

## Análisis de la tecnología cuántica aplicada a la transmisión de datos

### *Analysis of quantum technology applied to data transmission*

Rosa Liz Benites Condori\*

#### RESUMEN

En la actualidad, la gran tasa de bits transmitidos y su tendencia al crecimiento así como la susceptibilidad de los canales de comunicación ante el robo de información durante la transmisión, motivan la búsqueda de alternativas a la transmisión actual de datos. La mecánica cuántica y el estudio de las propiedades de las partículas elementales nos ofrecen una perspectiva diferente que da origen a una tecnología nueva, la tecnología cuántica aplicada en este caso a la transmisión de datos.

El presente artículo se enfoca en un análisis de las limitaciones de la transmisión electrónica y de los alcances de la transmisión cuántica para valorar sus pros y contras ante la reciente convivencia entre ambos sistemas de transmisión; Así también se evalúa la compatibilidad entre ambos, la capacidad del canal donde transmitir y su fiabilidad.

Las conclusiones nos dicen que la tecnología cuántica puede mejorar sustantivamente la capacidad de transmisión de los canales de comunicación, en un medio cuántico libre de interferencias hasta ahora conocidas y compatibles con los sistemas de transmisión electrónica “clásicos”.

**Palabras clave:** tecnología cuántica, transmisión de datos, entrelazamiento cuántico, mecánica cuántica.

#### ABSTRACT

Nowadays the high rate of bits transmitted and its tendency towards increasing, as well as communication channel vulnerabilities facing to data robbery during the transmission motivate the search for alternative of current data transmission.

Quantum mechanics and the study of elementary particles properties offers us a different point of view that gives rise to a new technology, the quantum technology applied, in this case, to data transmission.

This article focus on an objective analysis of electronic transmission limitations and the reach of quantum transmission to estimate its pros and cons against its recent coexistence between both transmission systems; Moreover it is evaluated the type of compatibility between both, transmission channel capacity, and its feasibility.

Conclusions show us that quantum technology can improve greatly the capacity of communication channel transmissions, in a quantum media free from known interferences and compatible with “classic” electronic transmission systems.

**Keywords:** quantum technology, data transmission, quantum entanglement, quantum mechanics.

---

\* Ingeniera Electrónica. E-mail: rosaliz50@hotmail.com

## INTRODUCCIÓN

La transmisión de datos está lejos de ser ideal. Existen diversos problemas aún por resolver, así como diversos enfoques y propuestas de solución. De la gama de problemas que presenciamos día a día durante el proceso de transmisión de datos podemos destacar dos: la gran tasa de bits transmitidos actualmente y su tendencia al crecimiento, y la susceptibilidad de los canales de comunicación ante el robo de información durante la transmisión.

La tasa de bits transmitidos en la actualidad es bastante alta y el análisis de la tendencia en los últimos años lleva a prever un crecimiento mayor. Esto ha sido sustentado por CISCO, uno de los grandes proveedores de dispositivos electrónicos para las redes de computadoras. A partir de este estudio, realizado recientemente, CISCO predice que para el año 2015, el tráfico de datos IP será de casi 1 zettabyte por año y que el número de dispositivos electrónicos interconectados será el doble que la población mundial.

El robo de información durante la transmisión de datos es otro problema al que nos enfrentamos a diario. Un medio de transmisión puede ser espiado y los datos captados por personas ajenas a la comunicación.

En este artículo utilizaremos el término transmisión clásica para referirnos al sistema que utilizamos actualmente y sobre la que está implementada la infraestructura para la comunicación electrónica.

La mecánica cuántica estudia las propiedades e interacciones de los átomos y las partículas elementales y a lo largo de los años, ha demostrado experimentalmente estar en lo correcto. No es algo imaginario ni puramente teórico, sino que son hechos reales. La mecánica cuántica define diferentes propiedades e interacciones que a primera vista van contra la intuición, ya que en nuestro mundo macroscópico los efectos del mundo cuántico no son perceptibles. Entre los avances que ha presentado la mecánica cuántica en el estudio del comportamiento de las partículas elementales y su aplicación a diversas áreas del conocimiento, se toma la propiedad de entrelazamiento cuántico como el recurso principal para investigaciones en cuanto a la transmisión de la información.

