

LA FOTÓNICA Y EL AÑO INTERNACIONAL DE LA LUZ

LECCIÓN INAUGURAL
DEL CURSO ACADÉMICO 2015-2016
PRONUNCIADA POR EL
PROF. DR. MANUEL LÓPEZ-AMO SAINZ

CATEDRÁTICO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
DE LA UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA

LA FOTÓNICA Y EL AÑO INTERNACIONAL DE LA LUZ

LECCIÓN INAUGURAL
DEL CURSO ACADÉMICO 2015-2016
PRONUNCIADA POR EL
PROF. DR. MANUEL LÓPEZ-AMO SAINZ
CATEDRÁTICO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
DE LA UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA



Pamplona, 11 de septiembre de 2015

Edita: Universidad Pública de Navarra / Nafarroako Unibertsitate Publikoa
Coordinación: Servicio de Comunicación
Fotocomposición: Pretexto. pretexto@pretexto.es
Imprime: Ulzama Gráficas
Depósito Legal: NA 1549-2015
Distribución: Sección de Publicaciones
Universidad Pública de Navarra
Campus de Arrosadia
31006 Pamplona
Fax: 948 169 300
Correo: publicaciones@unavarra.es

Sra. Presidenta de la Comunidad Foral de Navarra,
Sr. Rector Magnífico,
Excelentísimas e Ilustrísimas Autoridades,
Miembros de la Comunidad Universitaria,
Señoras y Señores,

Cuando recibí el encargo del señor Rector para impartir esta lección inaugural del curso 2015-2016 sentí un par de sentimientos encontrados. Por un lado, el agradecimiento por la confianza otorgada para pronunciar estas palabras ante este selecto auditorio y, por otro lado, la sensación del paso del tiempo. No es ningún secreto que la antigüedad en el cargo influye a la hora de seleccionar al orador.

Lo que sí que decidí rápidamente fue que la lección, como se esperaba, se ciñera a mi campo de docencia e investigación. No es el momento ni el lugar para expresar mis opiniones sobre el estado de la universidad en nuestro país ni sobre cosas más lejanas.

Además, se da la circunstancia de que este año mi materia favorita está oficialmente de moda. 2015 es el *Año Internacional de la Luz*, decisión tomada por la Asamblea General de la ONU en su sesión de 20 de diciembre de 2013. Sin embargo, esta coincidencia no va a evitar que le dé el inevitable toque «retro» a la lección.

Es un hecho curioso que la luz tardara tanto en tener su año internacional, pues por ejemplo, si nos vamos al libro más vendido y citado de la historia (la Biblia), ya en su tercera línea se dice: Dijo Dios: «Haya luz», y hubo luz [0].

Siendo una prioridad clara de Dios activar la luz, me parecía que los mortales nos habíamos tomado con más calma su utilización, y había tardado demasiado su reconocimiento por parte de las Naciones Unidas. Hasta que elaborando esta charla vi que 2015 también es el año internacional del suelo. Y 2016 es el año internacional de los «camélidos»: «Observando la ONU que los camélidos son mamíferos ungulados artiodáctilos estrictamente herbívoros...» [1]. Así que pensé en rehacer el título de la charla, visto que el término de «año internacional» ya no me parecía tan serio. Cambio que haré si me da tiempo a repasar este escrito.

La razón por la que la luz ha sido tardíamente reconocida puede residir en que la fotónica, que es la ciencia y la tecnología dedicada a la luz [2], se encuentra en sus albores. Una prueba parcial de ello es el hecho de que hasta 2013 no ha sido declarada como una de las 6 tecnologías esenciales para el desarrollo de Europa [3].

Afortunadamente cada vez tenemos un planeta más iluminado. No me refiero a la mal llamada contaminación lumínica. Éste es un concepto acuñado con éxito básicamente por los aficionados a la astronomía que se quejan de que se tienen que apartar de las ciudades para ver sus estrellas y planetas favoritos. Han conseguido introducir el término hasta en la declaración de la ONU del año internacional de la luz.

A lo que íbamos, tenemos y generalmente queremos tener un planeta cada vez más iluminado. Por ejemplo, la fibra óptica (y la luz que va por su interior) ha llegado a nuestras casas para quedarse. Hasta hace poco tiempo era impensable que pudiéramos conectarnos desde un hogar normal y corriente a velocidades de transmisión superiores a 100 Mb/s.

