

Estabilización activa de la polarización en enlace de fibra óptica monomodo para comunicaciones cuánticas

Active polarization stabilization in a single mode optical fiber link for quantum communications

Ignacio H. Lopez Grande*, Miguel A. Larotonda

Departamento de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones DEILAP-UNIDEF (CITEDEF-CONICET);
Departamento de Física J.J. Giambiagi, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA

Recibido: 04/05/15; aceptado: 09/11/15

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de estabilización activa de la polarización de un enlace de fibra óptica monomodo, basado en dos controladores de polarización manejados por voltaje, y se estudia su desempeño. El objetivo es contar con un enlace que preserve los estados de polarización para su uso en un sistema de distribución cuántica de claves. El esquema es capaz de generar los cuatro estados de polarización lineales generadores de dos bases conjugadas: una corresponde a las direcciones definidas por un separador de haz polarizante integrado a fibra, ubicado en un extremo del enlace y la otra a la base conjugada lineal. Posteriormente y en forma activa compensa los cambios de la birrefringencia del canal inducidos por variaciones térmicas o mecánicas inducidas por el entorno, que naturalmente deterioran la elección inicial de bases en tiempos del orden de algunos minutos en enlaces subterráneos o submarinos. Se muestran resultados del funcionamiento del sistema en régimen de detección de luz intensa con fotodiodos en modo fotoconductor, y resultados preliminares en régimen de fotoconteo, utilizando un módulo de conteo de fotones.

Palabras clave: estabilización activa, polarización, fibras ópticas, distribución cuántica de claves.

In this work we report the development of an active polarization stabilization loop of a single mode fiber optical link, based on two voltage-driven polarization controllers, and we study its performance. The goal is to obtain a polarization preserving channel for arbitrary polarization states, to establish a polarization-encoded quantum key distribution protocol. The system is able to generate four linear polarization states, corresponding to two conjugate linear bases: one of the basis corresponds to the polarization directions defined by an in-line polarizing beamsplitter placed at the end of the link, while the other corresponds to the conjugate (linear) basis. Following this initial operation, the system actively compensates for the birefringence changes of the channel that are mechanically and thermally induced by the environment, which have a detrimental effect on the initial bases election in temporal scales on the order of a few minutes. We show results of the system operating under the intense light regime using photodiodes in photoconductive mode, as well preliminary results in the photon counting regime.

Keywords: active stabilization, polarization, optical fiber link, quantum key distribution.

* ignaciolopezgrande@gmail.com

I. INTRODUCCIÓN

La Información Cuántica es un área de rápido desarrollo, que estudia la producción, manipulación y medición de sistemas cuánticos, ya sea para codificar, transmitir o procesar información [1]. A un conjunto de instrucciones o reglas que puedan resolver algún problema específico utilizando alguna característica esencial de la mecánica cuántica, como la superposición o el entrelazamiento, se lo denomina un algoritmo cuántico. La Distribución Cuántica de Claves (DCC) fue uno de los primeros protocolos cuánticos desarrollados [2], y permite que dos partes (que llamaremos Alice y Bob de acuerdo a la jerga de comunicaciones seguras) puedan generar una clave aleatoria secreta en común. Los protocolos de DCC explotan el teorema cuántico de *no-cloning* [3] y la indistinguibilidad de estados cuánticos pertenecientes a bases conjugadas (no ortogonales), para lograr una distribución segura de claves criptográficas [4].

Los protocolos de DCC, antes que realizar tareas computacionales, están orientados a la transmisión de datos. Es por ello que un sistema cuántico natural para este tipo de protocolos son los grados de libertad cuánticos de los fotones. En la actualidad, existen varias formas de codificar bits cuánticos (qubits) en fotones, utilizando distintos grados de libertad (observables) del sistema; el momento angular orbital [5], el camino o momento lineal [6], la superposición de tiempos de llegada o *time-bin* [7] y la polarización de los fotones, entre los llamados de variable discreta. También se pueden utilizar pulsos de pocos fotones para codificar qubits en variables continuas [8].