Teóricamente la mecánica cuántica puede ofrecer una alternativa al crecimiento de la información a transmitir mediante la utilización de canales clásicos de transmisión asistidos por el entrelazamiento cuántico distribuido sobre un canal cuántico sin ruido.

Así mismo, la mecánica cuántica nos da la posibilidad de emplear sus fundamentos (el papel del observador en la medición de los estados cuánticos) para efectuar la transmisión de datos a través de un canal cuántico de modo seguro.

Un ejemplo de estas investigaciones es el proyecto *Entanglement-based quantum communication over 144km* realizado en Europa con la colaboración de universidades, institutos y empresas pertenecientes a la Unión Europea. En él se implementa un enlace cuántico de transmisión experimental. Dicho enlace permitía la comunicación de datos entre dos islas españolas del sur de la península ibérica, La Palma y Tenerife.

Existen conceptos en la transmisión clásica, donde el electrón es su componente fundamental, que toman un nuevo enfoque cuando se representan por medio de la tecnología cuántica. Sea por ejemplo, el bit, que es la unidad mínima de almacenamiento de los sistemas electrónicos. En el bit está basada la estructura de datos que utilizamos. El bit sólo admite un posible cambio de estado, es decir si su estado es 0 puede pasar a uno y si es 1 puede pasar a 0, esto es totalmente diferente de los estados de los quantum bits o qubits que nos permiten tener estados superpuestos.

Las compuertas lógicas son implementaciones de la lógica booleana basado en un estado binario, verdadero o falso, encendido o apagado, en donde cada compuerta es la representación de una función booleana. En las compuertas que utilizan qubits, o compuertas cuánticas, la transformación que realiza la compuerta es reversible, característica principal que las diferencia de las compuertas

lógicas booleanas, así mismo las compuertas cuánticas modifican la polarización de los estados del qubit.

Otro concepto que se toma en cuenta para este análisis son los medios de transmisión clásicos que se pueden agrupar en dos categorías: los medios de transmisión guiados y no guiados.

Los medios de transmisión guiados son, por ejemplo, los cables de cobre, que nos sirven de medio de transmisión gracias al flujo de electrones libres en este material conductor; O la fibra óptica que es un medio de transmisión basado en los índices de refracción y reflexión del material fotoconductor ante las señales luminosas.

Por otro lado, los medios de transmisión no guiados abarcan los infrarrojos, las microondas y las ondas de radio. Todos estos con sus respectivos rangos de frecuencia dentro del espectro electromagnético.

En la tecnología cuántica se utilizan como medio de transmisión los pares entrelazados (que se generan en base a una partícula elemental, que en el caso de este análisis es el fotón), estos se generan a partir de un láser, el cual es proyectado sobre un cristal de beta-bario borato, este cristal tiene la capacidad de dividir el fotón inicial en dos fotones; A este proceso se le llama conversión paramétrica descendente. Como resultado del proceso ambos fotones tienen propiedades entrelazadas.

Todos estos conceptos nos servirán para entender el análisis de cómo la mecánica cuántica es utilizada en la transmisión de datos, dándonos una perspectiva innovadora.

## Hipótesis

La tecnología cuántica puede mejorar sustantivamente la capacidad de transmisión de los canales de comunicación, en un medio cuántico libre de interferencias hasta ahora conocidas y compatibles con los sistemas de transmisión “clásicos”.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Material

Trabajos de investigación: diversos trabajos de investigación relacionados con la transmisión de datos, la mecánica cuántica, los qubits y otros temas relacionados con la tecnología cuántica.

### Metodología

#### A. *Recolección y preparación de trabajos de investigación referentes.*

Se seleccionaron los trabajos de investigación relacionados con la transmisión de datos actual y su problemática, así como los relacionados con la mecánica cuántica y los orientados hacia la transmisión de datos.

#### B. *Análisis de la capacidad de un canal cuántico.*

Se efectúa los análisis comparativos entre las prestaciones y deficiencias actuales de la transmisión de datos electrónica y la transmisión de datos cuántica, enfocando en esta última la capacidad del canal cuántico.

*C. Análisis de la vulnerabilidad en la transmisión cuántica de datos.*

Se efectúa el análisis comparativo entre transmisión de datos electrónica y la transmisión de datos cuántica enfocando la vulnerabilidad al robo de información.