Y sin embargo, la demanda de ancho de banda de la sociedad ha hecho que económicamente sea viable que la luz que viaja por las fibras ópticas nos conecte con el resto del planeta.

La demanda de ancho de banda. Otro concepto acuñado recientemente pero que parece que se acepta como natural. ¿Para qué ese ancho de banda? Todo el mundo podría contestarme rápidamente: para ver numerosos canales de televisión con una calidad decente, para videojuegos interactivos, para poder ver una página web de Nueva Zelanda y que se descargue rápidamente... ¿Una página web alojada en un servidor de Nueva Zelanda? Hace un par de décadas esto era impensable. De hecho, no existían las páginas web. Y sin embargo hoy no sólo lo asumimos como normal, sino que nos ponemos nerviosos si tarda más de dos segundos en salir en la pantalla del ordenador.

Parece ser que el ser humano no sólo estaba preparado para usar esta tecnología, sino que la necesitaba. La transmisión de información, el intercambio de información

resulta ser una necesidad intrínseca en el ser humano. De hecho algunos sociólogos califican este período actual como el «infolítico», la edad de piedra de la sociedad de la información [4]. No en vano todo esto comenzó hace muy poco. Hoy en día las tecnologías de la información y las telecomunicaciones (TIC) resultan ser una industria que ya supone más del 5 % del producto interior bruto de España (mucho más que la agricultura y la pesca juntas). En los países más avanzados la cifra se acerca al 10 % del PIB [5]. El crecimiento de este sector antes de la crisis era cercano al 4 % anual. Pocos sectores crecen a este ritmo.

Las implicaciones sociales de las telecomunicaciones y los cambios sociales inducidos también son notables. No sólo la reducción de viajes rutinarios gracias al teletrabajo o a la telemedicina. También sus implicaciones evidentes en la política y en las llamadas redes sociales. Y la alteración del concepto de abundancia para definir el precio de todas las cosas. En la economía tradicional, un bien escaso y poco accesible tiene un precio mayor que un bien abundante. En la sociedad de la información, las reglas son muy diferentes. Más aún, el propio dinero apenas existe físicamente, sino en el mundo virtual. La mayor parte de lo que llamamos dinero no es más que un número en un ordenador de un banco, que se transmite a los comercios cuando realizamos una compra con nuestra tarjeta o a las compañías del gas o del agua. Cada vez menos veces se transmite ese número a los cajeros automáticos para transformarse en billetes.

Pero estoy divagando. El objetivo de esta charla no debe ser otro que una árida lección de tecnología fotónica.

1. En el principio fue la luz

Al menos para las telecomunicaciones. Las primeras redes de telecomunicaciones que se consideran como tales eran redes ópticas [6]. Se basaban en torres separadas entre 10 y 20 kilómetros en cuya parte superior se situaban partes móviles capaces de transmitir códigos a la siguiente torre [7]. La versión española consistía en dos filas de listones entre las que se situaba otro listón móvil llamado indicador, para componer doce signos diferentes que tenían su traducción en un libro de códigos. En 1836 cruzaban por Navarra dos líneas que conectaban Pamplona y Vitoria con Logroño [8]. Aún quedan en pie algunas de las torres, como la de Beratxa, entre Tafalla y Larraga. La velocidad de transmisión de estos ingenios era de un símbolo cada 20 segundos, más o menos (que podría equivaler a dos bits por segundo). Hasta 1857 se desarrolló la red española de telegrafía óptica que conectaba Madrid con el Norte, el Sur y el Mediterráneo hasta la frontera con Francia. Un mensaje enviado de Madrid a Cádiz podía llegar mediante la línea de torres ópticas en el tiempo



Torre de Beratxa (Navarra) [9].



Torre de telégrafo óptico reconstruida en Adanero.



Red de telegrafía óptica en España [10].

récord de unas dos horas, mientras que un jinete a caballo (la única alternativa a esta primitiva Internet) podía cubrir esa misma distancia portando un mensaje escrito en dos días... si no sufría contratiempos. La red transmitía tan solo el equivalente a unos dos bits por segundo. En la tecnología utilizada se incluían algunos rudimentarios instrumentos ópticos para ver a gran distancia.

