

CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE TRANSECTOR BASADO EN ÓPTICA DE ESPACIO LIBRE

Bruno Benedetti, Lucas González, Matías Roubaud, Benigno Rodríguez

Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Julio Herrera y Reissig 565, 11300 Montevideo, Uruguay
E-mails: bruno.benedetti@outlook.com, lucas.gonzalezperi@gmail.com, matiasroubaud@gmail.com,
benigno@fing.edu.uy

RESUMEN

Actualmente se observa un incremento en el uso de enlaces basados en óptica de espacio libre (FSO) como respuesta a la siempre creciente demanda de aplicaciones inalámbricas. Para contribuir al desarrollo de esta tecnología es importante tener un prototipo básico o banco de pruebas sobre el cual trabajar. En este trabajo se presenta la construcción de un transceptor básico basado en FSO. Este tiene interfaces Ethernet y logra una tasa de datos de 10 Mbps en un rango probado de 25 m. Rangos mayores pueden lograrse mejorando los lentes utilizados (lupas domésticas). Este primer prototipo permite trabajar en mejoras para convertirlo en un dispositivo comercial y también ganar conocimiento sobre esta tecnología a los efectos de evaluarla como alternativa de enlace inalámbrico entre satélites. Ambas líneas de investigación fueron iniciadas en el Departamento de Telecomunicaciones del Instituto de Ingeniería Eléctrica al finalizar la construcción de este prototipo.

PALABRAS CLAVES: Óptica de Espacio Libre, Transceptor, Sistemas Inalámbricos.

CONSTRUCTION OF A TRANSCIEVER PROTOTYPE BASED ON FREE SPACE OPTICS

ABSTRACT

An increase in the use of Free Space Optics (FSO) links is observed as a response to the always growing demand of wireless applications. To contribute in the development of this technology it is important to have a basic prototype or testbed available to implement solutions. In this work it is presented the construction of a basic FSO based transceiver. This one has Ethernet interfaces and achieves a throughput of 10 Mbps in a tested range of 25 m. A longer range is achievable by improving the used lenses (household loupes). This first prototype allows to improving this device for commercial purposes and also to gain knowledge about this technology to evaluate the device as a wireless link alternative between satellites. Both of this research lines were started after the implementation of this first prototype in the Telecommunication Department of the Electrical Engineering Institute.

KEY WORDS: Free Space Optics, Transceiver, wireless systems.

1. INTRODUCCIÓN

Un transceptor basado en Óptica de Espacio Libre (FSO), consiste en un sistema de comunicaciones ópticas para transmitir información entre dos puntos. El sistema utiliza luz visible o infrarroja generada mediante *leds* o *láser*s en el transmisor, la cual es capturada en el receptor por un fotorreceptor y convertida en una señal eléctrica nuevamente. Actualmente existen diversas implementaciones de FSO con velocidades del orden de los Gbps y con alcances de entre 2 y 3 kilómetros.

Entre sus ventajas se encuentran que se puede implementar un enlace de gran capacidad y rápido despliegue, posibilitando adecuarse de manera continua a los requerimientos de la aplicación. Asimismo, se tiene la posibilidad de montar y desmontar rápidamente el equipo por lo que muchas veces resulta una opción conveniente para eventos temporales o casos de emergencia.

A su vez los sistemas FSO trabajan en el espectro visible o infrarrojo, a frecuencias entre 3 y 750 THz, las cuales no están regulados por la International Telecommunication Union (ITU). De esta forma se evitan los altos costos de adquisición de licencias de espectro que implican otras soluciones inalámbricas. Otra ventaja con respecto a otras tecnologías inalámbricas es que no existe interferencia entre los sistemas, ya que la información se transmite mediante un haz de luz extremadamente directivo y angosto. Esto implica también una ventaja en cuanto a la seguridad, ya que es muy difícil interferir el haz sin que esto sea detectado por el usuario.

La principal limitante en cuanto a capacidad y alcance de estos sistemas son los factores meteorológicos. La niebla, lluvia, intensidad del sol, absorción atmosférica, centelleo, etc., son algunas de las condiciones que disminuyen la potencia del haz transmitido [1].

En este trabajo se tomó como punto de partida el trabajo realizado en el proyecto “Láseres en Espacio Libre y Ondas Milimétricas” [2], que estudia la viabilidad de esta tecnología considerando las condiciones meteorológicas en Uruguay. En [2] y [3] se realizaron estudios considerando las condiciones climáticas de la ciudad de Montevideo, donde se observó que para enlaces con distancias cercanas a los 1000 m la disponibilidad varía entre el 99% y 99,7%. Si bien no se trata de una excelente disponibilidad, resulta suficiente para varias aplicaciones. Estas características así como sus aplicaciones sirven de motivación para el estudio de este tipo de enlaces inalámbricos.

