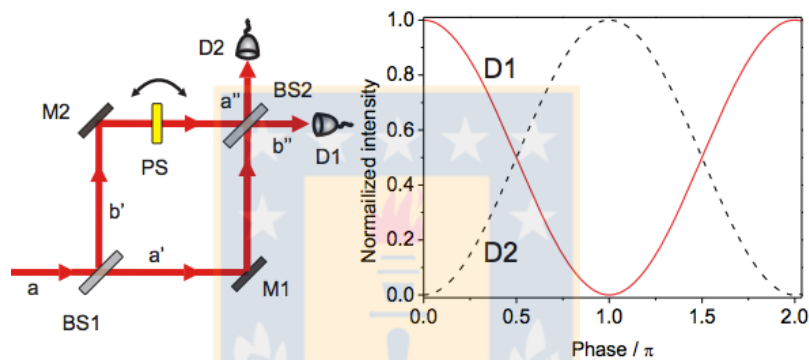


Figura 16: Salida característica de un MZ mediante variaciones de fase en uno de tus brazos [8]

Se observa que cada salida es complementaria de la otra y dependen exclusivamente de las variaciones de fase en su interior.

El esquema propuesto en este artículo para el TBS es el siguiente:

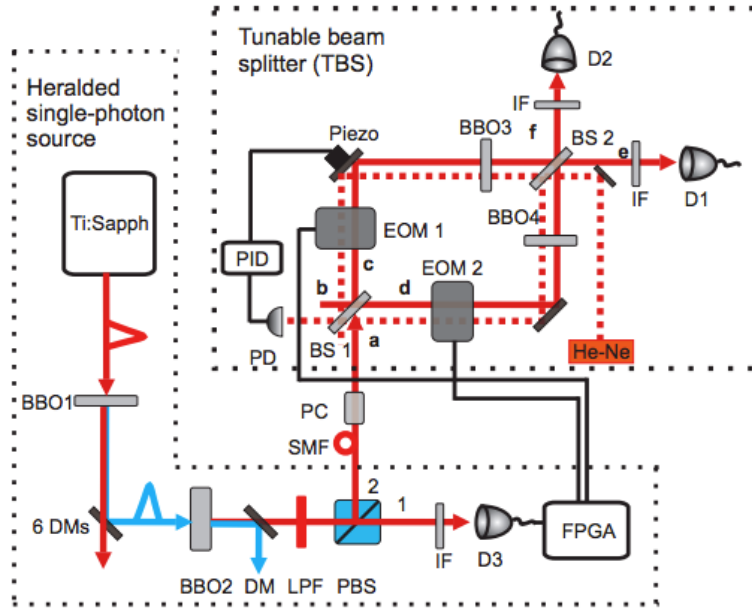


Figura 17: Setup propuesto para un TBS [8]

Se observan distintas secciones del setup total, las que incluyen una fuente generadora de fotones gemelos muy similar a la aplicada en nuestra propuesta, con algunas variaciones, junto con el TBS basado en un MZ. Se puede apreciar que se necesita de gran sincronización electrónica para llevar a cabo el proceso de detección y estabilización. Se observa también el uso de dos moduladores electro-ópticos (EOM), los cuales son controlados por una FPGA y finalmente un piezo eléctrico sincronizado con un controlador PID, el cual regula las inestabilidades propias del interferómetro, especialmente el desbalance de caminos ópticos.

Para analizar la ecuación característica de esta configuración, se supone que una señal de entrada arbitraria del tipo:

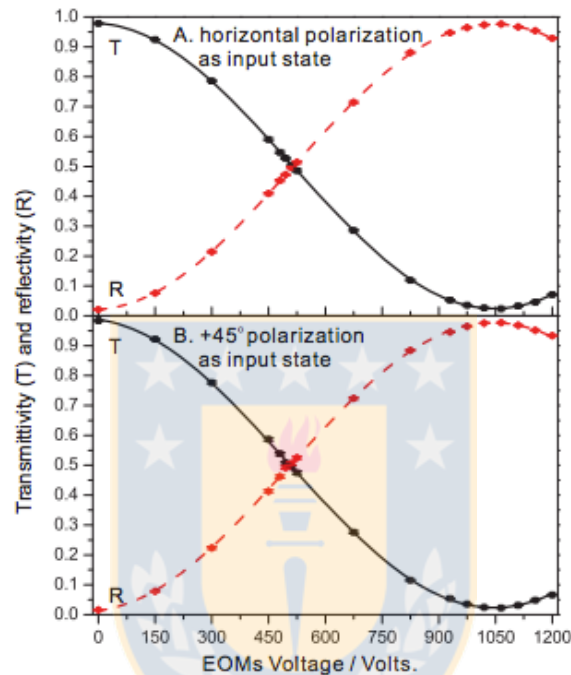
$$|\psi\rangle = (\alpha|+\rangle + \beta|-\rangle)|a\rangle \quad (16)$$

donde  $|+\rangle$  y  $|-\rangle$  son los estados de polarización diagonal y anti-diagonal respectivamente y el ket  $|a\rangle$  indica el camino por donde ingresa la luz al sistema.