Asimismo, una de las formas más eficientes de transmitir estos fotones entre las partes del sistema es a través de enlaces de fibra óptica. Estos enlaces no sufren las perturbaciones atmosféricas a las que están expuestos los enlaces en aire, tienen muy baja atenuación, no se precisa una línea de visión directa. Además la cobertura de las redes comerciales de fibra óptica es cada vez más extensa. Es por ello que un sistema de telecomunicaciones ópticas basado en fibra óptica monomodo estándar para 1550 nm surge como el medio ideal para establecer un canal cuántico.

Entre las variables cuánticas discretas mencionadas arriba, una de las más fáciles de manipular (preparar y medir), y una de las más utilizadas en sistemas con propagación en aire es la polarización. Sin embargo, efectos dependientes de la polarización presentes en fibras ópticas monomodo, si bien produce efectos menores o incluso despreciables en protocolos de comunicaciones clásicas, representan un problema serio para casi cualquier esquema de comunicaciones cuánticas. Los cuatro efectos más importantes de la polarización en fibras son la fase geométrica, la birrefringencia, la dispersión de modos de polarización y las pérdidas dependientes de la polarización [9].

La fase geométrica aparece al guiar luz en una fibra cuando el vector k de propagación sufre cambios adiabáticos durante la misma; los ejes de las

polarizaciones lineales rotan con la propagación de luz fuera de un plano. Este efecto no es crítico para comunicaciones cuánticas, sino que hace que la definición inicial de los ejes sea arbitraria, y puede variar en el tiempo frente a perturbaciones mecánicas. Si esta variación es lenta se puede compensar activamente.

La birrefringencia consiste en una diferencia de velocidades de fase (índices de refracción) para dos polarizaciones ortogonales; su origen en las fibras ópticas proviene de tensiones residuales en y alrededor del núcleo, y de asimetrías en la geometría de la fibra. Existen fibras llamadas *polarization maintaining*, que presentan una gran birrefringencia, por lo que las polarizaciones correspondientes a estos dos ejes tienen velocidades de propagación bien diferenciadas y no se mezclan, por lo que se mantienen a lo largo de la fibra. Sin embargo, cualquier otro modo de polarización, formado por una superposición de los dos anteriores, se deterioran rápidamente debido al mismo efecto, en principio tornándolas inútiles para este tipo de codificación. Existen sin embargo alternativas ingeniosas para superar este efecto [10]. El efecto global de la birrefringencia es equivalente a una combinación arbitraria de dos láminas de onda; es decir es una operación unitaria y por ende, en principio reversible. Si la variación térmica y mecánica es lenta, el efecto de la birrefringencia es similar al de la fase geométrica (aunque también puede agregar elipticidad al estado de polarización inicial) y puede ser compensado en forma activa.

Por otro lado, la dispersión de modos de polarización designa a la presencia de diferentes velocidades de grupo para polarizaciones ortogonales. Este efecto es dispersivo y en principio más difícil de compensar, pero es despreciable en el caso de utilizar luz de ancho de banda angosto, como la generada con láseres de tipo DFB ($\Delta\lambda < 1$ nm). Es un problema serio para fotones generados por conversión paramétrica en protocolos de DCC basados en fotones entrelazados ($\Delta\lambda \approx 10$ nm) [11-13].

Finalmente, las pérdidas dependientes de la polarización no son reversibles, y si bien son despreciables en cables de fibra, esto no es así en elementos ópticos integrados con guías de onda, como algunos moduladores de fase. Estas situaciones deberían ser evitadas ya que al variar la polarización de los estados variarán las pérdidas, generando comportamientos erráticos. La dinámica de estos efectos sobre enlaces de fibra soterrados o submarinos fue estudiada a principios de la década del 90, y los tiempos característicos de variación del estado de polarización (SOP por sus siglas en inglés) en estas condiciones es del orden de la decena de minutos [14,15].