En tecnologías de 4ta. y 5ta. generación, los sistemas FSO pueden resultar una alternativa práctica como backhaul. Al ser una tecnología inalámbrica corresponde a una opción de rápido montaje, sin necesidad de grandes obras civiles y en este caso exonerada del pago de licencias por el uso del espectro. A su vez, se diferencia de otras tecnologías inalámbricas, en que se trata de sistemas muy directivos que no generan interferencia sobre otros enlaces. Existen también otras aplicaciones posibles para esta tecnología, por ejemplo, es una alternativa de rápido despliegue para conexiones de área local entre edificios corporativos sin necesidad de contratar una VPN al proveedor de servicios de Internet (ISP), o también como solución de última milla [1].

El objetivo principal de este trabajo [4] fue la implementación y pruebas de un sistema de comunicación basado en la tecnología FSO. Se optó por continuar con el trabajo realizado en un proyecto anterior [2] en donde además de realizar un estudio de viabilidad de sistemas FSO se incluyeron análisis y simulaciones de un sistema Reasonable Optical Near Joint Access (RONJA).

RONJA¹ es un proyecto de tecnología libre creado por Twibright Labs en República Checa. Entre sus variantes se optó por implementar el sistema Ronja Tetropolis que está diseñado para obtener una velocidad de 10 Mbps a una distancia máxima de 1,4 km mediante un led de 625 nm (luz roja). El particular interés en implementar esta alternativa proviene de que es una tecnología libre y su costo de construcción es bajo, ideal para las primeras instancias de investigación en este tema [5].

2. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

Para la construcción del transceptor se tomó como referencia el diseño elaborado en el proyecto RONJA realizado por el estudio checo Twibright Labs [6]. El transceptor óptico construido permite un enlace punto a punto con un sistema idéntico en el otro extremo de la comunicación. Cada uno de los extremos se divide en tres bloques: interfaz, transmisor y receptor. El diagrama completo se puede observar en la Fig. 1.

¹ <http://ronja.twibright.com/>.

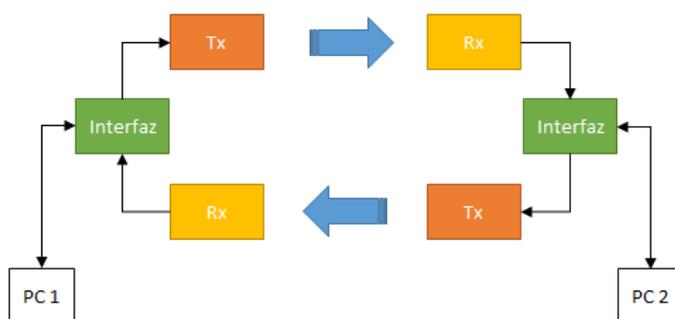


Figura 1: Sistema FSO bidireccional.

El diagrama de la Fig. 1 muestra un enlace bidireccional (full-duplex). En las siguientes secciones se detalla el funcionamiento de cada uno de los bloques principales mencionados, separando la interfaz en sus funciones de transmisión y recepción.

Los datos son recibidos en la interfaz desde la PC utilizando Ethernet en el modo 10Base-T con codificación Manchester. Luego del procesamiento los datos son enviados al transmisor por un cable coaxial, para luego llegar al receptor vía un rayo de luz a través del espacio libre con modulación On-Off Keying (OOK). El receptor amplifica la señal y la envía a la interfaz, que detecta los datos y los envía al PC.

Interfaz - Sección de transmisión

En transmisión la función principal del bloque interfaz es adaptar la señal proveniente del PC o switch a una señal compatible con el bloque transmisor. En la Fig. 2 se muestra el diagrama de bloques del circuito. En primer lugar se utiliza el integrado DS26LS32 para convertir la señal Ethernet que viene por dos líneas en contrafase (TD+ y TD-) a una única señal con voltajes compatibles para el resto de los integrados del circuito.

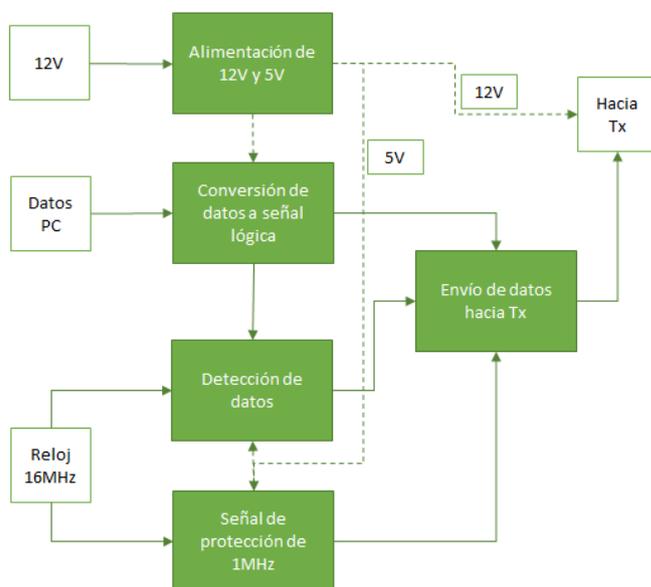


Figura 2: Diagrama de bloques de interfaz en transmisión.