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos son los siguientes:

*A. Análisis de la capacidad de un canal cuántico.*

Hay cuatro definiciones de la capacidad de una canal basada en la naturaleza de la información transmitida y naturaleza de los canales (clásica o cuántica), estos son:

- C, la capacidad de un canal clásico para transmitir información clásica (bits).
- Q, la capacidad de un canal cuántico para transmitir estados cuánticos (qubits).
- Q<sub>2</sub>, la capacidad de un canal cuántico asistido por uno de los medios clásicos para transmitir estados cuánticos.
- CE, la capacidad de un canal clásico asistido por el entrelazamiento.

Donde:  $Q \leq Q_2 \leq C$  y  $Q \leq C \leq CE$

La capacidad Q de un canal cuántico, es el mayor valor de Q para cualquier velocidad de transmisión R, donde  $R < Q$ , y el valor del entorno e sea  $e > 0$ .

Según un estudio\* que se realizó sobre la capacidad de los canales, tenemos el siguiente cuadro:

**Tabla 1. Comparación de capacidades de los canales de transmisión**

Canal	Q	Q <sub>2</sub>	C	C <sub>E</sub>
Canal de qubits sin ruido	1	1	1	2
Canal de qubits con 50% de ruido	0	1/2	1/2	1
Canal de qubits con despolarización de 2/3	0	0	0.0817	0.2075
Canal de bits sin ruido ó canal de qubits con 100% de desfase	0	0	1	1

La mayor capacidad de transmisión se obtendría con un canal clásico asistido por el entrelazamiento distribuido sobre un canal cuántico sin ruido. Esto duplicaría la capacidad de un canal clásico.

## B. Análisis de la vulnerabilidad en la transmisión cuántica de datos.

La comunicación privada de un estado cuántico es posible usando el entrelazamiento y la encriptación.

---

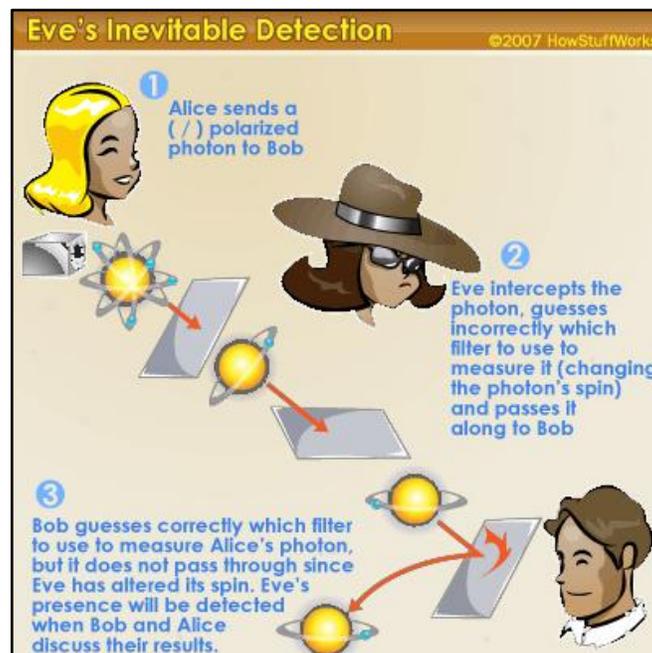
\* Bennett, Charles y otros. Entanglement-Assisted Capacity of a Quantum Channel and the Reverse Shannon Theorem. En: IEEE Transactions On Information Theory, Vol. 48, Número 10, Octubre de 2002.

Supongamos que tenemos a Alice y Bob que desean intercambiar información, compartiendo una clave  $k$  de un conjunto de  $\{1, \dots, m\}$  cada una con su respectiva probabilidad  $P_k$ , entonces Alice desea enviar un estado  $\rho$  a Bob de modo seguro.

Para esto se usan procedimientos de encriptación. Un procedimiento de encriptación sería que Alice añadiera algo más de información en un qubit, añadiendo un estado  $\rho_a$ , este estado dependería de la clave  $k$ , y de la aplicación de alguna función unitaria  $U_k$ .

$U_k$  depende de la clave  $k$  en el estado combinado de  $\rho$  y  $\rho_a$ . Alice enviaría el estado que ha creado a Bob, quien conoce la clave  $k$  y puede descryptar la información aplicando la función unitaria  $U_k^\dagger$  que removería la información añadida y recuperaría el estado  $\rho$ .