Para compensar los efectos de fase geométrica y birrefringencia, y poder implementar protocolos de DCC basados en la polarización de los fotones en fibra óptica, es necesario entonces contar con un sistema de control activo de la polarización. En este trabajo se describe un sistema de estabilización activo del SOP en un canal de fibra óptica monomodo. El control de la polarización se

realiza en dos controladores de polarización electro-ópticos programables por voltaje, uno del lado del emisor y otro del receptor, y las medidas de intensidad se realizan con luz intensa o mediante conteo de fotones. En la siguiente sección se detalla por un lado el armado del sistema experimental, que puede ser implementado en cualquier enlace por fibra óptica en la banda “C” (1530-1565 nm), y por otro el protocolo de selección inicial de bases y la compensación activa de la fase geométrica y la birrefringencia.

II. EXPERIMENTO

Esquema general

El objetivo es contar con un sistema que pueda combinarse con un esquema de DCC y funcionar en forma alternada; el control activo de la polarización del canal deberá funcionar en ventanas temporales intercaladas entre intervalos de operación del protocolo cuántico de distribución de claves. El esquema general es el de un emisor (Alice) que genera pulsos de luz con estados de polarización correspondientes a los generadores de dos bases conjugadas (base computacional y base diagonal) en el rango de telecomunicaciones y los transmite a través de un enlace de fibra óptica. El receptor (Bob) debe ser capaz de proyectar la polarización de estos estados de luz en las mismas bases de emisión. Es necesario entonces que Alice defina dos estados de polarización ortogonal, y luego los dos estados de polarización lineal conjugados; Bob a su vez debe orientar sus bases de medición de acuerdo a la elección de Alice. Esta condición debe mantenerse en el tiempo, compensando en forma activa las rotaciones de polarización inducidas por el entorno.

La fuente de luz es un diodo láser DFB acoplado a fibra (MISTUBISHI FU-641SEA) de 11 GHz de ancho espectral, que emite una potencia máxima de aproximadamente 0.5 mW en 1548 nm, e incluye un atenuador variable por absorción controlado por voltaje (VOA). Para el mismo se desarrollaron una fuente de corriente con control de temperatura y un controlador de pulsos de tensión de 50 MHz de ancho de banda para el VOA. La polarización de los estados emitidos por Alice, la elección de bases de medición de Bob y la compensación activa de la polarización del canal es controlada por dos controladores de polarización Agiltron, basados en cuatro placas de retardo de birrefringencia electroóptica ubicados en los extremos del enlace. En el esquema experimental se agregan controladores manuales de polarización del tipo Lefevre, para una selección inicial del estado de entrada al sistema e inducir perturbaciones al mismo (Figura 1). Todas las interconexiones entre acoplos y cables de fibra óptica se realizan con conectores FC/PC. Todos los tramos de fibra del experimento están realizados en fibra óptica SMF-28, excepto los *pigtails* de salida de los controladores de polarización, que están confeccionados con fibra *polarization maintaining*. Estos tienen sólo 25 cm de largo, y una longitud de batido entre polarizaciones de un par de milímetros [16], por lo que

el retardo total entre el eje rápido y el lento es del orden de los (50 μm), mucho menor que la longitud de coherencia del láser DFB.



Figura 1. Esquema del experimento. En esta figura el arreglo de detección corresponde a la operación con luz intensa. PC: Controladores de polarización. BS: separador de haz. PBS: separador de haz polarizante.

Los controladores activos de polarización consisten en cuatro etapas o elementos activos, de retardo por birrefringencia inducida eléctricamente. Con cada etapa se puede generar un retardo relativo entre las componentes ordinaria y extraordinaria de la luz incidente de aproximadamente 2π . Estas cuatro etapas están rotadas espacialmente 45° entre sí (Fig. 2).

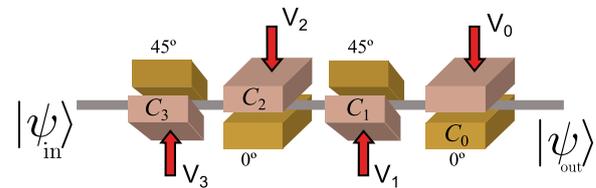


Figura 2. Arreglo de etapas retardadoras presentes en los controladores de polarización. La birrefringencia inducida eléctricamente genera un retardo en dos ejes rotados 45° entre sí. Las cuatro etapas permiten realizar una rotación arbitraria del estado de entrada.