La señal recibida pasa por un bloque RC derivador que genera picos de voltaje en la señal, que mediante un *Schmitt-Trigger* a continuación se traduce en una señal constante en "1" con picos a "0" en las transiciones de "bajo a alto" de la señal de datos. La distancia entre los pulsos aporta información de frecuencia, que es aprovechada por un bloque de tres *shift-registers* para crear una señal "ventana" que se mantiene en "0" si se reciben datos de Ethernet 10Base-T y en "1" en caso contrario. Es importante destacar que el hecho de que

Ethernet utilice una codificación Manchester implica que no importa el patrón de bits que se tenga en la señal de datos, siempre habría transiciones de "bajo a alto".

También se genera una tercera señal cuadrada de 1 MHz que se envía cuando no se tienen datos a enviar. Esta señal resulta importante para fijar una amplitud en el receptor por encima del ruido que se puede generar en el fotoreceptor por luz externa, garantizando que la amplificación del ruido no genere falsos-positivos en la recepción.

Transmisor

En este bloque se transforma la señal cuadrada de voltaje proveniente de la interfaz del transmisor en una señal cuadrada de corriente, con el fin de activar el LED que genera la señal óptica hacia el espacio libre. La señal recibida desde la interfaz pasa en primer lugar por un bloque limitador que sirve como comparador para regenerar la onda cuadrada. Este circuito consiste en dos transistores 2N3904 que alternan entre corte y zona lineal dependiendo de si se tiene una amplitud positiva o negativa en la señal recibida. Esto se transforma en variaciones de la corriente que circula por una resistencia, lo que genera una diferencia de voltaje en sus bornes.

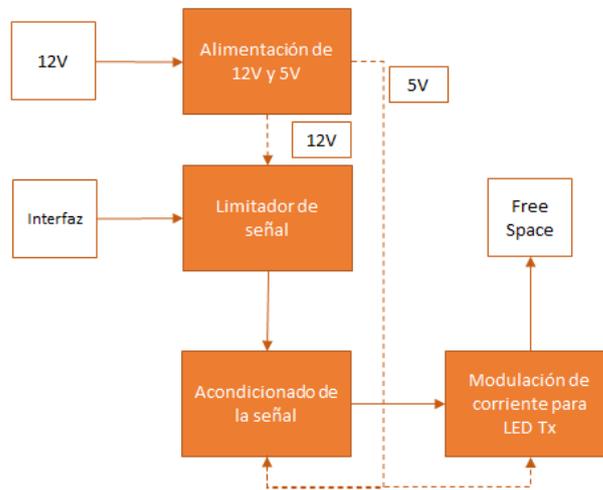


Figura 3: Diagrama de bloques del transmisor.

Receptor

La sección de recepción es la encargada de recibir la señal óptica desde el espacio libre, transformándola en una señal eléctrica. Debe a su vez amplificarla para luego enviarla a la interfaz de recepción.

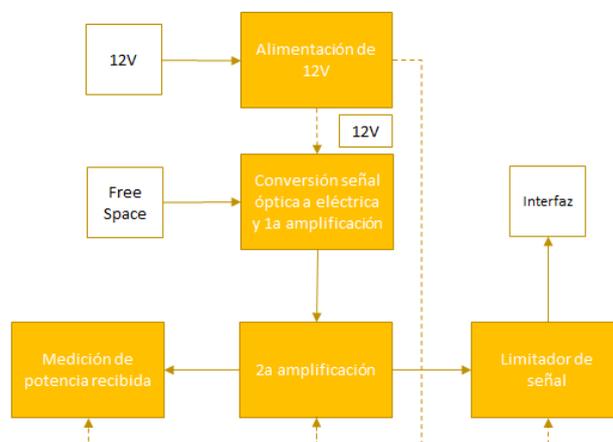


Figura 4: Diagrama de bloques del circuito de recepción.

La señal óptica es recibida en un fotodiodo BPW43, el que la transforma en una corriente. Este fotodiodo se usa con polarización invertida, lo que le permite tener una capacidad parásita pequeña en alta frecuencia [7]. Luego pasa por un primer bloque amplificador basado en un *dual-gatemosfet* BF908, convirtiendo la señal de corriente en una de voltaje y amplificándola. Como contrapartida este bloque integra la onda cuadrada, pues el polo de alta de la transferencia se encuentra en las centenas de kHz al tiempo que las frecuencias de interés son del orden de los MHz.