Desde la perspectiva de una tercera persona, Eve, que no conoce el estado  $k$  por ser ajena a la comunicación entre Alice y Bob, el estado que obtendría sería una distribución de probabilidades.



**Figura 1. Seguridad de la comunicación cuántica. Fuente**  
<http://science.howstuffworks.com/science-vs-myth/everyday-myths/quantum-cryptology5.htm>

En resumen, para que el proceso de comunicación entre Alice y Bob sea teóricamente seguro, se realiza la encriptación del estado transmitido, de este modo si un espía que obtiene el estado

encriptado incluso conociendo la clave  $k$  no debería ser capaz de obtener información del estado  $\rho$  puesto que el estado encriptado  $\varepsilon(\rho)$  es indistinguible. Esta es la definición de un canal cuántico privado.

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

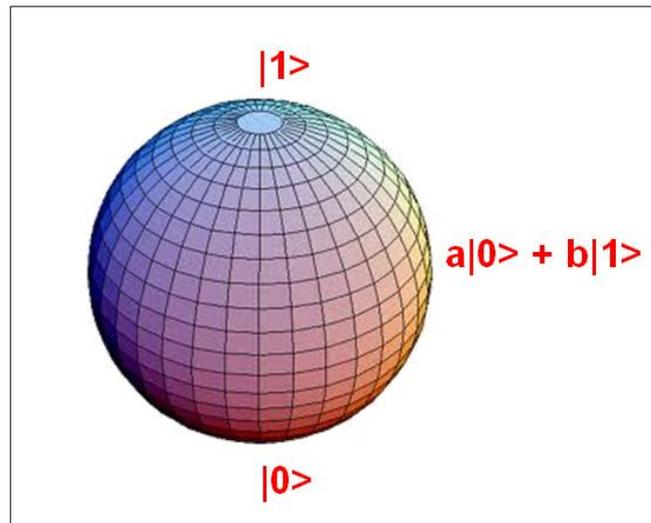
Haciendo un símil con la transmisión clásica, analizamos la transmisión cuántica desde su componente fundamental, en este caso, el fotón.

Cabe destacar que cualquier otra partícula fundamental, e incluso átomos pueden ser utilizados para el proceso de entrelazamiento, pero en este caso se emplea el fotón. El fotón es una partícula elemental de interacción subatómica que no tiene masa ni carga eléctrica. La información transmitida por los fotones puede ser modulada sobre su función de onda usando la amplitud, frecuencia, polarización o fase. Estas ideas actualmente definen las comunicaciones ópticas.

El qubit es la mínima unidad de información cuántica, análoga al clásico bit. Un qubit puede transportar un bit de la información electrónica, pero su riqueza está en contener superposición entre dos estados. La representación general de un qubit es de la forma:

$$a|0\rangle + b|1\rangle$$

Donde  $a$  es el coeficiente complejo del ket\* de 0 y  $b$  el coeficiente complejo del ket de 1. Si obtenemos el valor absoluto al cuadrado de ambos coeficientes tenemos las probabilidades de que el estado final del qubit sea 0 ó 1. Para su tratamiento matemático los qubits se representan como vectores.



**Figura 2.** Representación geométrica de un qubit

Las compuertas cuánticas, a diferencia de las compuertas lógicas son reversibles; es decir, se puede obtener la entrada a partir de la salida. Las compuertas cuánticas cambian la polarización del qubit y

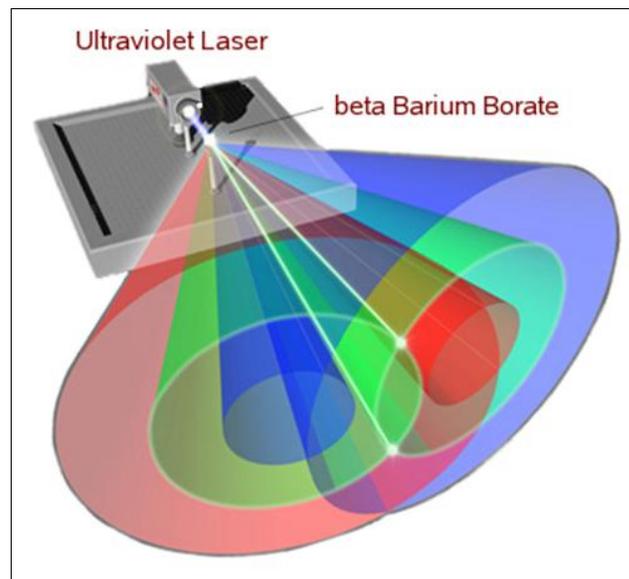
son necesarias para la medición de sus estados. Matemáticamente se representa como un producto de matrices.