Luego de algunas cuentas interferométricas, la salida del TBS está dada por la siguiente expresión:

$$|\psi'\rangle = \sin\frac{\phi(U)}{2} e^{i(\frac{3\pi}{2} - \frac{\phi(U)}{2})} (\alpha|+\rangle - \beta|-\rangle)|e\rangle + \cos\frac{\phi(U)}{2} e^{i(\frac{\pi}{2} - \frac{\phi(U)}{2})} (\alpha|+\rangle + \beta|-\rangle)|f\rangle \quad (17)$$

donde  $\phi(U)$  es el voltaje aplicado a los moduladores de fase, lo cual hace variar la fase del sistema, además, los ket  $|e\rangle$  y  $|f\rangle$  muestran la salida transmitida y reflejada respectivamente. De lo anterior se desprende que la variación de fase hace que la luz o los fotones, tengan una preferencia en la elección de la puerta de salida, lo cual es equivalente a generar un ruteo óptico. Finalmente, se muestra una gráfica en que se ingresa al interferómetro con dos estados de polarización distintos, y se varía la fase del sistema mediante los EOM:



**Figura 18: Curva característica del BTS propuesto [8]**

La figura 18 muestra de manera clara un ruteo de fotones individuales en base al cambio de fase del sistema.

Dado lo anterior, el sistema demuestra poder hacer Switching de fotones bajo la configuración propuesta, sin embargo, el sistema depende de aislamientos térmicos para un correcto funcionamiento y de complejos sistemas de estabilización electrónicos. Es en este último punto donde el setup propuesto en nuestro proyecto toma radical importancia.

### 3.4) Análisis pre-eliminar antes de la puesta en marcha

Luego de la bibliografía consultada, se puede asegurar que existen sistemas capaces de rutear fotones individuales mediante configuraciones interferométricas, además, el interferómetro de Sagnac es capaz de funcionar como un sistema en que se puede ajustar las proporciones de potencia en sus salidas, mediante torsiones u otros factores externos.

La idea es entonces, usar el interferómetro de Sagnac como un ruteador de fotones individuales, usando las propiedades anteriormente vista, además, el sistema debe funcionar independiente de la polarización de entrada y no tener complejos sistemas de estabilización.



## 4) Fundamentos teóricos e implementación del Setup propuesto

### 4.1) Setup propuesto

A partir de las secciones anteriores del informe, se puede concluir que es posible el ruteo de fotones modificando ciertos parámetros dentro de un interferómetro. También que factores externos como la temperatura y las vibraciones deben ser minimizadas para lograr un desempeño óptimo en el setup.

El ruteador de fotones individuales propuesto se basa en un interferómetro de Sagnac y un sub-interferómetro interior. Particularmente se elige este diseño ya que por sí solo este módulo es auto-estable y reduce los complejos sistemas de estabilización electrónicos de los sistemas actuales, por ejemplo los usados en la segunda parte de la sección [3.3]. Sin embargo, es recomendable que el interferómetro se encuentre aislado térmicamente, para evitar cambios de temperatura que pueden cambiar o modificar la birrefringencia de la fibra, como se muestra en la sección [3.2].

El setup propuesto es el siguiente:

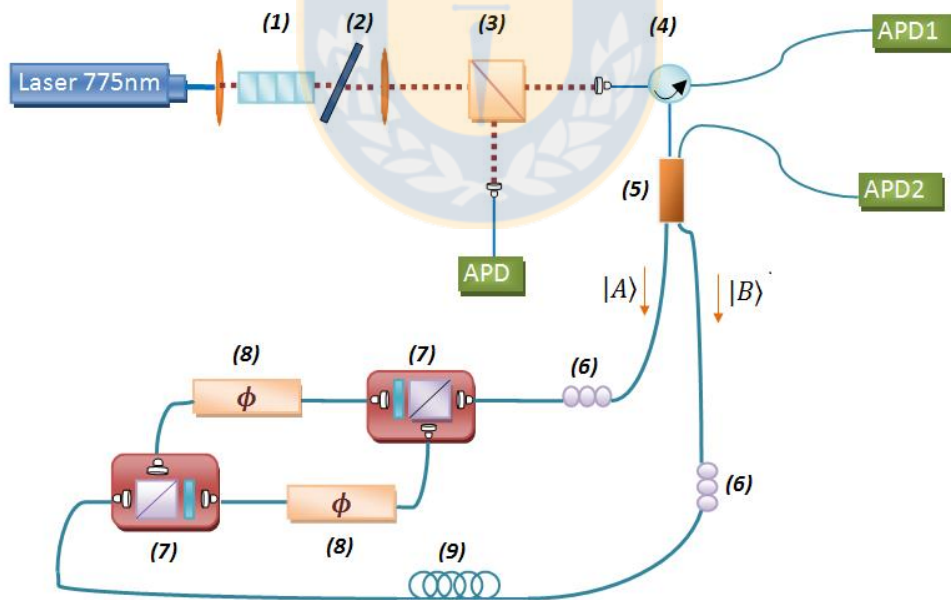


Figura 19: Esquema propuesto [fuente: elaboración propia]



En la figura anterior, se observa que desde (1) hasta (3) es la fuente generadora de fotones gemelos mostrada en la sección [2.7]. un fotón se usa como trigger, el cual llega en conexión directa por fibra óptica a un fotodetector APD . El otro fotón llega a un circulador (4) y posteriormente a un BS de fibra óptica (5). A partir de ahí comienza el interferómetro de Sagnac, con un interferómetro que tiene una forma muy parecida a un de Mach-Zehnder en su interior. La diferencia radica en que en (7) no hay BS como un MZ tradicional, si no que 2 PBS y placas de media onda. Junto con ello hay dos moduladores de fase (8), los cuales son controlados por un generador de funciones externo, los cuales aplican un voltaje continuo entre 0 a 5[v]. Finalmente (6) son controladores de polarización manual y (11) es un rollo de fibra de 100 metros, que sirve para evitar que la coherencia del haz de luz de entrada perjudique las mediciones finales, además, permitirá que los moduladores de fase actúen solo sobre el camino  $|A\rangle$  o  $|B\rangle$ . Esta condición es fundamental en el criterio de diseño.