Se realiza luego una segunda etapa de amplificación donde también se realiza una diferenciación que compensa la integración del bloque anterior, para esto se utiliza el amplificador NE592 que permite fijar una transferencia cuyo polo de baja se encuentra por encima del rango de interés. De esta manera en las frecuencias de trabajo se obtiene una banda pasante gracias al uso de estos dos amplificadores. En la Fig. 5 se puede ver el resultado de la simulación de las transferencias de la primera etapa (V_{in1}/I_{in}), de la segunda etapa (V_{out1}/V_{in1}) y de la ganancia total (V_{out1}/I_{in}) conseguida con las dos etapas de amplificación descriptas (en el caso de los cocientes V/I la ganancia en dB expresa el valor numérico del cociente tomando V en volts e I en amperes, $V/I_{dB}=20\log(V(V)/I(A))$). Esta ganancia total permitirá trabajar con los bajos niveles de corriente generados por el fotorreceptor. Finalmente se utiliza un bloque limitador que funciona como comparador para enviar la señal hacia la sección de recepción de la interfaz.

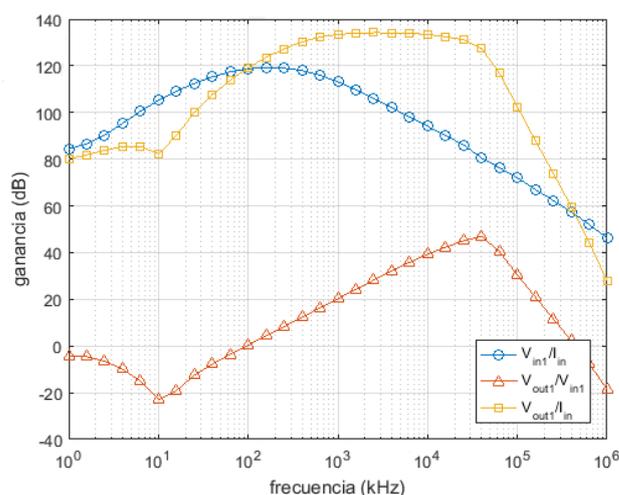


Figura 5: Respuesta en frecuencia de los amplificadores en el circuito de recepción.

Interfaz - Sección de recepción

Luego de que la señal óptica se transforma en eléctrica y se amplifica en el circuito de recepción, esta es transportada por un cable coaxial a la interfaz. A continuación se detalla el tratamiento que recibe la señal en la interfaz, traduciéndola para luego enviarla al PC (ver Fig. 6).

Al recibir la señal desde el receptor se utiliza el integrado DS26LS32 para obtener una señal de voltajes compatibles con los integrados del circuito. Se realiza también una detección de la señal en la interfaz para distinguir entre la información que viene desde el PC transmisor (datos) y la señal de protección de 1 MHz, señalizando esto con una señal "ventana" como se explicó previamente.

En 10Base-T se utiliza el Pulso de Integridad del Enlace (LIP) para indicar que un enlace está activo. Debido a esto, cuando no se tienen datos para enviar hacia una PC se debe generar esta señal de LIP que corresponde a un pulso de entre 100 ns y 200 ns cada 16 ms [8]. Para ello se utiliza un contador de 18 bits que al utilizar un reloj de 16 MHz cuenta hasta 16 ms y envía un pulso de dos periodos de reloj (125 ns).

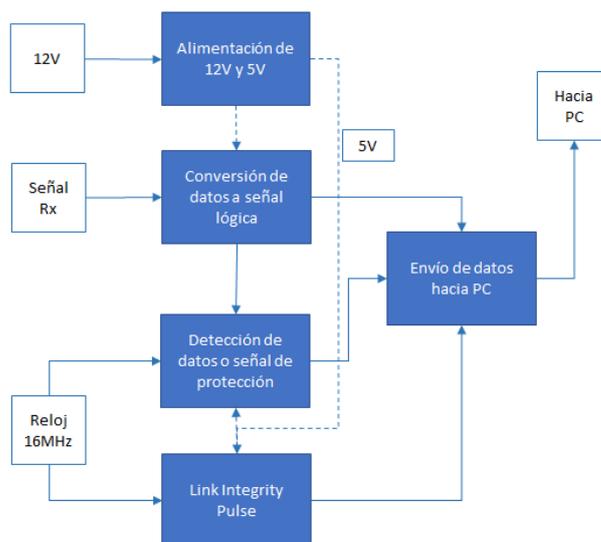


Figura 6: Diagrama de bloques del circuito de recepción en la interfaz.

Se utiliza la señal "ventana" para alternar entre el envío de datos y el LIP hacia el PC. El integrado DS26LS31 toma la señal concatenada y genera dos salidas a contrafase para producir las señales RD+ y RD- del receptor (de acuerdo al estándar Ethernet).