Además el fotón como qubit tiene la ventaja de interactuar débilmente con el medio ambiente, pero tiene la desventaja en la dificultad de hacer que un fotón interactúe con otro fotón, porque es una partícula mediadora entre las cargas eléctricas que componen el átomo

Para hacer posible un enlace cuántico hace falta un ingrediente básico: los pares de fotones entrelazados. La generación de los pares entrelazados es a partir de un láser que es proyectado sobre un cristal de beta-bario borato. Tal como se ve en el gráfico inferior.

\* Notación de Dirac ó

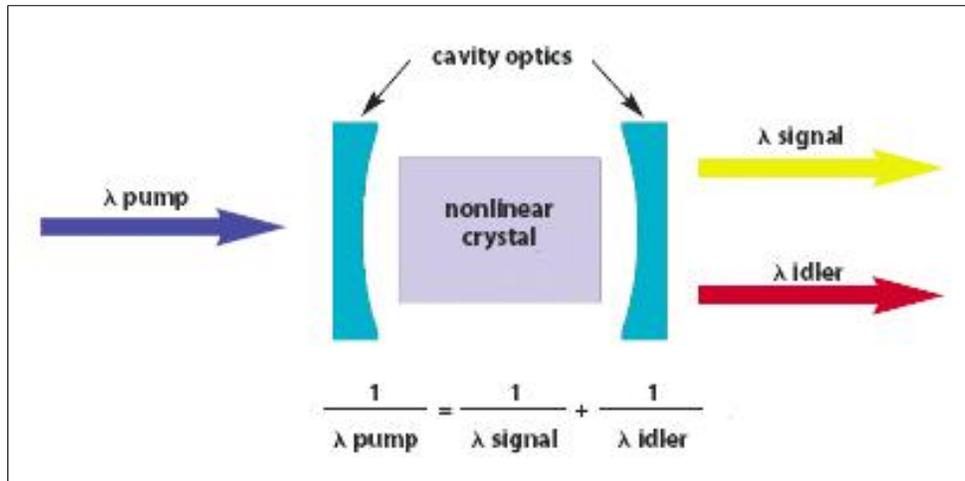
braket.



**Figura 3.** Dispositivo generador de fotones entrelazados. Fuente: Europea Space Agency

Este cristal de beta-bario borato tiene la capacidad de dividir la señal fotónica inicial en dos señales llamadas signal e idler, este proceso es llamado conversión paramétrica descendente\*, ambas señales ahora contienen fotones entrelazados.

Las propiedades individuales de cada fotón entrelazado pueden variar pero la suma de estos debe coincidir con la energía y momento del fotón original.



**Figura 4.** Esquema de la conversión paramétrica descendente. Fuente: <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=25043>

Una vez que tenemos los fotones entrelazados, el enlace cuántico se ha establecido y es independiente de la distancia a la que se encuentren separados los pares.

---

\* El término en inglés es: Parametric Down-Conversion.

El canal cuántico, por el que se realiza la transmisión de la información, está formado por uno o varios pares de fotones entrelazados que se enviarían desde el lugar de su producción hasta el destino de la transmisión. Una vez establecido el canal mediante la distribución de los fotones entrelazados por el espacio libre o la fibra óptica, la transmisión de datos es teóricamente instantánea entre ambos puntos.

Mientras la transmisión clásica tiene como reto superar las limitaciones en velocidad de transmisión, la transmisión cuántica tiene la característica inherente de ser instantánea, aunque de momento no es posible explotar esta característica debido a limitaciones tecnológicas.

Otro aspecto fundamental es la seguridad ante interferencias que ofrece la transmisión cuántica. Nuevamente por una característica inherente del mundo cuántico, la observación, es decir cualquier medición, colapsa la función de onda y determina un estado concreto.

## CONCLUSIONES

La transmisión cuántica es una realidad y su aplicación tiene compatibilidad descendente con la transmisión electrónica. Esto sustentado por la capacidad de un canal cuántico para transmitir bits y qubits, mientras que un canal clásico únicamente puede transmitir bits.