Las dos salidas del sistemas son un puerto del BS y un puerto del circulador, los cuales van conectados a los detectores APD1 y APD2. Ambas salidas dependen de la fase inducida en los moduladores (Como se explica en la siguiente sección).

En líneas generales, una vez que un rayo de luz ingrese al sistema, el BS divide en igual proporción en potencia hacia sus dos puertas (en caso de ser un fotón individual, tiene igual probabilidad de acceder a cualquier puerta), luego, los CPM aplican una transformación unitaria sobre el haz (la cual debe ser definida) hasta llegar al interferómetro interior. Allí, los PBS separan por polarización hacia los caminos interiores y la placa de media onda, genera una rotación en  $90^\circ$  al rayo (fotón) polarizado horizontalmente. Esto para maximizar el rendimiento de los moduladores de fase, los cuales solo operan con polarización vertical. Cabe destacar que (7) es en espacio libre, por lo tanto, en esa sección hay desacople de luz en fibra para free-space, y luego vuelve a entrar en una fibra óptica PM, y es en este punto donde se genera una buena parte de las pérdidas totales del sistema.

La interferencia que determinará cuál es el camino del fotón, se produce al interior del BS.

## 4.2) Cálculos sobre estados de entrada arbitrarios

Para entender y analizar el funcionamiento del sistema, se asumirá un estado de entrada arbitrario de la forma  $|\psi\rangle = \alpha|H\rangle + \beta|V\rangle$ , y se asumen los dos sentidos de viaje como horario y anti-horario, etiquetados  $|A\rangle$  y  $|B\rangle$  respectivamente. A continuación los caminos A y B sufren las transformaciones unitarias  $U_1$  y  $U_2$  respectivamente, estas consisten en rotar una componente en  $90^\circ$  con respecto a la otra. Entonces, una vez que sufren esta variación, los estados se definen como:

$$|A\rangle = \left( \frac{\alpha|V\rangle + \beta|H\rangle}{\sqrt{2}} \right) \quad (18)$$

$$|B\rangle = \left( \frac{\alpha|H\rangle + \beta|V\rangle}{\sqrt{2}} \right) e^{\frac{i\pi}{2}} \quad (19)$$

El término  $e^{\frac{i\pi}{2}}$  representa una reflexión sufrida por el estado  $|B\rangle$ , o visto de otra forma, un parámetro que indica que la propagación es ortogonal a  $|A\rangle$ . Se observa además, que las polarizaciones de ambos estados son ortogonales. Luego de pasar por el interferómetro interno, los estados quedan definidos por:

$$|A\rangle = \left( \frac{\beta|V\rangle e^{i(\phi_1 + KL + \frac{\pi}{2})} + \alpha|H\rangle e^{i(\phi_2 + \frac{\pi}{2})}}{\sqrt{2}} \right) U_2 \quad (20)$$

$$|B\rangle = \left( \frac{\beta|V\rangle e^{i(\phi_2 + \frac{\pi}{2})} + \alpha|H\rangle e^{i(\phi_1 + KL + \frac{\pi}{2})}}{\sqrt{2}} \right) e^{\frac{i\pi}{2}} \cdot U_1 \quad (21)$$

Donde "KL" es un valor que indica una mínima diferencia de caminos dentro del sub-interferómetro, " $\phi_1$ " y " $\phi_2$ " son las fases agregadas por los EOM y el valor  $\frac{\pi}{2}$  presente en la exponencial, representa un valor de desfase que se agrega cuando hay una reflexión a causa de ambos PBS. " $U_1$ " y " $U_2$ " son las transformaciones unitarias producidas por los CPM. De acá se observa que para tener una interferencia máxima, una de estas operaciones debe rotar en  $90^\circ$  con respecto a la otra, siendo este, un criterio de diseño fundamental. Así, antes de la interferencia en el BS de fibra óptica, los estados quedan definidos como:

$$|A\rangle = \left( \frac{\beta|V\rangle e^{i(\phi_1+KL+\frac{\pi}{2})} + \alpha|H\rangle e^{i(\phi_2+\frac{\pi}{2})}}{\sqrt{2}} \right) \quad (22)$$

$$|B\rangle = \left( \frac{\alpha|H\rangle e^{i(\phi_2+\frac{\pi}{2})} + \beta|V\rangle e^{i(\phi_1+KL+\frac{\pi}{2})}}{\sqrt{2}} \right) e^{\frac{i\pi}{2}} \quad (23)$$