3. SIMULACIONES, PRUEBAS EN PROTOBOARD Y DISEÑO DE CIRCUITOS IMPRESOS

Luego de estudiado el comportamiento teórico de los circuitos se realizaron simulaciones de estos y pruebas de los bloques en protoboard. Para las simulaciones se utilizó el software PSPICE considerando su amplia bibliografía y extensa librería de componentes. Se realizaron simulaciones en tiempo y en frecuencia para señales genéricas obteniendo resultados acordes con el estudio teórico realizado. Más allá de la primera etapa de simulaciones, el PSPICE fue una herramienta recurrente en el trabajo para aclarar dudas que surgían en la depuración de los circuitos. Por ejemplo, al medir con el osciloscopio formas de ondas distintas a las esperadas, las simulaciones PSPICE del circuito con el agregado de un modelo sencillo de punta de prueba, permitieron verificar que las distorsiones observadas en las medidas se debían a la punta de prueba y no a un mal funcionamiento del circuito. El poder simular con esta herramienta el funcionamiento de etapas del circuito que a priori mostraban un comportamiento distinto al esperado ayudó a identificar el origen de estas diferencias así como la mejor forma de lidiar con ellas.

Antes de pasar a realizar impresiones de los circuitos, estos fueron realizados en protoboard para tener un mejor conocimiento de su funcionamiento, así como un primer acercamiento a sus limitantes y posibles inconvenientes que pudieran surgir en el desarrollo de los circuitos impresos. Una vez que se verificó el funcionamiento de los circuitos con simulaciones y pruebas en protoboard se diseñaron las tarjetas de circuitos impresos (PCB). Con el software Eagle se hicieron las tres placas que conforman el enlace interfaz, transmisor y receptor.

La impresión fue hecha en la prototipadora del Instituto de Ingeniería Eléctrica (IIE) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. El IIE cuenta con una prototipadora LPKF ProtoMat S63², la cual tiene una resolución de 0,5 μm y una precisión de $\pm 0,02$ mm, permitiendo una fabricación muy precisa de las tarjetas de circuito impreso diseñadas, lo cual facilita considerablemente el desarrollo de estos circuitos. Estas PCBs fueron realizadas usando placas FR4 de doble estándar de 1,6 mm de espesor, con un espesor de cobre de 35 μm . Los circuitos desarrollados se pueden ver en la Fig. 7.

² <http://www.lpkf.com/products/rapid-pcb-prototyping/circuit-board-plotter/protomat-s63.htm> .

4. PRUEBAS DEL ENLACE

Luego de construidos los circuitos en PCBs se realizó una primera etapa de pruebas de los mismos con señales externas provistas por un generador de señales y se observó con osciloscopio su comportamiento en las diferentes etapas de los circuitos. El diseño y construcción de PCBs propios para el desarrollo de este transceptor fue uno de los aportes originales de este trabajo. El hecho de disponer de PCBs para la implementación de todos los circuitos involucrados facilita la repetitividad del sistema. En el caso de los trabajos originales de Ronja, el conexionado de los elementos del receptor se hacía sin PCB, sobre una caja metálica con tres secciones separadas, lo que facilitaba el aislamiento de las distintas secciones de amplificación evitando problemas de autointerferencia en el circuito. Al realizar el receptor en un PCB hubo que solucionar problemas de autointerferencia realizando variaciones en el diseño de la primera versión de PCB realizado, estas variaciones consistieron esencialmente en la redistribución de los componentes del receptor. De este modo se solucionaron los problemas de autointerferencia consiguiendo el objetivo de tener el receptor realizado en un PCB, que como se dijo aporta a la repetitividad del sistema. También se realizaron diseños propios de PCBs para la interfaz y el transmisor en vez de utilizar los provistos por Ronja.

Otra de las diferencias con respecto al diseño original de Ronja fue la sustitución del reloj de la interfaz, ya que el oscilador de cristal utilizado por Ronja (DIL-14 de 4 pines) no lo teníamos disponible. En su lugar se utilizó un cristal de tipo HC-49/US de 2 pines³. Los DIL-14 de 4 pines son osciladores de cristal que ya entregan la señal de reloj, mientras que el cristal de tipo HC-49/US es simplemente un cristal de cuarzo a partir del cual se construye la señal de reloj.

Durante la prueba de los circuitos se observó que era necesario utilizar cajas metálicas en los circuitos de transmisión y recepción por dos razones; por un lado permiten aislar a los mismos de interferencia externa que pueda corromper la señal. Por otro, al conectar las cajas a tierra, el ánodo del fotodiodo puede conectarse a tierra a través de una conexión más corta, lo cual evita que el mismo actúe como antena captando señales eléctricas indeseadas.



(a)

(b)

(c)

Figura 7: Circuitos impresos (a) Interfaz, (b) Transmisor, (c) Receptor.

Una vez que se probó cada etapa del enlace por separado, se realizaron las conexiones de prueba del enlace unidireccional. En la Fig. 8 se muestra un diagrama de las conexiones realizadas.

Durante la prueba del enlace unidireccional, uno de los sentidos del enlace pasaba por los tres circuitos, mientras que el retorno se hacía por cable. Para el envío de luz desde el LED hacia el fotodiodo se utilizaron dos lentes biconvexas. La primera de las lentes toma los rayos de luz del LED y los envía paralelos hacia la segunda lente la que los recibe paralelos y los enfoca en el fotodiodo [9].