Para la comunicación, los telégrafos empleaban un «libro de claves». Emitían «números» en secuencia que a su vez indicaban en qué página y línea estaban las palabras que componían un mensaje.

A principios de 1838 Samuel Morse hizo una demostración del telégrafo eléctrico, un sistema de comunicación superior, mucho más poderoso, que daría lugar a lo que ahora se llama sarcásticamente la «Internet victoriana». Este invento relegaría a las líneas de telégrafos ópticos a un segundo plano, hasta su desaparición paulatina.

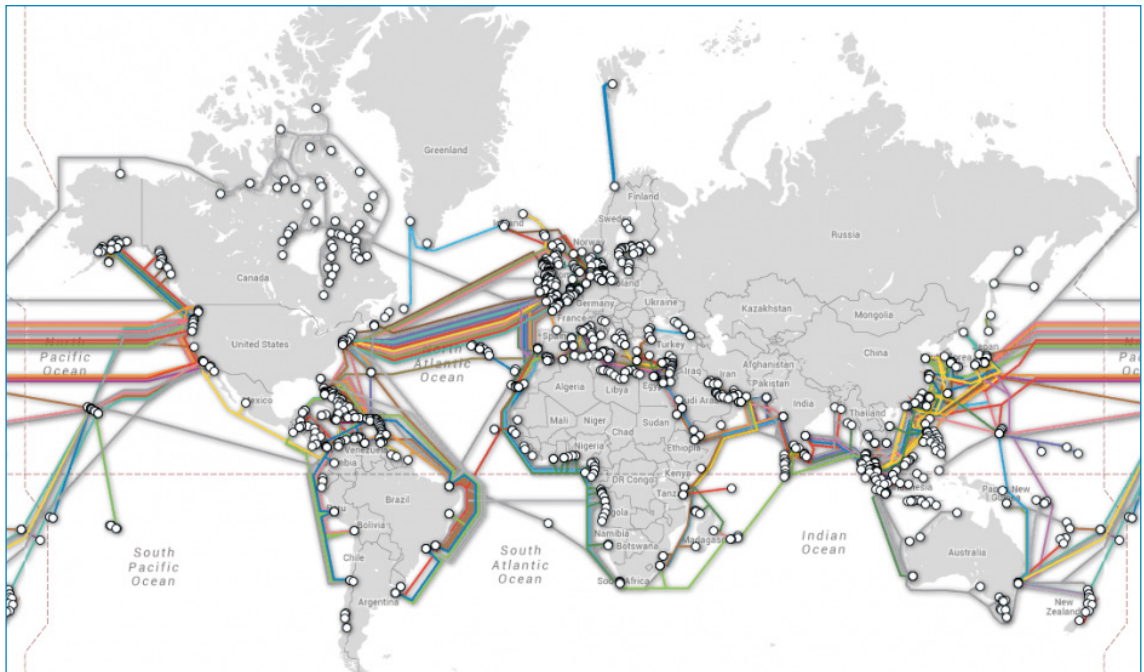
Y se hizo la oscuridad y los fotones fueron desplazados por electrones en las telecomunicaciones.

2. El retorno de la luz

Si bien los fotones viajan por la fibra óptica a velocidades cercanas ($2/3$) a la de luz en el vacío, también las señales eléctricas viajan a velocidades parecidas por los cables de cobre. Las grandes diferencias entre ambos medios de transmisión son el alcance y, sobre todo, el ancho de banda. Cuando las empresas de telecomunicación necesitaron más ancho de banda surgió la oportunidad de aplicar un invento de finales de los años 60 del siglo XX, la fibra óptica. Fue inventada en su versión de sílice en los laboratorios Standard de Harlow, Gran Bretaña, por Charles K. Kao, doctor en Ingeniería Electrónica (y Premio Nobel de Física en el año 2009). Junto con el diodo láser y los fotodetectores de semiconductor, permite el establecimiento de conexiones a 100 Gb/s entre dos puntos de una red a muchos kilómetros de distancia.



Dr. Charles K. Kao (Premio Nobel de Física 2009).



Mapa de enlaces submarinos de fibra óptica (2015) [11].

Así, las conexiones de banda ancha entre nodos de las redes de comunicaciones se hacen desde los años 80 del siglo XX mediante fibra óptica, y los límites del ancho de banda disponible en una sola fibra aún no están claros, superando en desarrollos de laboratorio desde hace tiempo las decenas de Tb/s.