Como se explicó en secciones anteriores, un criterio para la puesta en marcha, es que los EOM solo deben actuar en un sentido, es decir, solo deben agregar términos de fase a un estado. De manera arbitraria y para efectos de cálculo, se asume que solo actúa en  $|A\rangle$  (siendo para  $|B\rangle$  un procedimiento análogo con resultado idéntico), entonces, bajo este criterio los estados se definen como:

$$|A\rangle = \left( \frac{\beta|V\rangle e^{i(\phi_1+KL+\frac{\pi}{2})} + \alpha|V\rangle e^{i(\phi_2+KL)}}{\sqrt{2}} \right) \quad (24)$$

$$|B\rangle = \left( \frac{\alpha|H\rangle e^{i(\frac{\pi}{2})} + \beta|V\rangle e^{i(KL+\frac{\pi}{2})}}{\sqrt{2}} \right) e^{\frac{i\pi}{2}} \quad (25)$$

Finalmente, las salidas APD1 y APD2 son:

$$|APD1\rangle = |A\rangle e^{\frac{i\pi}{2}} + |B\rangle \quad (26)$$

$$|APD2\rangle = |A\rangle + |B\rangle e^{\frac{i\pi}{2}} \quad (27)$$

Expandiendo las ecuaciones anteriores:

$$|APD1\rangle = \left[ \frac{(\beta|V\rangle e^{iKL}[e^{i\phi_1+1}] + \alpha|H\rangle [e^{i\phi_2+1}])}{2} \right] e^{i\pi} \quad (28)$$

$$|APD2\rangle = \left[ \frac{(\beta|V\rangle e^{iKL}[e^{i\phi_1-1}] + \alpha|H\rangle [e^{i\phi_2-1}])}{2} \right] e^{\frac{i\pi}{2}} \quad (29)$$

De lo anterior, se observa que las salidas a cada fotodetector dependen de las fases agregadas por los EOM, además se incluyen fases globales, las cuales pueden ser eliminadas para efectos de cálculo y no afectan las medidas finales. Se aprecia también, el término  $e^{iKL}$ , el cual solo aparece en una componente. Si este parámetro

fuera compensado por mediante algún método adicional, la polarización inicial se conservaría, sin embargo, agregaría una complejidad adicional a la propuesta inicial.

Para finalizar el diseño teórico, se calcula la amplitud de probabilidad de ambas salidas:

$$\langle APD1|APD1 \rangle = \frac{2\beta^*\beta + \beta^*\beta e^{-i\phi_1} + \beta^*\beta e^{i\phi_1} + 2\alpha^*\alpha + \alpha^*\alpha e^{i\phi_2} + \alpha^*\alpha e^{-i\phi_2}}{4} \quad (30)$$

Ahora bien, como los moduladores de fase son alimentados con el mismo generador de funciones, entonces,  $\phi_1 = \phi_2 = \phi$ , además, se debe considerar que  $\beta^*\beta + \alpha^*\alpha = 1$  para respetar las condiciones de normalización. Luego, la expresión anterior se reduce a:

$$\langle APD1|APD1 \rangle = \frac{(1 + \cos(\phi))}{2} \quad (31)$$

Análogamente, se calcula la función de probabilidad para la salida del APD2, y se obtiene:

$$\langle APD2|APD2 \rangle = \frac{(1 - \cos(\phi))}{2} \quad (32)$$

Finalmente, se presenta un gráfico de las dos amplitudes de probabilidad calculadas teóricamente anteriormente:

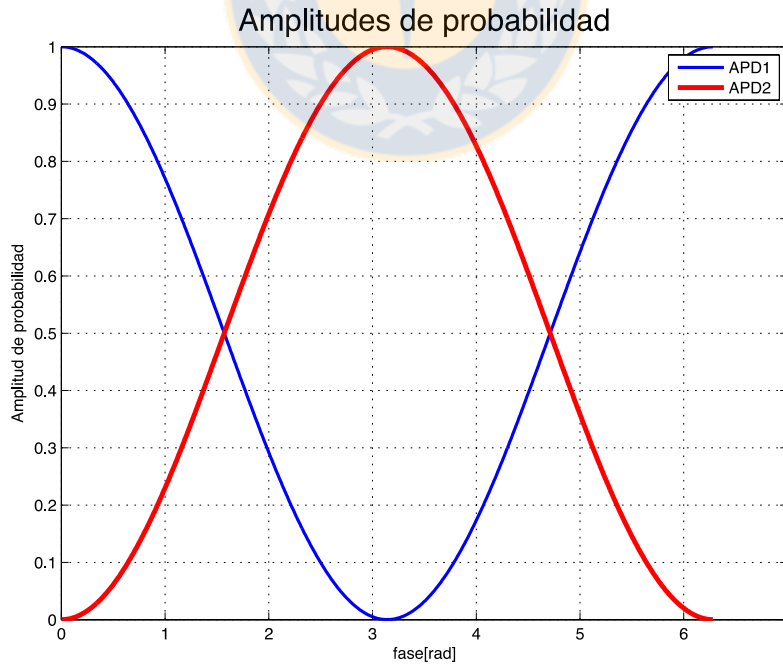


Figura 20: Funciones de probabilidad teóricas [fuente: elaboración propia]

Se observa que para ciertos valores de fase, la probabilidad que un fotón salga del sistema por la puerta 1 es máxima en un APD y mínima en el otro, así como algunos valores en que ambas probabilidades son iguales. Se concluye entonces que teóricamente, si se tiene controlada la fase del sistema, se puede rutear con 100% de probabilidad un fotón que ingresa al sistema para ciertos valores.