Utilizando estos elementos de cada uno de los controladores es posible transformar cualquier estado de polarización a la entrada en un estado de polarización arbitraria a la salida (Fig. 2). El efecto de cada etapa es el equivalente a tener una lámina de onda de retardo variable, en una orientación fija respecto de la polarización incidente. En la base de estados lineales definida como canónica, las rotaciones de polarización que aplican las distintas etapas son:

$$R_{0,2}(V) = \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\theta(V)}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\theta(V)}{2}} \end{pmatrix},$$

y

$$R_{1,3}(V) = \begin{pmatrix} \cos \frac{\theta(V)}{2} & -\sin \frac{\theta(V)}{2} \\ \sin \frac{\theta(V)}{2} & \cos \frac{\theta(V)}{2} \end{pmatrix},$$

donde $\theta(V)$ es el retardo relativo entre los ejes de propagación, inducido por el voltaje aplicado.

El estado de los controladores de polarización se fija definiendo cuatro voltajes, uno para cada etapa, de entre 2.2 V y 4.0 V, que generan un retardo de fase entre los

ejes de entre 0 y 342° . Estas tensiones se obtienen a partir de estados digitales generados con un microcontrolador Arduino Mega, y cuatro convertidores D/A MCP4922 de 12 bits con entrada SPI de 5 V de salida. Como se puede ver en la figura 3, los rangos de tensiones útiles de todas las etapas de los controladores corresponden aproximadamente a un rango digital de 1800 bits, lo que da una resolución teórica de aproximadamente 0.2° por bit.

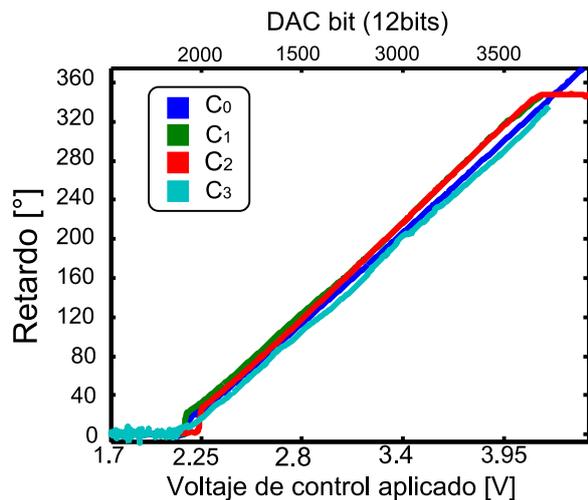


Figura 3: Retardo relativo entre los ejes de propagación en función del voltaje aplicado, para cada uno de los cuatro elementos del controlador de polarización de la etapa receptora. El otro controlador se comporta de manera similar. En el eje horizontal superior se muestra el número de bit de programación correspondiente a los voltajes de control.

Las distintas proyecciones de polarización del lado de Bob se implementan mediante rotaciones aplicadas con el controlador de polarización y un separador de haz polarizante integrado a fibra óptica. A la salida de este separador de polarizaciones se ubican los detectores de polarizaciones ortogonales, Detector 1 y Detector 2 en la figura 1. Como los controladores están compuestos por cuatro elementos de retardo variable consecutivos (ver figura 2), se utilizan los dos últimos elementos del controlador del lado de la detección, C_1 y C_0 , para realizar la rotación de la base de medición.

A partir de un estado arbitrario de polarización a la entrada, con estos controladores se puede recorrer

prácticamente toda la esfera de Poincaré del estado de polarización; la figura 3 muestra distintos barridos en tensión de las tres primeras etapas de un controlador, con las correspondientes proyecciones del estado de salida sobre las dos bases de medición. Estas dos series de mediciones se obtienen en forma simultánea alternando, para cada valor del barrido en tensión del controlador, entre dos estados de la última etapa birrefringente, que proyecta alternativamente en una u otra base de medición. En los casos a) y b) el barrido es sobre una única etapa, mientras que en el caso c) se realiza una combinación de rotaciones para obtener una rotación efectiva sobre el tercer eje de la esfera.