La superficie terrestre del planeta está fuertemente interconectada mediante fibra óptica, por no hablar de los incontables enlaces submarinos que conectan las costas de los países. Así, la densidad de enlaces submarinos indica las zonas de mayor desarrollo económico.

En esta década estamos además viendo el avance de la fibra óptica hasta nuestros hogares. Esto es debido a que el ancho de banda demandado por el cliente justifica semejante inversión económica. En definitiva, estamos observando la sustitución del cable de cobre por el cable de fibra óptica (y de los electrones por fotones).

3. Convivencia de la electrónica y la fotónica

Al igual que la Edad de Piedra no se acabó por falta de piedras [12], la era de la electrónica no se acabará por falta de electrones, sino por otra tecnología que la reemplace. Al menos parcialmente, la fotónica comienza a ser esa tecnología.

Si bien los emisores y detectores de luz tienen que reducir sus precios, la fotónica cuenta con una gran ventaja frente a la electrónica. A diferencia de los cables metálicos, la fibra óptica está hecha de un material barato: la sílice, el mismo material base que se emplea para fabricar los vidrios de las ventanas. La arena es básicamente sílice, por lo que esta materia prima ni es estratégica ni está sujeta a oscilaciones de los mercados.

A día de hoy, en las redes de telecomunicaciones ópticas, que interconectan centrales y usuarios casi a la velocidad de la luz, «el cuello de botella» se encuentra en los nodos de la red. Estos nodos, que ya incluyen algunos componentes fotónicos, tienen principalmente componentes electrónicos. Y seguirán siendo electrónicos mientras el cerebro de los mismos, los microprocesadores, sigan siendo electrónicos. Aunque ya se han dado pasos para conseguir el equivalente fotónico de los transistores [13] –pieza básica de los microprocesadores– todavía la tecnología tiene que avanzar mucho para llegar a desarrollar microprocesadores totalmente ópticos.

Por otra parte, las comunicaciones ópticas no guiadas presentan el inconveniente de la necesidad de visibilidad directa (o reflejada) para poder establecer comunicaciones de calidad. Este hecho lo conocemos muy bien ya que en nuestras propias casas usamos los mandos de infrarrojos para cambiar los canales de la televisión. Por tanto, es bastante difícil que los terminales de comunicaciones móviles trabajen y emitan a frecuencias ópticas y que sus componentes dejen de ser electrónicos.

Así que la fotónica de telecomunicaciones (y de otras cosas) está de momento constreñida por un control electrónico. Además en los equipos de telecomunicaciones hace falta un proceso de conversión de electrones a fotones y viceversa en el que se pierde típicamente más de un 30 % de la energía y, sobre todo, mucho ancho de banda. Es por tanto deseable la sustitución en muchas aplicaciones de la electrónica por la fotónica, aunque, seguramente, las dos tecnologías convivirán hasta la aparición de algo nuevo que las reemplace, si esto es posible.

4. Otras aplicaciones de la fotónica

Además de la aplicación obvia en iluminación, donde encontramos cada vez más componentes utilizados previamente en telecomunicaciones (el diodo LED, la fibra óptica...), la fotónica se emplea cada vez más en campos muy diversos.

Por mencionar aplicaciones muy conocidas, debemos resaltar lo que algunos llaman fotónica de potencia, que incluye desde la generación de energía consumible a través de células solares (materias primas: el silicio, el sol y posiblemente el grafeno en el futuro, materias nada escasas) a los láseres de nueva generación, capaces de