#### 4.3) Resultados

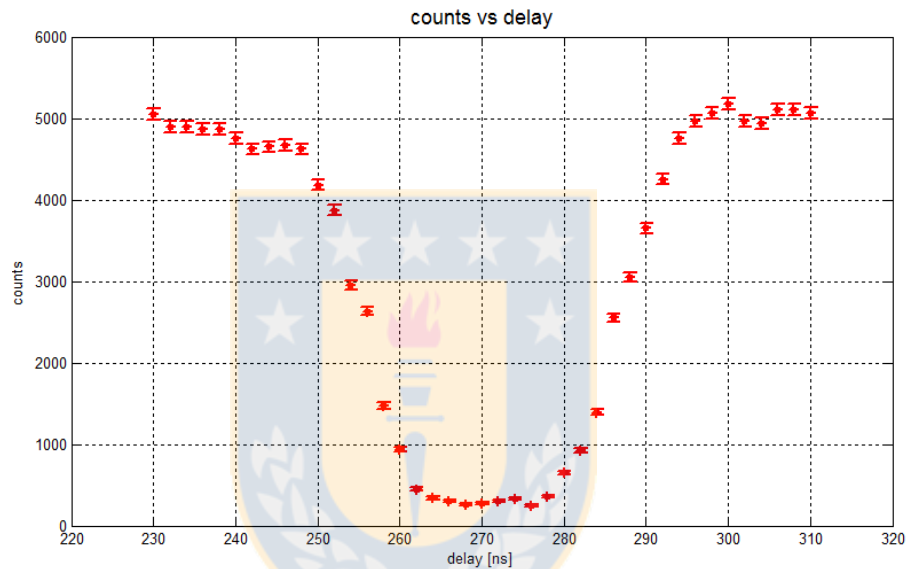
Para la implementación del router de fotones individuales, se debe previamente caracterizar los componentes ópticos involucrados, así como también las fibras ópticas. En particular, es importante caracterizar las pérdidas de cada componente y compararla con los datos que entrega el fabricante, además, se debe testear el modulador de fase, de tal forma de encontrar el punto óptimo de modulación. A continuación se presenta una tabla comparativa de los valores de pérdida esperado de cada componente y se compara con los obtenidos experimentalmente:

**Tabla 1: características de los componentes ópticos [fuente: elaboración propia]**

<i>Componentes y otros factores</i>	<i>Pérdidas estimadas entregadas por el fabricante (dB)</i>	<i>Pérdidas de los componentes obtenidas experimentalmente (dB)</i>
Circulador	1.5	0.8
BS de fibra óptica	1.5	0.8
EOM1	3	2.4
EOM2	3	2.1
Rollo de fibra de 100m	0.2	0.3
CPM1	0.3	0.1
CPM2	0.3	0.2
Pérdidas asociadas al desacoplar y acoplar luz (total)	-	6
Conectores y/o fusiones (total)	-	1.5

Se observa que la mayor parte de pérdidas asociadas al sistema se encuentran en el desacople de luz a espacio libre y viceversa, sin embargo, los componentes tienen pérdidas menores a las entregadas por el fabricante, lo cual es bueno para el rendimiento del sistema.

Como se menciona en secciones anteriores, uno de los fotones generados desde la fuente, es usado como trigger para la sincronización entre los EOM, de tal forma, de modular en el momento en que un fotón esté pasando por el interferómetro y no en otro momento. Sin embargo, para ello se debe calcular y/o estimar un delay entre el fotón usado como trigger y el fotón individual que se ruteará, y los moduladores deben estar siendo alimentados por un generador de funciones. El resultado es el siguiente:



**Figura 21: Desempeño de modulación frente a delay aplicado al sistema [fuente: elaboración propia]**

En este caso, se está observando la salida del APD1 y se está alimentando con 2.5V. Según los cálculos realizados anteriormente, para una fase de  $180^\circ$ , la probabilidad de que un fotón sea ruteado por la puerta 1 es cercano a 0, y tiene una probabilidad cercana a 100% de ser ruteado por la puerta 2. Cuando se aplica una tensión de 2.5 V al modulador, es un equivalente a aplicar un desfase de  $180^\circ$ . La imagen muestra que para un delay de 270 [ns], el modulador funciona de forma óptima, ya que para rangos muy lejanos a ese punto, el modulador no actúa sobre el fotón o haz de luz entrante.

Una vez caracterizadas las pérdidas del sistema y los tiempos de sincronización, se debe aislar el sistema térmicamente y para contaminación de luz externa, para minimizar errores a la hora de realizar mediciones. Luego, se debe

alimentar los EOM con un generador de funciones con voltajes de 0[v] a 5[v] y analizar el conteo de fotones individuales en las salidas del sistema.

La siguiente tabla muestra el número medio de cuentas en ambos APD, los cuales son etiquetados como APD1 y APD2, mientras se modifica la fase del sistema, además, los parámetros "H", "V", "45" y "-45" que indican que la polarización de entrada es horizontal, vertical, diagonal y anti diagonal respectivamente.