El sistema se ensayó tanto en régimen de luz intensa como en el modo de conteo. En el primero, se operó el láser en forma continua a una potencia de centenas de microwatt, y como detectores se utilizaron fotodiodos de InGaAs FGA01FC de Thorlabs, de 1.5 GHz de ancho de banda con encapsulado de acople directo a conectores de fibra FC. Además, en este modo de operación se incluyó un separador de haz no polarizante, que toma una muestra de la cantidad total de luz para normalizar intensidades.

También se operó el lazo de estabilización con un haz de muy baja intensidad, en el modo de conteo. El objetivo de esta prueba era evaluar la posibilidad de realizar tanto la selección de bases inicial como la estabilización del sistema con la misma fuente de luz utilizada para el canal cuántico, evitando así el multiplexado de señales de varios órdenes de magnitud de diferencia en intensidad. En este caso, como aproximación a una fuente pulsos de fotones únicos, se utilizó el láser en forma pulsada y atenuada, de forma de obtener pulsos coherentes con un promedio de 0.2 fotones por pulso: en esta condición, dado que la probabilidad de encontrar n fotones en dichos pulsos obedece a una estadística de Poisson. Entonces la probabilidad de obtener eventos con un único fotón es del orden de 0.16, mientras que la probabilidad de obtener eventos con más de un fotón es inferior a 0.02 (ya que hay un 82 % de los pulsos en los que no hay ningún fotón). Dichos pulsos ópticos se obtienen modulando el VOA con pulsos de 25 ns de duración, con un controlador construido *ad-hoc*. Para la detección de estos estados de pocos fotones se utilizó un módulo de conteo de fotones de InGaAs (IdQuantique id201).