³ <https://www.fpga4fun.com/oscillators.html> .

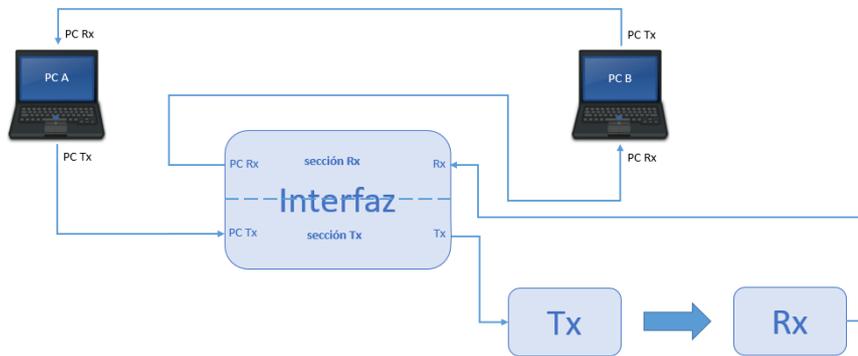


Figura 8: Configuración utilizada para las pruebas de los circuitos.

Se hicieron pruebas de ping de distintos tamaños, se evaluó la capacidad del enlace con el software iPerf3 [10] y se probaron transferencias de archivos de un PC al otro, logrando la velocidad esperada de 10 Mbps. Considerando los buenos resultados del enlace unidireccional se procedió a repetir los mismos tres circuitos, con el objetivo de lograr una comunicación bidireccional entre los dos puntos sin necesidad de un retorno por cable.

Esto permitió también realizar pruebas a mayores distancias, puesto que se podía tener un conexionado más corto desde la interfaz hacia el transmisor y receptor. En el caso unidireccional, al aumentar la distancia entre los bloques se perdía la tierra común entre los tres circuitos, generando errores en la detección de la señal.

Los tres nuevos circuitos se volvieron a fabricar en la prototipadora del IIE, aprovechando la oportunidad para realizar mejoras menores de algunas partes del diseño, aunque las versiones anteriores ya funcionaran correctamente. Una vez que se culminó con la realización de los circuitos y pruebas iniciales, para comprobar su funcionamiento se probó el enlace bidireccional con el esquema que se detalló en la Fig. 1. Nuevamente, se realizaron pruebas de ping, tasa de datos y transferencias de archivos, logrando establecer una comunicación punto a punto mediante este transceptor basado en FSO en un rango de 25 m de longitud, con una capacidad de 10 Mbps. Un video de la prueba de funcionamiento se puede ver en: https://iie.fing.edu.uy/files/FSOLink_Video_Presentacion_20161123.mp4.

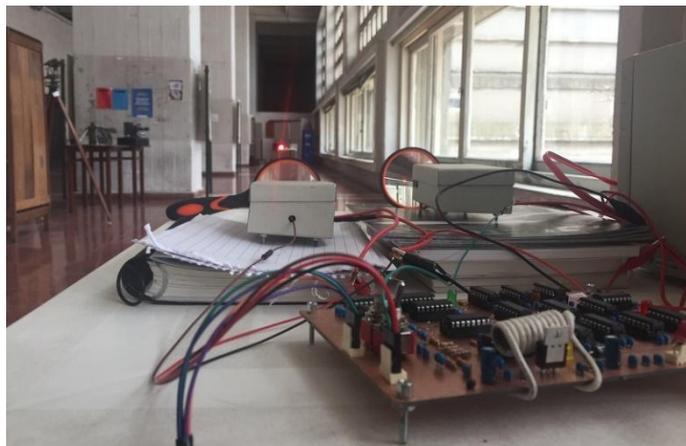


Figura 9: Pruebas del enlace bidireccional a una distancia de 25 m.

```

C:\Windows\system32\cmd.exe
Minimum = 56ms, Maximum = 61ms, Average = 57ms
Control-C
C
C:\Users\Pipi\iperf3>iperf3 -c 169.254.60.63
Connecting to host 169.254.60.63, port 5201
[ 4] local 169.254.47.236 port 51069 connected to 169.254.60.63 port 5201
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[ 4]  0.00-1.01   sec    1.23 MBytes  10.2 Mbits/sec
[ 4]  1.01-2.01   sec    1.11 MBytes  9.30 Mbits/sec
[ 4]  2.01-3.01   sec    1.11 MBytes  9.30 Mbits/sec
[ 4]  3.01-4.01   sec    1.17 MBytes  9.78 Mbits/sec
[ 4]  4.01-5.01   sec    1.11 MBytes  9.30 Mbits/sec
[ 4]  5.01-6.01   sec    1.17 MBytes  9.82 Mbits/sec
[ 4]  6.01-7.01   sec    1.11 MBytes  9.30 Mbits/sec
[ 4]  7.01-8.01   sec    1.11 MBytes  9.30 Mbits/sec
[ 4]  8.01-9.01   sec    1.17 MBytes  9.77 Mbits/sec
[ 4]  9.01-10.01  sec    1.11 MBytes  9.26 Mbits/sec
-----
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[ 4]  0.00-10.01  sec   11.4 MBytes  9.53 Mbits/sec
[ 4]  0.00-10.01  sec   11.4 MBytes  9.53 Mbits/sec
iperf Done.
C:\Users\Pipi\iperf3>

```

Figura 10: Pruebas de tasa de datos en el enlace bidireccional.