**Tabla 2: Valor medio de cuentas en APDs [fuente: elaboración propia]**

	0[v]	0,5[v]	1[v]	1,5[v]	2[v]	2,5[v]	3[v]	3,5[v]	4[v]	4,5[v]	5[v]
<b>HAPD1</b>	<b>21,1</b>	<b>19,3</b>	<b>17,1</b>	<b>15,8</b>	<b>12,1</b>	<b>7,15</b>	<b>3,9</b>	<b>1,9</b>	<b>0,35</b>	<b>0,5</b>	<b>0,3</b>
<b>HAPD2</b>	<b>0,05</b>	<b>0,6</b>	<b>5,7</b>	<b>8</b>	<b>12,1</b>	<b>14,2</b>	<b>19,15</b>	<b>19,65</b>	<b>19,25</b>	<b>18,9</b>	<b>19,05</b>
<b>VAPD1</b>	<b>19,7</b>	<b>18,85</b>	<b>15,4</b>	<b>13,45</b>	<b>11,2</b>	<b>8,9</b>	<b>4,55</b>	<b>1,9</b>	<b>0,3</b>	<b>0,1</b>	<b>0,85</b>
<b>VAPD2</b>	<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,85</b>	<b>5,4</b>	<b>9,5</b>	<b>10,55</b>	<b>16,05</b>	<b>19</b>	<b>19,55</b>	<b>21,65</b>	<b>19,8</b>
<b>45APD1</b>	<b>25,6</b>	<b>26,05</b>	<b>23,7</b>	<b>20,25</b>	<b>15,3</b>	<b>11,3</b>	<b>6,5</b>	<b>2,9</b>	<b>0,8</b>	<b>0</b>	<b>1,6</b>
<b>45APD2</b>	<b>0,45</b>	<b>0,55</b>	<b>2,3</b>	<b>5,3</b>	<b>8,25</b>	<b>14</b>	<b>16,35</b>	<b>19,5</b>	<b>21</b>	<b>22,7</b>	<b>20,05</b>
<b>-45APD1</b>	<b>25</b>	<b>24,15</b>	<b>24,85</b>	<b>19,65</b>	<b>15,5</b>	<b>10,6</b>	<b>9,45</b>	<b>6,75</b>	<b>3,55</b>	<b>0,85</b>	<b>0,15</b>
<b>-45APD2</b>	<b>0,15</b>	<b>1,15</b>	<b>5,2</b>	<b>8,2</b>	<b>14,35</b>	<b>19,05</b>	<b>27,05</b>	<b>29,45</b>	<b>28,55</b>	<b>30,5</b>	<b>29,85</b>

La tabla anterior, muestra que independiente del estado de polarización, a medida que aumenta el voltaje que se suministra a los EOM de 0[v] a 5[V] (que es equivalente a agregar una fase de 0° a 180°), el conteo de fotones en el APD1 comienza a bajar, por el contrario, el conteo en el APD2 comienza a subir. Esto tiene un comportamiento similar a las ecuaciones (31) y (32) calculadas de forma teórica. Cabe recalcar que los datos anteriores, representan valores promedio de 20 datos. Estos 20 datos fueron tomados durante 2 minutos.

Ahora se presenta una tabla con las desviaciones estándar calculadas para cada punto de la tabla 3.

Tabla 3: Desviaciones estándar en cada APD [fuente: elaboración propia]

	0[v]	0,5[v]	1[v]	1,5[v]	2[v]	2,5[v]	3[v]	3,5[v]	4[v]	4,5[v]	5[v]
HAPD1	3,82	3,36	2,57	3,07	2,67	2,21	0,97	0,85	0,49	0,69	0,47
HAPD2	0,22	0,68	2,36	2,97	3,02	3,93	5,24	4,18	4,69	4,56	4,11
VAPD1	2,99	2,68	2,87	2,48	2,93	2,55	1,54	1,12	0,47	0,31	0,81
VAPD2	0,00	0,31	1,84	2,37	3,09	2,96	3,62	4,72	6,20	4,85	4,38
45APD1	7,24	4,52	6,39	4,67	4,05	3,21	2,48	1,74	1,01	0,00	1,54
45APD2	0,69	0,69	1,66	2,36	3,08	4,17	3,79	4,03	3,99	4,93	3,12
-45APD1	5,17	4,91	5,86	3,67	4,25	4,65	1,90	2,81	1,79	1,23	0,37
-45APD2	0,37	1,04	2,59	1,96	3,00	3,36	5,58	5,37	4,70	5,03	4,08

Se observa que la desviación estándar es bastante baja con respecto a los valores medios, por lo tanto, los valores son representativos.

Tomadas todas las medidas mencionadas anteriormente, se presentan los resultados del sistema cuando ingresan fotones con polarización horizontal  $|H\rangle$  y diagonal  $|45\rangle$ :