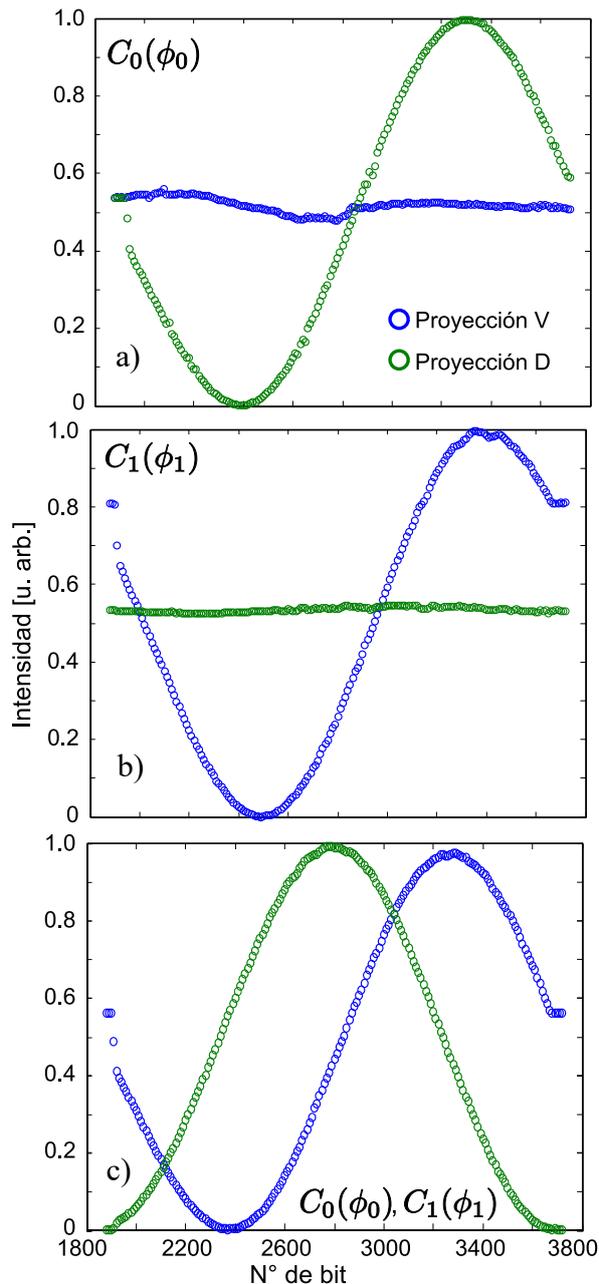


Figura 3. Barridos en tensión sobre el par de retardadores finales del controlador de polarización de Bob: a) rotación sobre el eje vertical de la esfera de Poincaré (eje Z), visitando estados circulares y diagonales de polarización. b) rotación sobre el eje X de la esfera, obtenido variando el voltaje de programación del segundo elemento. c) rotación alrededor del eje Y, que se logra mediante una combinación de una rotación variable en el primer elemento (ϕ_0) y una rotación fija en el segundo (ϕ_1).

III. DESEMPEÑO

Protocolo de elección inicial de bases

Dado que en un canal de fibra monomodo no existe ninguna dirección preferencial, la elección de los dos estados de polarización correspondientes a la base computacional es arbitraria. El protocolo comienza entonces definiendo el primer estado de la base canónica

(al que llamamos H por simplicidad, aunque dichas denominaciones pierden sentido en el marco de referencia de la fibra óptica) como la condición del controlador de polarización de Alice (PCA) que maximiza la intensidad en el Detector 1 (Fig. 1). El estado ortogonal V es la condición sobre PCA que maximiza la intensidad en el Detector 2. En esta condición, mientras Alice emite el estado V , Bob cambia su base de detección alterando el estado de su controlador de polarización (PCB), y buscando igualar las intensidades detectadas en ambos detectores. De esta forma se define la base de detección diagonal, para los estados D y A . Así, con Bob proyectando en una base conjugada a la original, Alice repite las dos primeras operaciones de forma de obtener las condiciones para preparar los estados D y A . (Alice debe poder preparar cuatro estados, mientras que Bob sólo debe poder cambiar la base de proyección, ya que la proyección en estados de la misma base se realiza con el separador de haz polarizante). Al finalizar este procedimiento se obtiene una distribución de luz para los distintos estados preparados y medidos como la que se muestra en la figura 4.

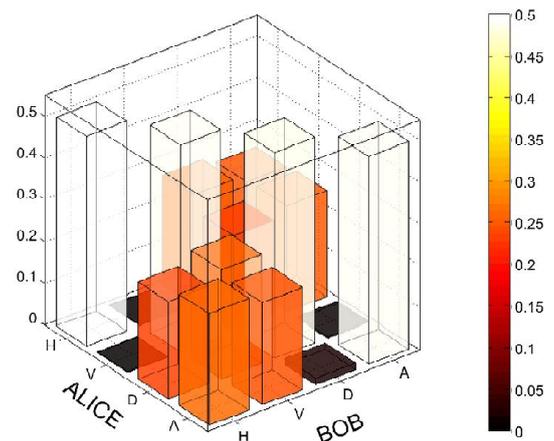


Figura 4. Distribución de luz obtenida para los distintos estados emitidos, medidos en ambas bases de detección, después del procedimiento de elección de bases.

Mecanismo de optimización

Una vez obtenidos los 4 estados de emisión en Alice y las dos bases de proyección en Bob, el sistema debe analizar periódicamente el estado de estas proyecciones para realizar las rotaciones controladas que reviertan la eventual alteración del SOP producidas por perturbaciones térmicas y/o mecánicas sobre el enlace de fibra óptica. El protocolo consiste en que Alice envíe luz polarizada alternativamente en los estados V y A , mientras Bob detecta luz en las bases computacional y diagonal con la misma alternancia, y varía la intensidad incidente sobre el detector 2 variando los voltajes de las cuatro etapas retardadoras de su controlador de polarización, C_3 , C_2 , C_1 y C_0 . Esto se repite en forma iterativa hasta alcanzar un máximo limitado por el ruido