5. CONCLUSIONES

Se construyó un enlace inalámbrico bidireccional basado en tecnología FSO que fue probado a una distancia de 25 m con una velocidad de 10 Mbps. Se pueden alcanzar mayores distancias con este sistema a partir de un mejor acondicionamiento del enlace. Por ejemplo, resulta importante la construcción de un cabezal óptico cilíndrico con el circuito fijado en un extremo y el lente en el otro, garantizando de este modo mantener el led y el fotodiodo a la distancia focal del lente. Además, esta estructura permitiría reducir la pérdida de potencia emitida por el led, puesto que toda la luz pasaría por el lente y no se perderían rayos de luz hacia los costados. Es común, en este tipo de transceptores utilizar una estructura con forma de visera en el extremo del lente que cumple con el objetivo de reducir la interferencia de luz solar captada por el fotodiodo.

Resultó importante la construcción de cajas metálicas que permiten aislar a los circuitos de recepción de la interferencia externa, que puede afectar el funcionamiento debido a la alta amplificación de la señal recibida. Además esto posibilita tener un conexionado corto del ánodo del fotodiodo a tierra, lo que permite reducir los componentes parásitos que aparecen en una conexión muy larga a tierra y que pueden comprometer la señal recibida.

Más allá de los inconvenientes mencionados, se constató que resulta crítica una buena alineación del enlace. No se tuvieron mayores problemas en este caso por tratarse de distancias relativamente cortas en las pruebas. Para el caso de distancias mayores, puede hacerse más difícil la alineación del enlace. A su vez pequeños desajustes posteriores en los equipos pueden comprometer la integridad de la comunicación.

Por otra parte, al realizar pruebas se notó que el enlace se comporta correctamente ante obstrucciones de corta duración, pudiendo recuperar la comunicación sin mayores inconvenientes. Esto resulta importante pues ante breves obstrucciones como pueden ser cruces de aves, no se ve afectado significativamente el funcionamiento del sistema. En base a los resultados obtenidos se verificó que este tipo de soluciones resulta práctica para las aplicaciones mencionadas en la introducción, tales como conexión de área local entre edificios corporativos, soluciones de última milla o como backhaul de redes móviles.

6. TRABAJO FUTURO

Una de las mejoras posibles es el desarrollo de un cabezal óptico, como fue mencionado anteriormente, esto permitiría tener un mejor desempeño del enlace. Para lograr mejoras en la tasa de datos, se deben realizar cambios en los circuitos, por ejemplo, para realizar un enlace de 100 Mbps con Ethernet 100Base-T se deben utilizar componentes que operen a más alta frecuencia. A su vez, el diseño lógico de la interfaz del circuito debe ser distinto debido a las diferencias existentes entre una comunicación 100Base-T y una 10Base-T (como la utilizada en la interfaz desarrollada).

Este primer prototipo de transceptor FSO facilitará la exploración en el IIE en el área de comunicaciones satelitales basadas en enlaces ópticos. Comenzando por estudiar las mejoras necesarias para este caso a través

de simulaciones PSPICE, para lo cual se continuará con el trabajo de simulación iniciado en este proyecto. En esta nueva etapa se abordarán también temas de "tracking" de los satélites a los efectos de mantener el alineamiento del haz, tema que implica un importante desafío desde el punto de vista de los sistemas de control involucrados. Esto permitirá dar continuidad a los trabajos en el área satelital iniciados por el IIE hace algunos años⁴.