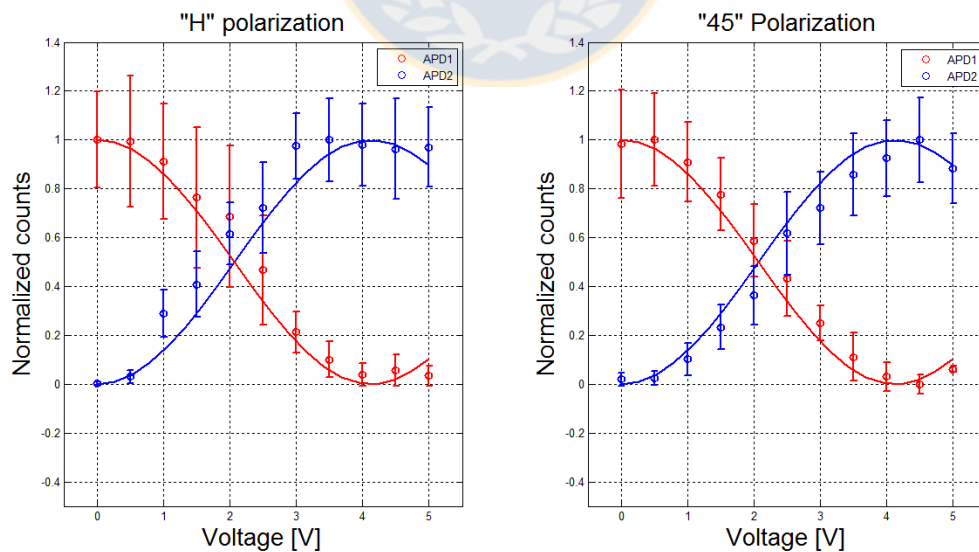


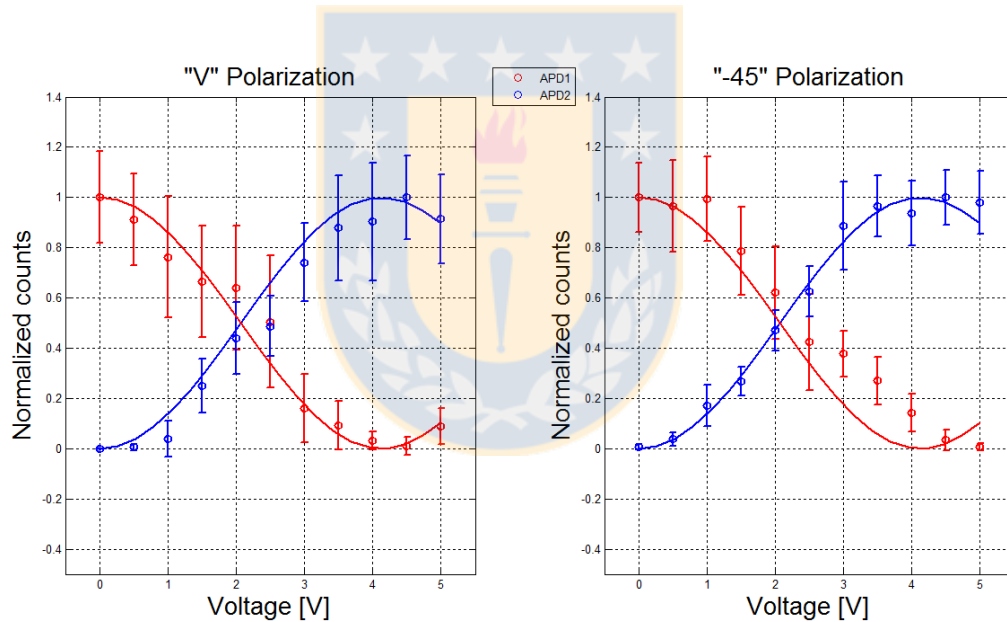
Figura 22: Ruteo de fotones individuales mediante cambios de fase para polarización horizontal y diagonal (datos normalizados) [fuente: elaboración propia]



La figura anterior, muestra el comportamiento de las funciones de probabilidad de el ruteo de fotones individuales dentro del sistema, al aplicar cambios de fase. La curva azul representa la probabilidad de que un fotón sea ruteado hacia el APD2, mientras que la curva roja al APD1. Estas mediciones fueron obtenidas en el laboratorio para 5000 fotones entrantes.

Se observa que cuando el voltaje aplicado a los EOM es de 0[V] ( $\phi = 0$ ), la probabilidad que el fotón sea ruteado hacia el APD1 es el 100% y para el APD2 es de 0%, mientras que para un voltaje cercano a 4[V] ( $\phi = 180^\circ$ ) es la situación inversa. Notar además, que el ruteo es similar en ambas curvas, lo que es un indicio que el sistema funciona independiente del estado de polarización de entrada.

Finalmente se presentan curvas obtenidas para un estado de polarización vertical a la entrada y el estado anti diagonal:



**Figura 23: Ruteo de fotones individuales mediante cambios de fase para polarización vertical y anti diagonal(datos normalizados) [fuente: elaboración propia]**

En este caso se observa la misma tendencia de la figura 22, en que independiente del estado de polarización de entrada, el ruteo del fotón individual solo dependerá de la fase agregada por los EOM.

Finalmente, se presentan las visibilidades para cada medición:

**Tabla 4: Visibilidades calculadas[fuente: elaboración propia]**

	<b>APD1</b>	<b>APD2</b>
<b> H&gt;</b>	<b>0,9720</b>	<b>0,9949</b>
<b> V&gt;</b>	<b>0,9796</b>	<b>0,9800</b>
<b> 45&gt;</b>	<b>0,9800</b>	<b>0,9511</b>
<b> -45&gt;</b>	<b>0,9681</b>	<b>0,9902</b>

#### 4.4) Análisis de resultados

Al finalizar la sección 4.2, se demostró teóricamente que la función de probabilidad de un fotón para ser ruteado al APD1 o APD2, solo depende de la fase agregada por los EOM, además, este resultado es válido para cualquier polarización de entrada. En la sección 4.3, se demuestran estos resultados de manera experimental mediante las curvas obtenidas en las fig 22. y las fig 23.