de la medición. De esta forma se obtiene una maximización cuasi-simultánea de la intensidad detectada al preparar y medir los estados V y A . La figura 5 muestra una serie temporal de las medidas obtenidas en el detector 2 (también se incluye la intensidad registrada en el detector 1, que mide alternativamente los estados complementarios H y D). A lo largo de la serie se introdujeron manualmente perturbaciones al enlace de fibra. Estas alteraciones del canal son mucho mayores que las que se esperan en un sistema real con perturbaciones térmicas o de *stress* mecánico normal. Sin embargo se observa que el sistema es capaz de recuperar el SOP en escalas de tiempo inferiores a 200 ciclos del lazo (aproximadamente 40 segundos). La precisión de los estados de polarización ortogonales así obtenidos se puede estimar analizando las señales de corrección digital sobre el controlador en alrededor de 0.6° sobre la esfera de Poincaré.

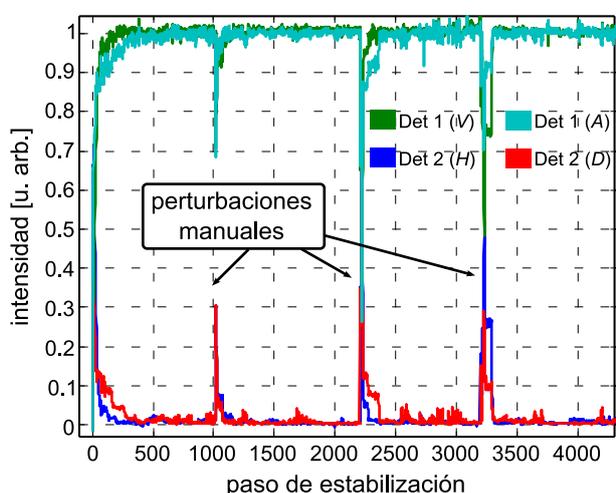


Figura 5. Operación del lazo de estabilización en régimen de luz intensa: Durante los primeros 300 pasos el sistema realiza la elección inicial de estados, y luego pasa a operar el lazo de estabilización activa del estado de polarización. Se muestra el funcionamiento del sistema en estado estacionario y su respuesta frente a perturbaciones mecánicas bruscas aplicadas manualmente en el enlace de fibra. El sistema tarda alrededor de 150 pasos en recuperarse. El tiempo total de operación de estos 4500 pasos es de 13 minutos.

Uno de objetivos de este proceso de estabilización es asegurar que los estados de polarización de una base se mantengan rotados 45° respecto de los de la otra base: la desviación máxima típica respecto del ángulo esperado entre bases conjugadas (de 90° grados en la esfera de Poincaré) es de 2° .

Régimen de fotoconteo

El sistema también fue ensayado en forma preliminar en un régimen de fotoconteo. En este caso, se utilizó un único detector, midiendo la intensidad en una de las proyecciones de polarización, que por medio del controlador de polarización de Bob se puede alternar

entre la base computacional y la diagonal. Durante el proceso, por cada estado de polarización elegido, Alice envía una cantidad fija de pulsos ópticos durante 2 segundos a una frecuencia de 200 kHz, cuyo valor medio de intensidad es del orden de 0.2 fotones por pulso. Bob obtiene entonces una tasa de detección en cada condición del protocolo de elección de bases y posteriormente en el lazo de estabilización. Este valor es equivalente al valor de intensidad obtenido en el régimen de luz intensa. La ventaja de este modo de funcionamiento es que se puede utilizar la misma fuente de luz empleada en el protocolo de distribución de claves para el proceso de control del SOP, y no es preciso disponer de una fuente adicional que inyecte pulsos de luz varios órdenes de magnitud más intensos en el mismo canal de la información cuántica. Los valores de calibración obtenidos en este régimen son comparables con los obtenidos con luz intensa (2° de desviación típica entre los estados de las bases conjugadas).