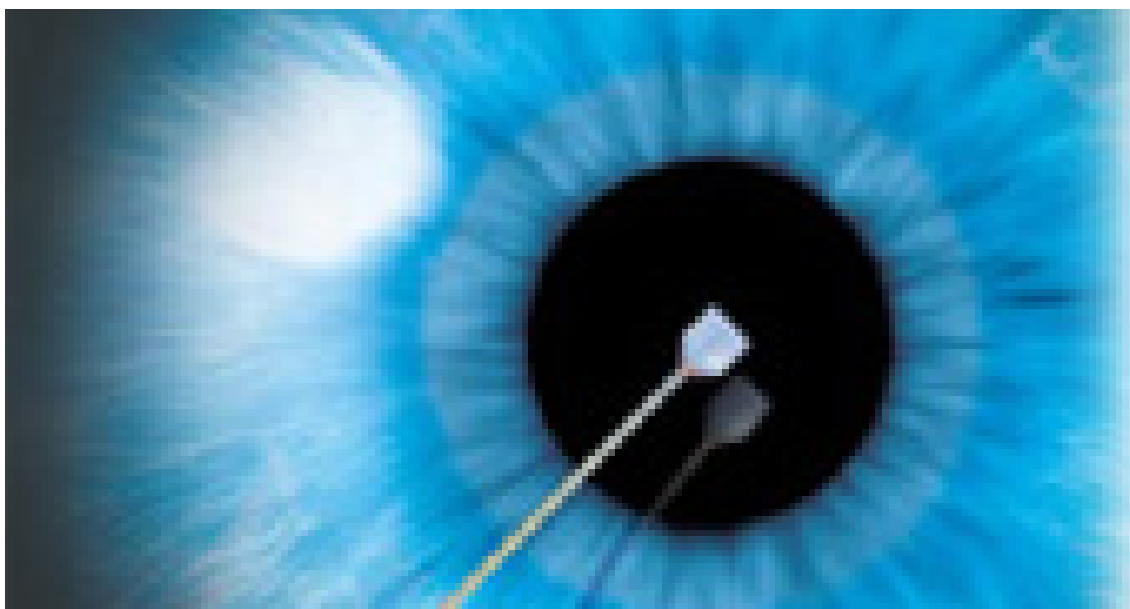


Imagen de un sensor de fibra óptica.

emitir potencias de pico de muchos MW [14]; y capaces de cortar bloques de acero en pocos segundos.

Tampoco debemos olvidar su utilidad en medicina, para hacer operaciones delicadas, como la cirugía oftalmológica láser o el análisis Raman de tejidos.

Otra de las aplicaciones de éxito es la utilización de la fibra óptica como sensor. A pesar de que la fibra óptica, el vidrio, es un material bastante inerte e inmune a las interferencias electromagnéticas, se puede conseguir que la fibra óptica sirva para medir parámetros tan diversos como temperatura, humedad o campos eléctricos. Así, hace tiempo que los sensores de fibra han tomado nichos de mercado como los giróscopos de los aviones, la medida de temperatura y presión en oleoductos y pozos petrolíferos, y la monitorización de puentes y túneles. Y dado el tamaño de la fibra óptica, se está empezando a usar en medicina para aplicaciones avanzadas.

5. El futuro

Decía al comienzo que estamos en los albores de la fotónica.

Estamos utilizando hoy en día a los fotones como si fueran electrones; rudamente, para cortar chapas de acero o ponernos morenos con radiación ultravioleta; y un poco más delicadamente, para cortar la córnea o eliminar manchas de la piel. Hemos

llegado incluso a cazar fotones con células solares transformándolos en electrones. En comunicaciones ópticas, y porque no ha quedado más remedio por la mencionada «gran demanda de ancho de banda», hemos pasado recientemente de apagar y encender la fuente de luz para mandar unos y ceros, a insertar la información en la fase o en la polarización de la luz.

Y sin embargo, la luz tiene unas propiedades que se han empezado a utilizar desde hace muy poco tiempo. Pondré un par de ejemplos:

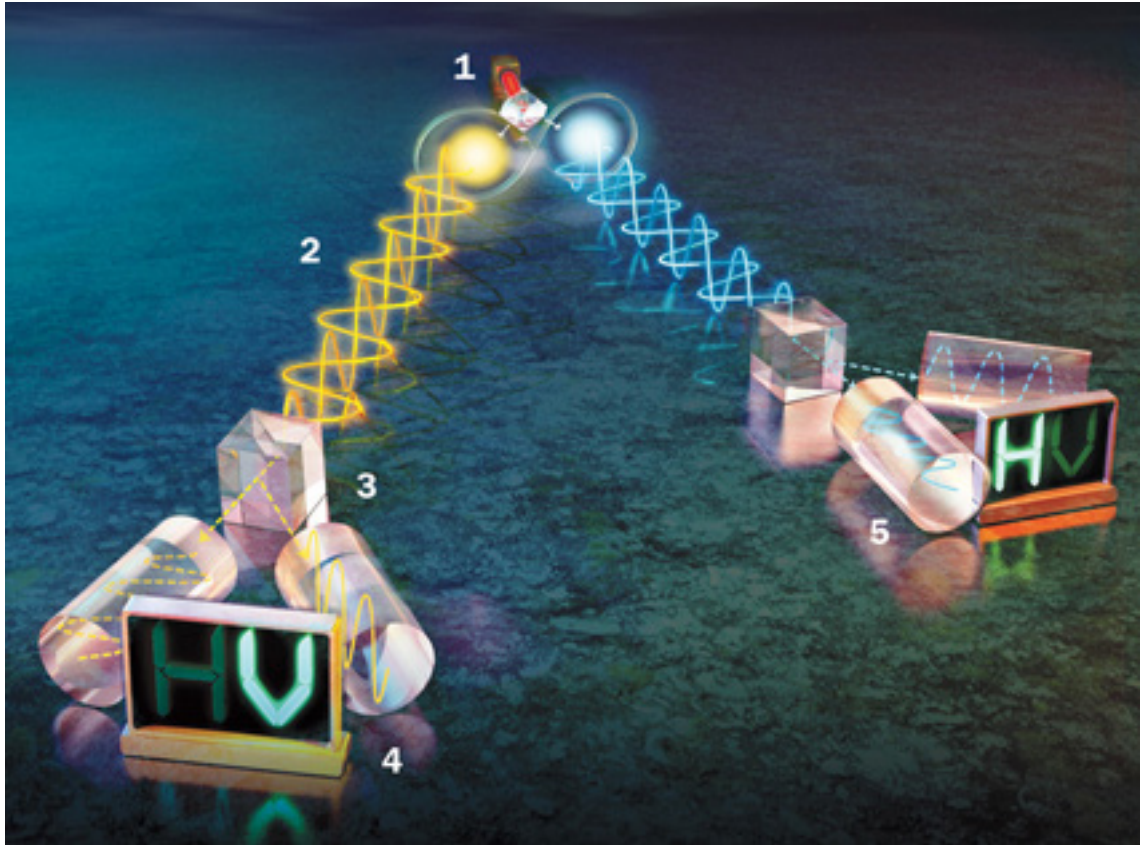
Está ya en fase de pruebas el primer supercomputador óptico [15], que usa la difracción de la luz y pantallas de cristal líquido reconfigurables. De él se espera que reduzca el consumo eléctrico en un 95 %, en comparación con los superordenadores existentes con la misma velocidad de cálculo. Es un primer paso para la sustitución de los ordenadores electrónicos por una nueva generación que procese la información en forma de luz.

El siguiente ejemplo también es muy propio del siglo XXI. Uno de los problemas recientemente surgidos como consecuencia de la sociedad de la información y de Internet es la aparición del llamado cibercrimen y el concepto de ciberseguridad. Las técnicas de encriptación al uso tarde o temprano consiguen ser descifradas por los ciberdelincuentes; generando los problemas que todos conocemos. Así las cosas, en 1997 un experimento realizado en Suiza dio lugar al despegue de la llamada encriptación cuántica. El experimento consistía en enviar por fibra óptica dos fotones gemelos, generados por el mismo láser, en sentidos contrarios hacia unos detectores separados a una distancia de 18 km entre sí. Antes de llegar a los detectores y una vez que los fotones habían recorrido la misma distancia (9 km), éstos se encontraban con una bifurcación óptica, un divisor de haz.

Resultó que los fotones, separados 18 km, al llegar a la bifurcación tomaban simultáneamente y siempre la misma decisión. De manera que si uno iba hacia el detector A, el otro también. Y cuando «tocaba» ir al B, el otro también lo hacía.

En definitiva, el experimento demostró el llamado entrelazamiento cuántico, puesto en duda por el mismo Albert Einstein en 1935. Esta decisión idéntica tomada simultáneamente por dos fotones separados por kilómetros no demostraba la posibilidad de comunicaciones a velocidades superlumínicas. Sin embargo, apoyadas en este hecho, varias compañías desarrollaron encriptadores cuánticos [17]. Estos sistemas son capaces de transmitir hoy en día claves teóricamente no descifrables a dos puntos de una red óptica separados 50 km.