Se observó experimentalmente que la temperatura debe mantenerse estable en el sistema, ya que esta puede alterar los resultados finales, por ejemplo, al cambiar la birrefringencia de las fibras ópticas usadas en el sistema, así como también afectan las perturbaciones físicas externas al módulo.

La velocidad de trabajo de este módulo solo está limitado al equipamiento electrónico, en particular, al generador de funciones que alimenta los EOM.

## 5) Conclusiones

### 5.1) Conclusión

A lo largo de este trabajo, se demostró teóricamente que la propuesta del router de fotones individuales implementada funciona para cualquier estado de polarización de entrada y el encaminamiento dependerá de la fase agregada por los EOM al sistema. Se demuestra además de forma experimental que los fotones pueden ser ruteados hacia los fotodetectores correspondientes con cambios de fase.

Es importante recalcar también, que la mayor parte de pérdidas del sistema está en los desacoples de luz de fibra óptica a espacio libre, sin embargo, estas etapas pueden ser optimizadas. Por otro lado, es importante mantener el sistema aislado térmicamente para evitar errores de medición.

Si bien la fuente generadora de fotones gemelos tuvo un desempeño ideal para el experimento, existe una etapa previa a entrar al sistema en que los fotones deben ser acoplados a fibra óptica, es por eso que se debe fijar muy bien las fibras a la superficie de trabajo, de tal forma de evitar cambios bruscos de polarización.

Finalmente se concluye, que los fotones generados son a 1550[nm] y los componentes ópticos funcionan de manera óptima a esta misma longitud de onda, la cual coincide con la banda de atenuación mínima en las fibras de SiO<sub>2</sub> y que a su vez es la región de trabajo más usada en telecomunicaciones. La importancia de esto radica entonces, en que el módulo puede ser implementado sin mayores problemas en las redes cuánticas actuales, entregando un sistema de ruteo eficiente, con bajas pérdidas, a altas velocidades, de sencilla implementación, evita complejos sistemas de estabilización electrónicos y es independiente del estado de polarización de entrada.

### 5.2) Trabajos futuros

Como trabajo futuro, se debe reducir las pérdidas del módulo y eso se puede lograr mejorando el acople espacio libre- fibra óptica, ya que ahí radican los mayores índices de pérdida. se puede testear también el funcionamiento del sistema para largos periodos de tiempo, de tal forma de ver su estabilidad temporal.

## 6) Bibliografía

- [1] D. Bohm and Y. Aharonov. *"Discussion of experimental proof for the paradox of Einstein, Rosen and Podolsky"*. Phys. Rev., 108:1070,1957.
- [2] M. A. Nielsen and I. L. Chuang, *"Quantum Computation and Quantum Information"*(Cam-bridge University Press, 2009)
- [3] S. M. Barnett, *"Quantum Information"*(Oxford Master Series in Atomic, Optical, and Laser Physics).
- [4] *"Two-photon Entanglement in type II Parametric down conversion"*, Morton H. Rubin, Physical Review Letters, 1994.
- [5] *"Teoría del interferómetro de Sagnac de fibra de baja birrefringencia y torcida"*, R. Rojas Laguna, Instituto nacional de astrofísica, óptica y electrónica, Revista Mexicana de las ciencias, febrero 2001.
- [6] *"Interferómetro de Sagnac con fibra birrefringente y torcida en lazo"*, E. Kuzin, M. Ramírez Renero, B. Ibarra Escamilla, J. Sánchez-Mondragón, H. Cerecedo Núñez, Instituto nacional de astrofísica, óptica y electrónica, Revista Mexicana de las ciencias, febrero 1997.
- [7] *"Ultrafast Switching of photonic Entanglement"*, Matthew A. Hall, Joseph B. Altpeter and Prem Kumar, Center for Photonic Communication and Computing, Northwestern University, Physical Review Letters, February 2011.
- [8] *"A high-speed tunable beam Splitter for feed-forward photonic quantum information processing"*, Xiao-song Ma, Stefan Zotter, Nuray Tetik, Angie Qarry, Thomas Jennewein, Anton Zeilinger, Institute for quantum Optics and Quantum information, Optical Society of america, September 2011.
- [9]G. Saavedra Mondaca, *"Comunicaciones Cuánticas, Generación de estados Cuánticos y Distribución a través de Fibras Ópticas"*, informe de Memoria de Título para optar al título de Ingeniero Civil en Telecomunicaciones, Universidad de Concepción, Chile, 2013.
- [10]M. Palacios Briones, *"Comunicaciones "Modulación dinámica del estado de polarización de fotones individuales para sistemas de criptografía cuántica"*, informe de Memoria de Título para optar al título de Ingeniero Civil en Telecomunicaciones, Universidad de Concepción, Chile, 2016.
- [11] Bethzabe Yaziriam Martínez Pérez, *"Modulación de coherencia óptica con dispositivos electro-ópticos con aplicaciones en detección de campos eléctricos"*, Proyecto final, Licenciatura en Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, Depto. de Computación, Electrónica y Mecatrónica, Univ. de las Américas Puebla, Cholula, Puebla, México, Mayo ,2012.
- [12]<https://www.thorlabs.com/>, último acceso 10 de Marzo 2017