El proceso de estabilización en este régimen es 10 veces más lento que el de luz intensa debido al tiempo de integración necesario para estimar la intensidad en cada medición. Otro inconveniente que presenta este método es la imposibilidad de utilizar más de un detector de fotones únicos, debido a su elevado costo. El sistema de estabilización fue entonces ensayado midiendo una única proyección de polarización para cada una de las bases, y rotando la base y estado de proyección con el controlador de polarización. Esta dificultad, así como el nivel de luz utilizado, torna al sistema un tanto más frágil contra perturbaciones grandes. Se planea superar este problema agregando retardos a las distintas medidas para posteriormente combinarlos en un único canal de fibra, de forma de poder obtener mediciones correspondientes a ambas proyecciones de la polarización en forma prácticamente simultánea, así como también una medida de la intensidad total, a modo de normalización. Otra alternativa es realizar la selección inicial de bases de Alice localmente, detectando luz intensa. Esto se puede obtener mediante el uso de un separador de haz asimétrico (99 %-1 %) antes de la salida de Alice, para utilizar el haz más intenso para estabilización y el más débil para el canal cuántico.

IV. CONSIDERACIONES FINALES Y PERSPECTIVAS

En este trabajo reportamos el funcionamiento y desempeño de un sistema de estabilización activa de la polarización, para su uso en un sistema de distribución cuántica de claves por fibra óptica. El protocolo permite fijar dos bases conjugadas de polarización con una precisión de 2° en la esfera de Poincaré, y mantener esta condición en el tiempo compensando perturbaciones externas. El objetivo inmediato es el de ensayar este mecanismo, multiplexado temporalmente con un

protocolo de distribución cuántica de claves en fibra, con codificación en polarización.

Además se pudo estudiar el comportamiento del sistema con detección en el nivel de conteo de fotones. Se espera que una modificación del esquema de detección para permitir la medición de más de un estado de polarización con el mismo detector, por medio de líneas de retardo, permita que este modo de funcionamiento pueda ser utilizado en la práctica.

V. REFERENCIAS

- 1 - Nielsen, M.A., and Chuang, I.L. "Quantum computation and quantum information", Cambridge University Press, (2010).
- 2 - Bennet, C.H., and Brassard, G., in "Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing", volume 1, 175-179, New York (1984).
- 3 - Wootters, W., and Zurek, W.H. Zurek, Nature **299**, 802-803 (1982).
- 4 - Planat, M., Rosu, H. C., and Perrine, S., Foundations of Physics **36**, 1662-1680 (2006).
- 5 - Padgett, M. J., and Courtial, J., Optics Letters **24**, 430-432 (1999).
- 6 - Fiorentino, M., and Wong, F.N.C., Physical review letters **93**, 070502 (2004). <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0402208v2>.
- 7 - Marcikic, I., *et al.*, Physical Review A **66**, 062308 (2002). <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0205144v2>.
- 8 - Braunstein, S.L., and Van Loock, P., Reviews of Modern Physics **77**, 513-578 (2005). <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0410100v1>.
- 9 - Gisin, N., *et al.*, Reviews of modern physics **74**, 145-202 (2002). <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0101098v2>.
- 10 - Zhang, P., *et al.*, Physical review letters **112**, 130501 (2014). <http://arxiv.org/abs/1308.3436>.
- 11 - Jennewein, T., *et al.*, Physical Review Letters **84**, 4729-4733 (2000). <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9912117>.
- 12 - Marcikic, I., *et al.*, Applied Physics Letters **89**, 101122 (2006). <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0606072>.
- 13 - Waks, E. *et al.*, Physical Review A **65**, 052310 (2002). <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0012078v>.
- 14 - De Angelis, C. *et al.*, J. Lightwave Technol. **10**, 552-555 (1992).
- 15 - Takahashi, T. *et al.*, Electron. Lett. **29**, 1605-1606 (1993).
- 16 - Una longitud de batidos de polarización de 1 mm en 1550 nm corresponde a una diferencia entre los índices de refracción ordinario y extraordinario $\Delta n_{\text{eff}} \cong 1.5 \times 10^{-3}$. <https://www.thorlabs.com/thorcat/TTN/PM1550-XP-SpecSheet.pdf>