Este fenómeno se ha llegado a comprobar a una distancia de 143 km [18], la separación entre las islas de la Palma y Tenerife. Que dos fotones entrelazados tomen



Representación del experimento de Nicolas Gisin: 1) Fuente de fotones gemelos; 2) Fibra óptica; 3) Divisor de haz; 4 y 5) Detectores ópticos [16].

simultáneamente la misma decisión a muchos kilómetros de distancia no quiere decir que se transmitan información instantáneamente. Pero sí es una manera de transmitir una clave que sólo conocen las personas que se quieren comunicar y que incluso ignora el equipo que ha emitido la clave. Aparentemente, esta codificación *hardware* es indescifrable. ¿O no? [19].

6. Resumen y conclusiones

En cualquier caso, con estos ejemplos recientes que hacen uso de las propiedades cuánticas de la luz quiero cerrar esta lección recordando brevemente parte de lo dicho.

- La luz es ya importante en nuestra sociedad y tiene más aplicaciones que la mera iluminación. Nos encontramos ahora en un edificio conectado por fibra óptica, con proyectores de imágenes y con multitud de sensores fotónicos en

su interior. La fotónica de consumo, que va desde las pantallas de TV a las impresoras láser, pasando por muchos equipos de telecomunicaciones o por las células solares, supone a día de hoy un mercado muy extendido.

- Sin embargo, algunas propiedades de la luz se han comenzado a utilizar muy recientemente y se espera que la fotónica nos proporcione numerosas alternativas en los campos de la computación, los sensores y las redes de telecomunicaciones.

Referencias

- [0] Génesis.
- [1] Asamblea General de la ONU, «Año internacional de los camélidos. 7 de noviembre de 2014», [<http://www.un.org/es/comun/docs/?symbol=A/C.2/69/L.41>].
- [2] [<http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/photonics>].
- [3] [http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/ict/key_technologies/index_en.htm].
- [4] Gustavo Matías, «La importancia de los contenidos en la economía de la sociedad de la información», en *Los problemas de las telecomunicaciones en España*, Madrid, Círculo de Empresarios, 1996, pp. 19-55.
- [5] EITO, «Indicador mercado de las TIC/PIB», [<http://www.eito.com/>].
- [6] José Antonio Martín Pereda, *Sistemas y redes ópticas de comunicaciones*, Madrid, Pearson, 2004.
- [7] *El telégrafo óptico: el equivalente a Internet de hace siglos* (2008), [<http://www.microsiervos.com/archivo/tecnologia/telegrafo-optico.html>].
- [8] *De las señales de humo a la sociedad del conocimiento*, Madrid, Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, 2006.
- [9] Archivo del patrimonio inmaterial de Navarra. Departamento de Filología y Didáctica de la Lengua. Universidad Pública de Navarra, [<http://www.navararchivo.com/galerias/larraga/04%20Alrededores/249.JPG>].
- [10] [<http://www.descubrecoca.com/2012/03/la-torre-mathe.html>].
- [11] [<http://www.submarinecablemap.com/#/>] (2015).
- [12] Jeque Ahmed Yamani, [<http://www.eluniversal.com/opinion/111017/petroleo-para-300-anos>].
- [13] «Plasmonic» material could bring ultrafast all-optical communications (2015), [http://www.opli.net/opli_magazine/eo/2015/plasmonic-material-could-bring-ultrafast-all-optical-communications-july-news/].

- [14] J. Wallace, «Laser pump sources: Four 800 kW laser-diode arrays to pump high-pulse-rate HALPS petawatt laser» (2015), [<http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-51/issue-05/world-news/laser-pump-sources-four-800-kw-laser-diode-arrays-to-pump-high-pulse-rate-hapls-petawatt-laser.html>].
- [15] [<http://optalysys.com/2015/>].
- [16] Laura Sanders, «Everyday Entanglement» (2010), [<https://www.sciencenews.org/article/everyday-entanglement>].
- [17] [http://www.magiqtech.com/Products_files/QBox%20Datasheet-2011.pdf].
- [18] Un experimento de la ESA en Tenerife bate el récord mundial de teleportación cuántica (2012), [http://www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/Un_experimento_de_la_ESA_en_Tenerife_bate_el_record_mundial_de_teleportacion_cuantica].
- [19] Commercial Quantum Cryptography System Hacked (2010), [<http://www.technologyreview.com/view/418968/commercial-quantum-cryptography-system-hacked/>].