La transmisión cuántica es otra forma de transmitir datos con el doble de capacidad que la transmisión electrónica. Esto sustentado por la afirmación de que un canal clásico asistido por el entrelazamiento, distribuido sobre un canal cuántico sin ruido, duplica la capacidad de transmisión del canal clásico.

El entrelazamiento cuántico permite una comunicación libre de interferencias. Esto sustentado por la mecánica cuántica que reconoce el entrelazamiento como una propiedad fundamental que es

usada para la transmisión de información independiente de la distancia y sin un medio físico conocido.

Las investigaciones en este campo no hacen más que empezar. Su importancia va en crecimiento, ya que ofrece nuevas prestaciones. Para continuar con el progreso de las comunicaciones, es fundamental la difusión de la mecánica cuántica, que tiene además gran impacto en el desarrollo de otros campos.

Por parte de la electrónica es necesario desarrollar dispositivos transmisores comerciales que hagan las veces de interfaz entre el medio cuántico de transmisión y el resto de dispositivos electrónicos existentes, así como el diseño de repetidores del enlace cuántico para abarcar mayores distancias

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Libros

- Ljunggren, Daniel. Entanglement in quantum communication. Preparation and characterization of photonic qubits. KTH Information and Communication Technology. Estocolmo. 2006. 118 pp.
- Dan y Marinescu, Gabriela. Classical and Quantum Information. Editorial Academic Press, 2012, 709 pp.
- Nielsen, Michael y Chuang, Isaac. Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition. Cambridge University Press, diciembre de 2010, 708 pp.
- Tomásí, Wayne. Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. Pearson Educación, 2003, 948 pp.
- Zeng, Guihua. Quantum Private Communication. Ed. Higher Education Press, 2010, 380 pp.

### Artículos

- Aspelmeyer, M. y otros. Entangled Photons and Quantum Communication. Elsevier. Vienna. 2004.
- Bennett, Charles y otros. Entanglement-Assisted Capacity of a Quantum Channel and the Reverse Shannon Theorem. En: IEEE Transactions On Information Theory, Vol. 48, Número 10, Octubre de 2002.
- Bryan, Kurt. The Dirac Delta Function. <http://www.rose-hulman.edu/~rickert/Classes/ma222/Wint0102/dirac.pdf>
- Chakrabarti, R. y Van der Jeugt, J. Quantum communication through a espín chain with interaction determined by a Jacobi matrix. Ghent University (Bélgica). 2009
- CISCO Visual Networking Index. CISCO Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2010–2015. CISCO. Junio de 2011.
- CISCO Visual Networking Index. CISCO Visual Networking Index: Usage. CISCO. Junio de 2011.
- CISCO Visual Networking Index. Entering the Zettabyte Era. CISCO. Junio de 2011.
- Esparza, Charles. Transmission Media Security. SANS Institute, 18 de agosto de 2004.
- Humble, Travis. GNU Radio for Quantum Optical Communication. Philadelphia. Estados Unidos. Computer Science and Mathematics Oak Ridge National Laboratory. Septiembre de 2011.

- Karam, Mansour y Tobagi, Fouad. On Traffic Types and Service Classes in the Internet. Estados Unidos. Stanford University.
- Saeed, Arsalan. Optical Fiber Security, Tapping & Its Defensive Methodologies. Journal of Engineering and Sciences. Enero- Junio 2010. Pp. 42-45.
- Schmitt-Manderbach, Tobias y otros. Experimental Demonstration of Free-Space Decoy-State Quantum Key Distribution over 144 km. En: Physical Review Letters (The American Physical Society), 5 de enero de 2007.
- Sen(De), Aditi y Sen, Ujjwal. Quantum Advantage in Communication Networks. Mayo de 2011.
- Shapiro, Jeffrey y otros. Optical and Quantum Communications. Optical and Quantum Communications Group.
- Ursin, R. y otros. Entanglement-based quantum communication over 144km. En: nature physics (Nature Publishing Group), 2007, vol 3, 3 de junio de 2007. Pp. 481-487.
- Wang, Lei y otros. Quantum Information Transmission. China. College of Physics, Jilin University. Febrero de 2012.
- Yu Li. Degradable Quantum Channels. Carnegie-Mellon University, Pittsburgh. Mayo de 2007.

#### Agradecimientos

Agradezco el apoyo de Jean Pierre Arteaga Álvarez cuyo aporte fue fundamental en la realización de este trabajo.