REFERENCIAS

1. GHALIB ALKHOLIDI, Abdulsalam; SAEED ALTOWIJ, Khaleel. "Free Space Optical Communications - Theory and Practices". En *Contemporary Issues in Wireless Communications: Editorial InTech*, 2014, Cap. 5, pp. 159 - 212. ISBN 978-953-51-1732-2, DOI 10.5772/58482.
2. NOLÉ, Belén; GARCÍA, Juan Pablo; RODRÍGUEZ, Fernanda. "Láseres en espacio libre y ondas milimétricas". Director: Benigno Rodríguez. Tesis de grado, Instituto Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Ciudad de Montevideo, Uruguay, 2012. Disponible en Web: <http://iie.fing.edu.uy/publicaciones/2012/NGR12/NGR12.pdf>.
3. BARABINO, Nicolás; RODRÍGUEZ, Benigno. "Performance evaluation of FSO and MMW for the uruguayan weather conditions". *Wireless Personal Communications*, 2013, Springer, vol. 73, pp. 1077-1088, ISSN: 09296212, DOI: 10.1007/s11277-013-1249-y.
4. BENEDETTI, Bruno; GONZÁLEZ, Lucas; ROUBAUD, Matías. "Desarrollo de un Transceptor basado en Óptica de Espacio Libre". Director: Benigno Rodríguez. Tesis de grado, Instituto Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Ciudad de Montevideo, Uruguay, 2016. Disponible en Web: <https://iie.fing.edu.uy/publicaciones/2016/BGR16/BGR16.pdf>.
5. KHUMSAT, Phanumas; WATTANAPISIT, Noppadol; KULHAVEY, Karel. "Optical front-ends for low-cost laser-based 10-mbps free-space optical transceiver". En *actas de IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS 2006)*, 2006, pp. 1913-1916.
6. RONJA TWIBRIGHT LABS. [ref. de 19 de julio de 2018]. Disponible en Web: <http://ronja.twibright.com/>.
7. O´DONNELL, Bill. *Things you should know about LED's photodiodes* [en línea]. University of Nevada [ref. de 19 de julio de 2018]. Disponible en Web: http://www.physics.unlv.edu/~bill/PHYS483/LED_PIN.pdf.
8. IEEE LINK TASK FORCE AUTODETECT, NATIONAL SEMICONDUCTOR. *Specification for NWay autodetect* [en línea]. [ref. de 19 de julio de 2018]. Disponible en Web: http://web.archive.org/web/20110714162407/http://www.negotiateddata.com/files/NWay_Specification_041094.pdf.
9. NAVE, Carl R. *Principal focal length* [en línea]. [ref. de 19 de julio de 2018]. Disponible en Web: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/geoopt/foclen.html>.
10. IPERF.FR. *iPerf - The network bandwidth measurement tool* [en línea]. [ref. de 19 de julio de 2018]. Disponible en Web: <https://iperf.fr/>.



Bruno Benedetti obtuvo el título de Ingeniero Electricista (perfil Telecomunicaciones) de la Universidad de la República (UdelaR), Montevideo, Uruguay, en 2016. Desde el año 2014 trabaja para la empresa Nokia realizando tareas de despliegue, monitoreo y optimización de redes celulares WCDMA y LTE.



Lucas González obtuvo el título de Ingeniero Electricista (perfil Telecomunicaciones) de la Universidad de la República (UdelaR), Montevideo, Uruguay, en 2016. Desde el año 2017 trabaja en el área de soporte de la empresa de telecomunicaciones Ledefyl S.A.

⁴ <https://iie.fing.edu.uy/investigacion/grupos/lai/>.



Matías Roubaud obtuvo el título de Ingeniero Electricista (perfil Telecomunicaciones) de la Universidad de la República (UdelaR), Montevideo, Uruguay, en 2016.

Desde el 2016 forma parte del Departamento de Señales del Instituto de Ingeniería Eléctrica, colaborando en el proyecto "Predicción a corto plazo de la irradiancia solar a partir de imágenes de satélite con aplicación a la generación fotovoltaica".



Benigno Rodríguez obtuvo el título de Ingeniero Electricista y el grado de Magister en Ingeniería Eléctrica (opción Telecomunicaciones) de la Universidad de la República (UdelaR), Montevideo, Uruguay, en 1997 y 2004 respectivamente. En 2007 obtuvo el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica, Telecomunicaciones, de la Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburgo, Alemania. Desde 1993 a 1999 se desempeñó como Asistente de Investigación en el Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería (FING), UdelaR. Desde 1998 a 2004 se desempeñó como Asistente de Investigación en el Instituto de Ingeniería Eléctrica (IIE), FING, UdelaR. Desde 1997 a 2004 ocupó el cargo de Jefe del departamento de Ingeniería en Carisul S.A. (NEC de Uruguay). Desde 2008 a 2016 fue Profesor Adjunto del Depto. de Telecomunicaciones del IIE, FING, UdelaR. Desde 2008 a 2014 se desempeñó también como Responsable de la Planificación de Red en la empresa Dedicado S.A., Montevideo, Uruguay. Desde junio de 2014 a junio de 2015 ocupó el cargo de Coordinador de Carrera en el área de Mecatrónica en la Universidad Tecnológica del Uruguay, creando la carrera de Tecnólogo en Mecatrónica, como un título intermedio de una Ingeniería en Mecatrónica. Actualmente ocupa el cargo de Profesor Agregado, en Régimen de Dedicación Total en el IIE, FING, UdelaR. Sus principales intereses como investigador se centran en las áreas de: sistemas inalámbricos basados en OFDM, Láseres en Espacio Libre, Ondas Milimétricas y Redes de Sensores Inalámbricos.